

空气-气候-健康集成研究计划与交流平台（ARCH）旗舰报告



以健康驱动空气污染与气候变化协同治理 ——科学研究证据

空气-气候-健康集成研究计划与交流平台（ARCH）旗舰报告工作组

2024年1月

关于 ARCH (AiR-Climate-Health)

北京大学联合复旦大学、中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所、中国环境科学研究院、能源基金会等多家单位共同发起空气 - 气候 - 健康集成研究计划与交流平台 ARCH (AiR-Climate-Health)。ARCH 吸纳空气污染、气候变化和健康影响领域的研究机构、企事业单位、社会团体等组成学术交流与合作平台，旨在以健康驱动大气污染和气候变化的协同治理，并作为智库助力“碳中和”目标的尽快实现。

支持单位

北京大学环境科学与工程学院
中国环境科学研究院
中国疾病预防控制中心
复旦大学公共卫生学院
能源基金会
空气 - 气候 - 健康集成研究计划与交流平台 (ARCH)

引用方式

空气 - 气候 - 健康集成研究计划与交流平台 (ARCH) 旗舰报告工作组 (2023)， “以健康驱动空气污染与气候变化协同治理——科学研究证据”， 北京大学环境科学与工程学院， 北京， 中国

插图来源: www.pexels.com; www.unsplash.com 及网络



以健康驱动空气污染 与气候变化协同治理 ——科学研究证据

空气 - 气候 - 健康集成研究计划与交流平台 (ARCH) 旗舰报告工作组
2024 年 1 月

工作组成员列表

空气 – 气候 – 健康集成研究计划与交流平台 (ARCH) 旗舰报告

联合主席

朱 彤 中国科学院院士 北京大学环境科学与工程学院教授
吴丰昌 中国工程院院士 中国环境科学研究院研究员
施小明 中国疾病预防控制中心 副主任
阚海东 复旦大学公共卫生学院教授

摘要

宫继成 北京大学环境科学与工程学院研究员 (2023 旗舰报告总召集人)
陈仁杰 复旦大学公共卫生学院教授
赵晓丽 中国环境科学研究院研究员
李湑湑 中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所研究员
薛 涛 北京大学公共卫生学院研究员
刘 俊 北京科技大学能源与环境工程学院副教授
刘 欣 能源基金会环境管理项目主任

第一工作组

宫继成 北京大学环境科学与工程学院研究员 (召集人)
郑 晶 生态环境部华南环境研究所研究员
吴少伟 西安交通大学公共卫生学院教授
孟 夏 复旦大学公共卫生学院副教授
魏永杰 中国环境科学研究院研究员
贺 淼 中国医科大学公共卫生学院教授
吴晓晨 海南省环境科学研究院研究员

第二工作组

陈仁杰 复旦大学公共卫生学院教授（召集人）
刘 涛 暨南大学基础医学与公共卫生学院教授
赵 琦 山东大学公共卫生学院教授
程 建 安徽医科大学公共卫生学院教授
杨 军 广州医科大学公共卫生学院教授

第三工作组

赵晓丽 中国环境科学研究院研究员（召集人）
韩 斌 中国环境科学研究院研究员
王 芃 复旦大学大气与海洋科学系副研究员
杨 洋 南京信息工程大学环境科学与工程学院教授
沈惠中 南方科技大学环境科学与工程学院副教授

第四工作组

李涪涪 中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所研究员（召集人）
黄 蕾 南京大学环境学院教授
沈国锋 北京大学城市与环境学院研究员
张 舜 华中科技大学公共卫生学院教授
张明智 南京医科大学公共卫生学院讲师
闫美霖 北京工商大学生态环境学院副教授

第五工作组

薛 涛 北京大学公共卫生学院研究员（召集人）
同 丹 清华大学地球系统科学系助理教授
谢 杨 北京航空航天大学经济管理学院副教授

第六工作组

刘 俊 北京科技大学能源与环境工程学院副教授（召集人）
万 薇 亚洲清洁空气中心中国区项目总监
靳雅娜 北京大学环境科学与工程学院助理教授、研究员
王 腾 北京协和医学院卫生健康管理政策学院助理教授

目 录

CONTENTS

序言	1
摘要	6
1. 空气污染与人体健康	8
2. 气候变化与人体健康	9
3. 空气污染与气候变化的交互影响	10
4. 空气污染与气候变化的协同健康效应	10
5. 空气污染与气候变化协同治理对健康的影响	10
6. 结论与展望	11
文献使用方法	12
第一章 空气污染与人体健康	
1.1 空气污染的人群暴露现状	14
1.1.1 全球范围内空气污染暴露情况	15
1.1.2 我国空气污染暴露情况	15
1.2 空气污染健康风险的时空分布	17
1.2.1 空气污染健康风险的时间分布	17
1.2.2 空气污染健康风险的空间分布	17
1.3 空气污染与健康效应的暴露反应关系	23
1.3.1 我国空气污染的短期健康危害	23
1.3.2 我国空气污染的长期健康危害	24
1.4 空气污染导致健康损伤的毒理机制	27
1.5 空气污染健康效应的易感人群	28
参考文献	30
第二章 气候变化与人体健康	
2.1 气候变化的态势和人群暴露现状	36
2.1.1 气候及气候变化的定义	36
2.1.2 全球和我国气候变化的变化趋势	36
2.1.3 气候变化的主要驱动因素	37
2.2 气候变化对传染性疾病的影响	38

2.2.1 气候变化对媒介生物性传染病的影响.....	38
2.2.2 气候变化对介水传播疾病的影响.....	38
2.2.3 气候变化对食源性疾病的影响.....	38
2.2.4 气候变化对经空气传播疾病的影响.....	38
2.2.5 气候变化对其他传染病的影响.....	38
2.3 气候变化对非传染性疾病的影响.....	39
2.3.1 气候变化对心血管疾病的影响.....	39
2.3.2 气候变化对呼吸系统疾病的影响.....	39
2.3.3 气候变化对消化系统疾病的影响.....	39
2.3.4 气候变化对泌尿系统疾病的影响.....	39
2.3.5 气候变化对生殖系统疾病的影响.....	40
2.3.6 气候变化对精神心理疾病的影响.....	40
2.4 气候变化健康影响的机制.....	41
2.4.1 气候变化直接影响的机制.....	41
2.4.2 气候变化间接影响的机制.....	42
2.5 气候变化健康风险的空间分布和易感人群.....	44
2.5.1 气候变化健康风险概述.....	44
2.5.2 气象因素对不同地区主要健康结局的影响差异.....	44
2.5.3 不同人群对气候变化的易感性差异.....	44
2.6 未来气候变化情景下的疾病负担变化.....	45
2.6.1 未来气候变化对传染性疾病的负担的影响.....	45
2.6.2 未来气候变化对非传染性疾病的负担的影响.....	45
参考文献.....	47

第三章 空气污染与气候变化的交互影响

3.1 气候对空气污染的影响.....	52
3.1.1 气候变化对空气污染的影响机制.....	52
3.1.2 极端气候事件对空气污染的影响.....	53
3.2 空气污染对气候的影响.....	54
3.2.1 典型污染事件对天气气候的影响.....	54

目 录

CONTENTS

3.2.2 长期污染防控政策对气候的影响.....	54
参考文献	56

第四章 空气污染与气候变化的协同健康效应

4.1 空气污染与气候变化复合暴露的关键因素.....	62
4.2 空气污染修饰气象因素的协同健康效应	63
4.3 气象因素修饰大气污染物的协同健康效应.....	64
4.4 空气污染事件与极端天气事件复合暴露的协同健康效应	65
参考文献	67

第五章 空气污染与气候变化协同治理对健康的影响

5.1 空气污染治理与健康	72
5.2 气候变化应对与健康	73
5.3 碳减排与清洁空气行动的协同效益.....	74
5.4 典型协同路径下的健康影响评估	75
参考文献	77

第六章 结论与展望

6.1 结论与建议.....	82
6.1.1 空气污染是威胁人体健康的首要环境风险因素	82
6.1.2 气候变化通过多种途径影响和加剧健康风险.....	82
6.1.3 空气污染与气候变化交互影响人体健康	83
6.2 不足与展望.....	84
6.2.1 跨领域合作加深理解空气污染与气候变化的复杂交互机制	84
6.2.2 加强空气污染的人群健康影响机制与适应性研究.....	84
6.2.3 加快开展针对气象暴露的流行病学与医学研究	85
6.2.4 基于空气与气象的综合监测系统开展健康集成研究.....	85
6.2.5 以健康驱动空气污染与气候变化协同治理研究	86



在全球环境治理和公共健康保护领域，加快实现空气污染治理和气候变化的协同治理已成为一个重要议题。2019 年全球因空气污染导致的过早死亡人数高达 667 万，同时造成超过 2 亿伤残调整寿命年的损失，表明空气污染不仅造成人类健康的巨大损失，也带来全球经济的沉重负担。与此同时，越来越多的科学证据表明气候变化通过气温、极端天气和对食品安全的影响，对人类健康带来巨大的直接和间接威胁。中国政府在应对空气污染挑战方面已采取了一系列有效措施，取得了显著成效。然而，以 PM_{2.5} 为主要污染物的空气污染仍然对中国公众健康带来巨大威胁，每年导致上百万过早死亡。在碳达峰、碳中和目标下，协同推进空气质量改善和气候变化应对的战略和措施，实现大气污染物和温室气体的协同减排，可望获得更大的健康效益。因此，我们应该围绕健康保护这个核心，识别并实施基于健康保护效益的优先性领域和措施，重构和改进中国的空气污染防治与气候变化协同应对战略，推动实现环境 - 健康 - 经济的多赢目标。

“空气 - 气候 - 健康集成研究计划与交流平台 (ARCH)” 是北京大学联合中国环境科学研究院、复旦大学和中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所共同建立的。平台在能源基金会资助下编写了此报告。该报告通过系统梳理和深入分析空气 - 气候 - 健康领域的关键科学证据，提出以健康驱动空气污染和气候变化协同治理的思路，有望为迈向美丽和健康中国的道路上寻找更加合理的路径。



朱彤

中国科学院院士
北京大学环境科学与工程学院
教授



吴丰昌

中国工程院院士
中国环境科学研究院研究员



我国提出的“碳达峰、碳中和”战略对于减少污染物排放、改善空气质量，以及缓解气候变化带来的环境健康风险具有深远影响。当前，全球环境治理正面临空气污染、气候变化与环境健康三者交互影响的复杂挑战。空气污染直接损害人类健康，并通过气候系统影响环境健康，而气候变化又反过来影响空气污染，形成恶性循环。环境基准和标准研究也应当与时俱进，从空气污染、气候变化与环境健康交互影响的角度开展新探索。环境基准研究揭示了污染物如何影响气候与健康，为政策制定提供了科学依据，具有一定的前瞻性、科学性和预见性。此外，环境基准与标准在评估温室气体减排对缓解全球变暖的影响方面同样重要。未来，我国须整合各方面资源，不断发展和完善大气质量基准和标准体系，积极应对空气污染和气候变化对环境健康的影响。同时，大气中新污染物对环境健康的影响逐渐显现，也将成为基准研究和标准研究的新的前沿热点。持续的科学研究和动态的政策更新将让我国在应对空气污染和气候变化挑战时更加灵活有效，为全球环境治理贡献中国智慧。

全球各国面临人口老龄化的巨大挑战，到2050年全球老年人口将达到20亿人，人口老龄化尤其是高龄化带来失能、失智、共病、心理健康等问题，大气污染与气候变化会加重对脆弱人群特别是老年人的死亡、发病、住院等风险。近些年来中国在大气污染治理、应对气候变化方面开展了大量工作，包括法规、政策、规划、行动等。根据中国疾病预防控制中心评估，中国过去十年的大气污染控制行动在相当程度上抵消了人口老龄化带来的健康威胁。从保护人的健康的视角来加强环境污染治理越来越成为包括环境、生态、健康等领域科学家和决策者的广泛共识。基于健康驱动的空气污染与气候变化协同治理的科学证据越来越多，本报告组织了国内30多位一线学者，在前期研究基础上，系统总结了我国空气和气候对健康影响的指标体系，从5个方面设计了21项核心内容和指标，跟踪评估中国在走向美丽中国和健康中国之路上的做法并提出大气污染与气候变化协同治理方面的意见建议。



施小明

中国疾病预防控制中心
副主任





阚海东

复旦大学公共卫生学院教授



空气污染和气候变化不仅是我国面临的环境和公共卫生挑战，也是全球关注的焦点问题。2019年全球疾病负担研究表明，空气污染是全球排名第四位的死亡危险因素，每年可导致667万例过早死亡；不适宜温度位列死亡危险因素的第十位，每年可造成195万例过早死亡。全面了解和应对空气污染和气候变化对人群健康造成的损害，是科学界和政府部门面临的共同挑战。我国目前的相关研究，在暴露方面主要关注室外空气污染、气候变化对人群的健康影响，较少考虑室内空气污染、室内温度；在健康结局方面，主要关注人群死亡率等宏观指标，较少涉及发病率、生物标志和组学。本次“空气-气候-健康集成研究计划与交流平台（ARCH）”报告，聚焦健康驱动空气污染与气候变化的协同治理，提出了针对性的科学证据与建议，对未来我国乃至全球环境治理具有重要参考价值。期待未来ARCH报告紧跟国内外相关科学领域的进展，围绕我国“双碳”目标背景下的空气污染、气候变化与人群健康研究现状和未来趋势，推陈出新，为后续更好地从健康角度优化大气环境治理提供思路和建议。

空气污染和气候变化同根同源，且都会对人群健康造成显著的负面影响。能源基金会一直致力于推动中国通过可持续能源发展和提高能效，实现世界级空气质量以保护保护人群健康，气候安全在经济可持续发展。为推动空气、气候与健康跨领域的研究、交流与合作，助力中国及全球的环境气候治理与健康保护，能源基金会支持北京大学、中国环境科学研究院、复旦大学、中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所等机构搭建了空气-气候-健康集成研究计划与交流平台（ARCH），并集合了在国内相关领域工作的一线学者，共同编写了《空气-气候-健康集成研究计划与交流平台（ARCH）旗舰报告》。本次报告聚焦空气、气候、健康及其相互关系和影响，总结梳理了最新的科学事实和进展，并提出了下一步工作的建议。希望能在经济社会新发展阶段和“双碳”背景下，依据世界卫生组织最新指导值，制定空气质量中长期目标愿景和分阶段的目标，并关注老龄化和低龄的婴幼儿等敏感人群对于空气质量的更高需求，同时统筹空气质量改善，健康保护和温室气体减排等工作。



邹骥

能源基金会首席执行官
中国区总裁





摘要

空气污染是人类健康的主要威胁之一，据估计，2019 年全球因长期暴露于空气污染而导致的过早死亡人数高达 667 万，此外还带来超过 2 亿的伤残调整寿命年（DALYs）损失，成为全社会沉重的经济负担。同时，气候变化作为一个全球性的环境挑战，不仅通过热浪、寒潮、干旱、强降雨等极端天气事件直接影响人类健康，也通过影响食品安全、加剧光化学污染等间接路径对人类健康造成威胁。

为应对空气污染的严峻挑战，保障人民群众身体健康，中国政府自 2013 年起实施了以“国十条”为代表的一系列旨在改善空气质量的政策和措施，过去十年间已经取得了显著成效。但当前 PM_{2.5} 污染尚未得到根本性控制，臭氧浓度整体在缓慢升高后出现波动趋势，已成为仅次于 PM_{2.5} 影响空气质量的重要因素，对公共健康构成了新的挑战。当前中国也正在迈向“双碳”目标的进程中，采取了一系列应对气候变化战略、措施和行动，这不仅对于全球气候治理意义重大，能源清洁转型、产业绿色发展等关键举措也将为中国空气质量的持续改善提供巨大驱动力。

空气污染和气候变化具有内在联系，因为大气污染物和温室气体在排放上同根同源，因此有可能通过协同共治的防治方案来解决。相关研究也已经证实，中国的空气污染治理措施不仅显著改善了空气质量，同时实现了大量的二氧化碳减排，具有协同效应。治理空气污染和应对气候变化都将带来健康效益，这也是相关政策和行动的

核心目标之一。但是不同排放源的控制、不同措施组合以及在不同区域来实施，可能会带来不同维度和不同程度的健康收益。

以健康风险规避和人群健康保护为目标制定相关的战略和规划，有助于统筹协调多污染物、多类源、多种防治措施等，特别是协同推进空气质量改善和气候变化应对的战略和措施，实现大气污染物和温室气体的协同减排，以获取共生效益。以健康为目标和核心，有助于识别并实施基于健康保护效益的优先性领域和措施，重构和改进中国的空气污染防治与气候变化协同应对战略，推动实现环境 - 健康 - 经济的多赢目标。

在这一战略背景下，北京大学联合中国环境科学研究院、复旦大学、中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所，在能源基金会和空气 - 气候 - 健康集成研究计划与交流平台（ARCH）支持下，组织了国内 32 位一线学者，通过构建我国空气污染和气候变化对人体健康的影响指标体系，编制 ARCH 平台旗舰报告《以健康驱动空气污染与气候变化协同治理——科学研究证据》。在前期研究基础上，本报告首次系统提炼和总结了我国空气污染和气候变化对健康影响的关键领域和相应的指标，在空气污染与人体健康、气候变化与人体健康、空气污染与气候变化的交互作用、空气污染与气候变化的协同健康效应、空气污染与气候变化协同治理对健康的影响等五方面，本报告涵盖了 21 项核心内容和关键指标，通过对各项指标及其所涵盖领域问题的国内外研究进行

了系统梳理，基于关键科学证据，分析中国在走向美丽中国和健康中国之路上所面临的核心问题，

并提出以健康驱动空气污染和气候变化协同治理的解决思路。

《健康驱动空气污染与气候变化协同治理——科学研究证据》报告核心内容与关键指标

空气污染与人体健康

- 空气污染的人群暴露现状
- 空气污染健康风险的时空分布
- 空气污染与健康效应的暴露反应关系
- 空气污染导致健康损伤的毒理机制
- 空气污染健康效应的易感人群

气候变化与人体健康

- 气候变化的态势和人群暴露现状
- 气候变化对传染性疾病的影响
- 气候变化对非传染性疾病的影响
- 气候变化健康影响的机制
- 气候变化健康风险的空间分布和易感人群
- 未来气候变化情景下的疾病负担变化

空气污染与气候变化的交互影响

- 气候对空气污染的影响
- 空气污染对气候的影响

空气污染与气候变化的协同健康效应

- 空气污染与气候变化复合暴露的关键因素
- 空气污染修饰气象因素的协同健康效应
- 气象因素修饰大气污染物的协同健康效应
- 空气污染事件与极端天气事件复合暴露的协同健康效应

空气和气候协同治理政策的健康效应

- 空气污染治理与健康
- 气候变化应对与健康
- 碳减排与清洁空气行动的协同效益
- 典型协同路径下的健康影响评估

1. 空气污染与人体健康

全球空气污染，特别是 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 和 NO_2 仍然是主要关注点，99% 的人口暴露于超过 WHO 标准的污染水平，中低收入国家受影响尤甚。中国虽有所改善，但 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 和 NO_2 水平高于 WHO 指导值，反映出空气质量管理挑战。从 2010 年起，全球 $\text{PM}_{2.5}$ 年平均浓度仅下降 11.65%，东亚和东南亚的发展中国家的污染水平尤为高。 NO_2 浓度仅有 23% 的人口符合 WHO 指导值。

空气污染影响人类健康，表现为急性和慢性效应。急性效应与短期暴露相关，可能在 24 小时内增加心血管事件风险；而慢性效应与长期暴露相关，与增加的过早死亡数有关。在中国，即使空气质量改善，重度污染仍显著增加心血管疾病的住院风险，特别是在冷季。空间分布上， $\text{PM}_{2.5}$ 短期暴露与死亡风险在全球各地差异显著。此外，社会经济地位较低的群体，如美国的少数族裔和低收入人群，面临更高的污染暴露和健康风险。

空气污染与健康效应的研究揭示了 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 和 NO_2 短期暴露与增加的死亡风险之间的明确关联。研究发现，这些污染物浓度每增加 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时，

全因死亡风险相应增加了 0.22% 至 0.90%。长期暴露于 $\text{PM}_{2.5}$ 与全因死亡率增加 8–11% 有关，而且死亡风险随污染水平上升而增加。这些研究强调了 $\text{PM}_{2.5}$ 长短期暴露对心肺疾病的不良影响，且指出 $\text{PM}_{2.5}$ 与死亡风险的关系在低浓度时呈线性，但在高浓度时斜率降低。暖季 O_3 浓度增加与心血管疾病死亡风险增加有线性关联。

大气污染物如 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 进入人体后可通过呼吸系统引发全身性健康问题，包括内皮功能损伤、脂质代谢紊乱和免疫功能失调。炎症反应和氧化应激是这些不良效应的关键机制，大气污染物的暴露导致炎性物质水平升高，全身系统性炎症，以及机体产生活性氧物种 (ROS)，损伤生物大分子并诱发功能障碍。这些污染物还可能通过影响表观遗传修饰，如 DNA 甲基化变化，引起疾病。研究发现，大气污染物诱导的 8-OHdG 减少胞嘧啶 C 甲基化，导致 DNA 低甲基化，关联癌症、衰老等病症。RNA 甲基化变化也与大气污染物相关，可能影响基因表达和癌症发生。

空气污染对易感人群的健康影响显著，包括老年人、儿童、心肺疾病患者、低收入和教育程度低的人群。在中国， $\text{PM}_{2.5}$ 长期暴露导致的疾病负担在中东部地区尤为严重，占总疾病负担的 18.5–24.2%，超过全国平均水平。老年人、妇女



和教育程度较低者对 PM_{2.5} 短期暴露尤为敏感，这与他们较高的慢性病风险和较弱的免疫力有关。同样，这些群体对 PM_{2.5} 长期暴露及心脑血管疾病的发病风险也更敏感。儿童，特别是新生儿，对 PM_{2.5} 短期暴露引发的死亡风险也有较高的敏感性。此外，PM_{2.5} 中的黑碳、金属元素和有机物可能是影响易感人群健康的关键因素。

2. 气候变化与人体健康

气候变化是当前全球面临的重大挑战，对人类健康和社会发展构成了严重威胁。预计在 2030 至 2050 年间，气候变化将导致至少每年 25 万人因营养不良、疟疾、腹泻和热应激等死亡。世界气象组织报告显示，2022 年全球地表平均气温比工业化前高出约 1.15℃，标志着全球气温升高速度的加快。IPCC 第六次评估报告亦指出，近十年的平均气温高出工业化前水平 1.14℃。中国的气候变化也十分显著，1951 至 2021 年，中国地表年平均气温升高速度为 0.26℃/10 年，超过全球平均速度。这些变化表明，我国及全球的气象灾害将越来越频繁，迫切需要通过气候缓解和适应政策，降低气候变化带来的健康风险。

气候变化显著影响传染性疾病的传播，通过改变病原体在媒介体内的繁殖和媒介生物的数量及分布，影响疾病的发生率。例如，登革热、疟疾和乙型脑炎的传播与气温上升密切相关。珠江三角洲的研究表明，气温每升高 1℃，登革热的传播风险增加 101.0%。气候变化还可能引发蜱传疾病，如发热伴血小板减少综合征（SFTS）的暴发，其病例数与气温关系呈反 U 型。介水传播疾病，如霍乱和细菌性痢疾，与气温升高及降雨量变化相关。食源性疾病如沙门氏菌的发病率也受高温和湿度影响。空气传播疾病，如流感活动，与绝对湿度相关，但新冠病毒感染与气象因素的关系尚未明确。手足口病发病率与降雨量和气温有正相关。

气候变化对心血管、呼吸、消化、泌尿和生殖系统疾病产生显著影响，同时增加精神心理问题的发病风险。2019 年，中国约 40 万心血管疾病死亡与非适宜温度相关，主要是缺血性心脏病和脑卒中。呼吸系统疾病死亡的 30%，约 18 万人，归因于非适宜温度。气候变化通过影响水源和水质，也诱发消化系统疾病。泌尿系统疾病死亡中，约 3 万例与非适宜温度有关，其中低温的影响大于高温。孕期高低温暴露增加早产风险，每年约有 1.3 万早产事件与气候变化相关。精神心理方面，非适宜温度与全国每年 15.2% 的自杀死亡相关，洪水则增加创伤后应激障碍发病率。气候变化所导致的长期环境变化也会降低幸福感，影响精神健康。

气候变化对健康的影响涵盖了从直接的生理影响，如热浪和寒潮导致的心血管应激，到间接影响，包括传染病的传播变化和粮食安全问题。热浪可能导致急性肾损伤和心脏病，寒潮则通过增加血压和血液粘度，提高心血管事件的风险。洪涝和台风等极端气象事件直接威胁生命安全，破坏卫生资源，并可能引起精神健康问题。间接影响包括气候变化改变病原体和媒介生物的生命周期和分布，影响粮食产量和营养价值，以及降低空气质量，这些都可能导致营养不良、传染病和呼吸道疾病。

气候变化对人类健康的影响呈现出明显的地区差异和人群异质性。我国北方居民更易受高温的影响，而南方居民则对低温更为敏感，这可能与地方适应能力和生活条件有关。农村地区的居民通常比城市居民面临更高的健康风险，部分原因可能是基础设施和医疗资源的差异。此外，老年人、儿童、孕产妇、贫困人群以及慢性病患者对气候变化尤为敏感，面临更高的健康风险。

未来气候变化很可能进一步加剧。伴随着温度的攀升，相关健康风险会显著提高。此外，气候变化可能成为跨物种病毒传播的主要驱动力。对于非传染性疾病，预计热相关死亡率将显著升高，心血管和呼吸系统疾病将特别受影响。在高

排放情景下，到 2030 年代热相关超额死亡率可能从 1.9% 增至 2.4%，而到 2090 年代可能升至 5.5%。意外伤害和死亡风险亦将上升，预计到 2090 年代，伤害死亡人数可能增至近 68,000 人。

3. 空气污染与气候变化的交互影响

气候变化通过影响自然源排放（如生物挥发性有机物、野火、沙尘等）和人为源排放（如农业肥料和取暖需求）直接改变大气污染物的排放量。极端气候事件（如热浪、台风和寒潮）会通过改变大气化学反应速率、污染物的传输和沉降间接影响空气污染。

空气污染通过改变地气系统的辐射平衡影响气候。气溶胶散射和吸收太阳辐射，且作为云凝结核影响云特性和降水，具冷却或增温作用。沙尘事件通过直接散射和吸收辐射影响气候，降低地表温度，产生负反馈。野火排放的气溶胶和温室气体，能够散射太阳辐射、具有降温效应，并且通过延长云寿命、破坏地表植被、影响下垫面反照率等复杂机制影响气候变化。新冠疫情期间，气溶胶减排引起地表温度上升和极端降水变化。长期污染减排政策导致美欧气溶胶排放减少和温度升高。中国大气污染防治行动计划实施后，气溶胶减少导致中国东部温升，同时对流层臭氧污染加剧，进一步导致温升。

4. 空气污染与气候变化的协同健康效应

气候变化与空气污染，特别是 O_3 和 $PM_{2.5}$ ，构成全球面临的主要挑战，共同影响人群健康。 O_3 是光化学反应产物，其浓度受气象条件如紫外线、温度等因素影响。 $PM_{2.5}$ 来源于一次排放和大气中的二次反应，重霾事件受气温、降雨、风速等气象条件影响。极端降水可能与温室气体、气溶胶污染相关。研究显示，空气污染与降水动能-强度关系的不确定性有关，且气溶胶能抑制对流，增加夜间强对流和极端降水。热浪与 O_3 污染

在温暖的季节往往同时发生，是当下全球范围内最具健康威胁的复合事件之一。预计到 2080 年，热浪与 O_3 复合暴露将是现水平的 26 倍。热浪与 O_3 复合事件的健康影响基本达成共识，迫切需要科学有效的应对措施。同时，低温与颗粒物污染的复合暴露对健康的影响也不容忽视。

空气污染和气象条件互相作用，加剧了对人群健康的不良影响。研究显示，空气污染，尤其是 $PM_{2.5}$ 和 O_3 ，加剧了高温引起的心血管与呼吸系统疾病死亡风险。同样，气象因素如高温也加强了 O_3 相关死亡风险，低温增加了 NO_2 暴露相关的死亡风险。此外，气象条件改变（如湿度和温度变异）对空气污染相关的疾病发病率有修饰效应。目前研究主要集中于短期健康效应，未来需采用队列研究进一步验证气象因素的修饰作用，并揭示其潜在的作用机制。

全球极端气候事件增多，如中国的高温 and 干旱频发，野火暴露天数增加，强台风频率上升。研究表明，空气污染与极端天气的复合暴露可能增加健康风险。沙尘暴和花粉等复合暴露的健康效应研究不一致，需要更多系统性研究支撑制定有效的预防策略。

5. 空气污染与气候变化协同治理对健康的影响

空气污染对人类健康的负面影响已经得到广泛证实，而准实验研究为我们提供了评估空气污染控制措施健康效益的直接证据。例如，在 2008 年北京奥运会期间实施的污染控制措施使 $PM_{2.5}$ 浓度显著下降，这导致了心脑血管疾病死亡率和全因死亡率下降，甚至儿童的出生体重也有所提高。长期空气质量改善措施，如“大气十条”和“蓝天保卫战”等政策，显示出了对人群健康的持续益处，提高了成人的肺功能和认知能力。然而，中国在长期空气污染控制措施的健康效应研究上还存在不足。

应对气候变化主要通过碳减排，但长期碳减



排政策的健康效应难以用实证研究评估，多依赖模型预测。中国多地已实施“气候 - 健康”预警系统，如高温预警，以增强人群适应能力。研究表明这些预警系统可能与健康改善相关，如费城的高温预警减少了全因死亡。上海的气象健康预警服务减少了慢阻肺急性发作概率和医疗开支。中国的气象健康预警效果尚未进行广泛评估，实证研究明确预警措施的健康效益。

中国的清洁空气行动通过淘汰或升级低能效、高污染燃烧设施，已在 2013—2020 年间产生了 24.3 亿吨的二氧化碳减排量，推动了能源系统的转型。预计到 2035 年，空气质量达标所驱动的低碳能源转型政策将进一步减少大气污染物排放 6—32%，并使二氧化碳排放量降低 22%。此外，碳中和目标的深度低碳能源转型措施将成为中国空气质量持续改善的关键。研究显示到 2060 年碳中和情景下，人群 $PM_{2.5}$ 年均暴露水平将大幅降低，空气污染问题得到根本解决，对人民健康产生积极影响。提前退役高污染燃煤机组能减少大量的二氧化碳排放和空气污染相关死亡。

中国的碳中和承诺预示着能源系统的重大变化，对改善空气质量和提升公共健康具有重要意义。

研究表明，实现 2°C 气候目标能显著降低与 $PM_{2.5}$ 和 O_3 相关的疾病和死亡率，同时节省医疗费用。到 2030 年，可避免 560 万例 $PM_{2.5}$ 相关疾病，2050 年 $PM_{2.5}$ 和 O_3 导致的过早死亡率将分别下降约 13.5% 和 13.3%。碳中和将提高人均寿命并减少数百万过早死亡案例。农村能源转型和可再生能源部署将进一步减少污染，降低死亡率，尤其在北方省份。但人口老龄化可能削弱这些气候响应措施的健康效益。

6. 结论与展望

全球范围内，99% 的人口暴露在超出 WHO 空气质量指导值的空气中，中国为 $PM_{2.5}$ 浓度较高的国家之一。2019 年，空气污染导致的过早死亡为第四位的全球健康风险因素，导致全球平均预期寿命降低近一年。值得注意的是，在中国， $PM_{2.5}$ 浓度每增加 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，全因死亡率增加 8—11%，而臭氧浓度每增加 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，相关心血管疾病死亡风险增加 9%。

然而，这仅仅是冰山一角。气候变化正导致全球气温持续升高，而中国的气候脆弱性较高，

气象灾害频发,极端气象事件直接影响公众健康,间接影响传染病分布和食品安全,因此需要制定气候变化应对和减缓政策。更为复杂的是,空气污染和气候变化存在复杂交互作用,可独立或协同产生健康影响。例如,夏季高温与臭氧污染复合,冬季低温与PM_{2.5}复合暴露都显著影响健康。同时,气候变化应对措施也应考虑空气污染对易感人群的影响,如老年人、儿童、孕妇和慢性病患者。因此,治理空气污染与应对气候变化需同步进行。

科研工作者正致力于解决这一系列的挑战,跨领域的合作正在加强,以深入理解这些复杂的交互作用机制,特别是气溶胶的直接和间接辐射强迫效应,以及极端天气事件与空气污染的相互影响等重要议题。为了更好地应对健康危害和社会影响,需要开展更精细的观测和模型模拟,推动气候变化与空气污染耦合模型的进一步完善。

中国的“双碳”战略目标对公众健康产生的影响是一个重要议题,因此,需要深入研究低浓度空气污染对健康的影响,明确其与健康结局之间的因果关系,并评估不同污染组分的健康影响;其次,需要探讨不同地区人群的健康风险差异,为人群健康适应性评估提供基础;再次,针对气候变化引起的复杂健康影响,需开展流行病学与医学研究,特别是在全国尺度上开展对传染病的影响研究,探讨气候变化对疾病谱的全面影响;同时,探索气候适应性的生物学机制,以及精确评估气温暴露对健康的影响,尤其是在室内外环境中的差异。同时,研究“气象-气象”和“气象-大气污染物”复合暴露的健康效应;此外,健康集成研究需基于空气与气象的综合监测系统,以构建复合暴露指标体系,分析长短期暴露的健康效应机制,并明确敏感疾病、脆弱地区与人群等特征,为精准预防策略的制定提供科学

支持;最后,以健康效应为导向的空气污染与气候变化协同治理研究为科学决策提供有力支持,包括建立环境政策健康效益预评估机制,识别能源系统低碳转型最优路径,以及针对社区气候韧性的准实验研究等,从而为空气质量的提升和气候变化的应对提供动力和激励。

文献使用方法

在评估空气污染和气候变化对健康影响的研究中,文献选取方法须综合考虑时间范围、地理位置、数据来源、关键词使用以及筛选原则。首先,我们设定的时间范围主要是最近五年的文献,确保信息的时效性和相关性,但对于特定的长期趋势分析,也包括了历史文献。在地区选择上,重点是中国的研究,但在不足以解释的情况下,扩大到全球范围内的研究。数据来源方面,我们整合了来自世界卫生组织(WHO)、中国生态环境部和国内外其他重要数据库的数据。使用的数据库涵盖了Web of Science、PubMed和中国知网,以获取全面的中英文文献。在关键词的选择上,我们采用与空气污染和气候变化相关的专业术语,如“PM_{2.5}”、“臭氧”和“气候变化”,并结合健康相关的词汇,如“死亡率”、“心血管疾病”等,来确保检索结果的针对性和全面性。筛选原则包括主题相关性和研究的代表性。优先选择具有代表性的多城市或全国性研究,以及证据等级更高的研究。对于急性和慢性健康效应,分别侧重于多中心人群研究和队列研究。此外,研究的选取还要关注其对炎症反应和氧化应激等机制的揭示,以及是否涉及到相关的生物学调控路径,如自噬和凋亡。通过以上方法,系统地梳理和整合了国内外的主要数据库,为后续的科学研究和政策制定提供了扎实的基础。

(相关参考文献未逐一列出,详见各章末尾)



空气污染与 人体健康

空气污染是现阶段影响人类健康最主要的环境风险因素之一，每年数以百万计的人口早亡与空气污染暴露有关。空气污染已经引起包括全世界的关注，包括世界卫生组织（WHO）和世界气象组织（WMO）等机构分别针对空气污染和人体健康开展了相关工作，引导全球不同国家按照各自的情况开展基于健康效应的空气污染治理工作。本章从空气污染的暴露现状、时空分布、暴露效应关系，作用机制和易感人群几个方面系统梳理空气污染影响人体健康的科学证据。



当前，人们高度关注的主要大气污染物包括颗粒物 (Particulate matter, PM)、二氧化氮 (Nitrogen dioxide, NO₂)、臭氧 (Ozone, O₃)、二氧化硫 (Sulfur dioxide, SO₂) 和一氧化碳 (Carbon monoxide, CO)。颗粒物主要包括直径小于或等于 10μm (PM₁₀) 和小于或等于 2.5μm (PM_{2.5}) 的两种代表性颗粒。全球有 117 个国家的超过 6000 个城市正在监测空气质量；基于这些监测，世界卫生组织 (WHO) 建立了一个空气质量监测数据库。该数据库是迄今为止覆盖地面最广的空气污染暴露数据库，包含了来

自 120 多个国家 8600 多个人类社区的空气质量监测点位¹。发布的数据显示，全球 99% 的人口呼吸的空气中的污染物超过了 WHO 的空气质量限值，特别是 PM_{2.5} 和 NO₂，这表明存在显著的健康风险。中低收入的发展中国家居民受到的影响更大¹。WHO 在 2021 年修订了空气质量指导值 (Air quality guideline, AQG)，旨在帮助各国更好地评估其空气对健康的影响。我国目前实施的《环境空气质量标准 (GB 3015-2016)》与 WHO 的空气质量指导值还存在一定差距 (表 1-1)。

表 1-1 WHO AQG 和我国的空气质量标准

大气污染物	平均时间	WHO AQG	我国标准	
			一级	二级
PM _{2.5} (μg/m ³)	年平均	5	15	35
	24 小时平均	15	35	75
PM ₁₀ (μg/m ³)	年平均	15	40	70
	24 小时平均	45	50	150
O ₃ (μg/m ³)	季节峰值	60	/	/
	8 小时平均	100	100	160
	1 小时平均	/	160	200
NO ₂ (μg/m ³)	年平均	10	40	40
	24 小时平均	25	80	80
SO ₂ (μg/m ³)	年平均	/	20	60
	24 小时平均	40	50	150
CO (mg/m ³)	24 小时平均	4	4	4

1.1.1 全球范围内空气污染暴露情况

世界卫生组织（WHO）的环境空气质量数据库收集了整个城市（而非单个监测站点）的PM_{2.5}、PM₁₀和NO₂地面测量数据的年均浓度，以此来评估城市的空气质量。据WHO的数据和空气质量指导值显示，高收入国家的PM污染水平较低，只有17%的城市PM_{2.5}或PM₁₀浓度低于WHO的空气质量指导值，但大多数城市依然存在NO₂污染问题。相比之下，在中低收入国家，不到1%的城市空气质量（包括PM和NO₂）达到WHO建议的阈值。在过去十年（2010~2019）中，全球空气污染的减少并不显著。2019年，全球PM_{2.5}的年均浓度为31.17μg/m³（范围在30.06至33.62μg/m³），与2010年相比仅降低了11.65%。在北美和欧洲等发达国家，2019年的PM_{2.5}年均浓度为10.04μg/m³（范围在9.72至10.38μg/m³），接近WHO的指导值。而在东亚和东南亚的发展中国家，年均浓度为31.56μg/m³（范围在30.39至32.5μg/m³），远超WHO的指导值。

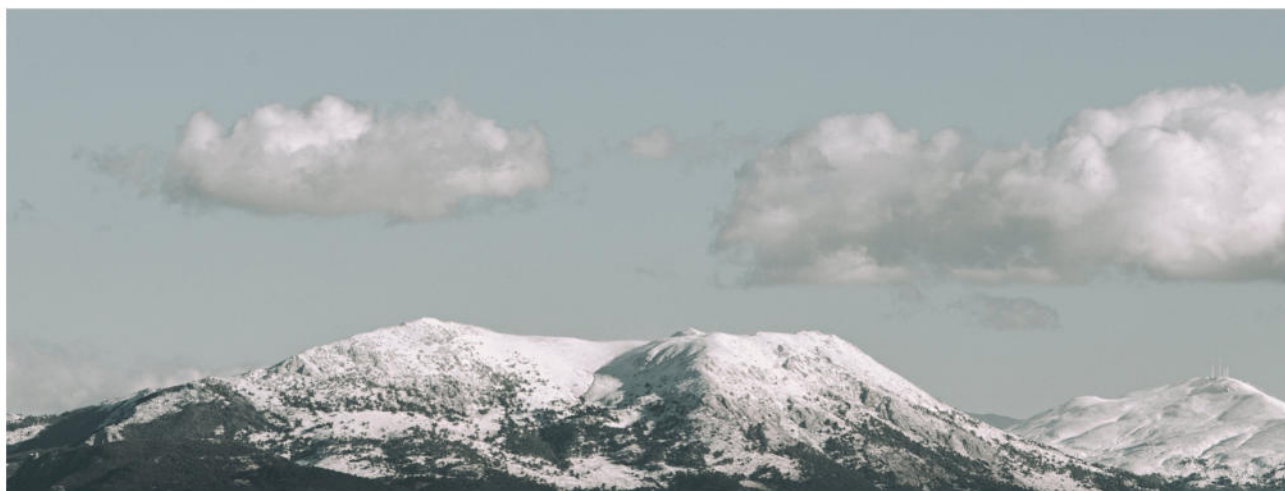
1.1.2 我国空气污染暴露情况

生态环境部最近报告了2023年10月我国空气质量状况²。全国339个地级及以上城市平均空气质量优良天数比例为93.4%，较2019年

同期上升5.3%；平均重度及以上污染天数比例为0.2%，较2019年同期下降0.2%；PM_{2.5}平均浓度为28μg/m³，较2019年同期下降9.7%；O₃平均浓度为124μg/m³，较2019年同期上升0.8%；PM₁₀平均浓度为51μg/m³，同比上升2.0%；SO₂平均浓度为9μg/m³，同比持平；NO₂平均浓度为25μg/m³，同比上升13.6%；CO平均浓度0.8mg/m³，同比持平；全国339个地级及以上城市由沙尘天气导致的平均超标天数比例为0.4%。

2023年1到10月，全国339个地级及以上城市平均空气质量优良天数比例为85.1%，同比下降1.2%，较2019年同期上升2.9个百分点；平均重度及以上污染天数比例为1.6%，同比上升0.8%，较2019年同期下降0.1%。PM_{2.5}平均浓度为28μg/m³，较2019年同期下降17.6%；O₃平均浓度为147μg/m³，较2019年同期下降2.6%；PM₁₀平均浓度为51μg/m³，同比上升6.2%；SO₂平均浓度为8μg/m³，同比持平；NO₂平均浓度为20μg/m³，同比持平；CO平均浓度为1.0mg/m³，同比持平；由沙尘天气导致的平均超标天数比例为3.5%。2023年1~10月我国大气颗粒物和NO₂浓度呈现春东两季高，夏季显著降低的趋势；O₃反之，在夏季达到峰值；而SO₂和CO全年的浓度保持相对稳定（图1-1）。

中国大气成分近实时追踪数据集（Tracking Air Pollution in China, TAP）^{3,4}，由清华大学



联合北京大学、南京大学、复旦大学、中国气象科学研究院等多家单位开发并维护。目前已上线2000年至今的不同空间分辨率的中国大气细颗粒物及主要化学组分浓度数据和2013年至今的中国近地面臭氧浓度数据。2023年1~11月我国PM_{2.5}人口加权平均浓度为29.8μg/m³，O₃平均浓度为112.9μg/m³，其估算值与变化趋势与前述结果基本保持一致，即PM_{2.5}在春季达到浓度峰值（1~3月平均浓度为46.7μg/m³），而O₃在夏季达峰（6~8月平均浓度为127.6μg/m³）。

由此可见，全球空气污染形势依旧严重，特别是中低收入国家的居民承受着更高的大气污染物暴露风险。尽管我国在空气污染治理方面取得了显著成效，空气质量较历史时期有所改善，但仍面临不小的挑战。我国的PM水平高于发达国家和全球平均水平，是主要的大气污染物。近年来，O₃的浓度呈上升趋势，暴露风险也随之增加。此外，我国目前实施的环境空气质量标准与WHO的指导值相比较，未来还需要进一步评估和调整。

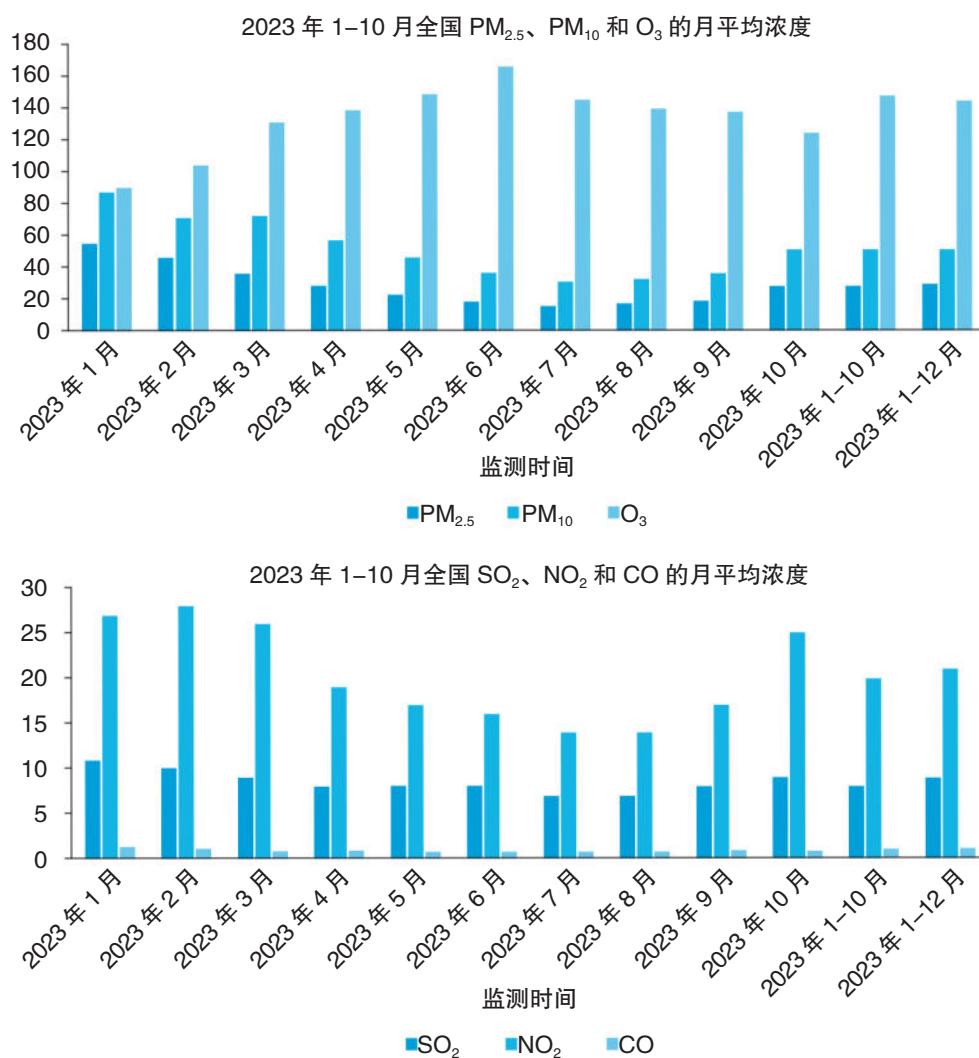


图 1-1 2023年1-10月全国六项空气指标平均浓度变化趋势

1.2

空气污染健康风险的时空分布

空气污染健康风险有比较明显的时空分布特点，在不同时间段、不同地区呈现不同的分布规律。掌握空气污染人群健康风险的时空分布规律，可为空气污染治理提供重要参考依据。

1.2.1 空气污染健康风险的时间分布

时间效应模式：空气污染对人群健康的影响具有两种差异显著的时间效应模式，即急性效应和慢性效应，前者与空气污染短期暴露（时间尺度通常小于1个月）相关⁵⁻¹⁰，后者与空气污染长期暴露（时间尺度通常不少于6个月）相关¹⁰⁻¹⁸。一些研究发现空气污染暴露24小时内即可引起心律失常、急性心肌梗死、急性冠脉综合征等心血管急性事件发生风险增加¹⁹⁻²¹。虽然我国空气质量近年来明显改善，以PM_{2.5}为首要污染物的重污染天数比例明显下降，各城市空气质量达标天数增加，但重污染事件相关的健康风险仍较高。北京的一项研究显示，持续3天及以上的PM_{2.5}极重度污染事件（ $\geq 150\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）可增加人群总体心血管疾病以及心绞痛、心肌梗死、缺血性中风和心力衰竭等心血管疾病亚型的住院风险²²。

长期变化趋势：由于空气污染加剧、人口老年化以及人口不断增长，全球疾病负担研究发现空气污染导致的过早死亡人数明显上升²³。有研究显示，近年来空气污染浓度有所下降，但与SO₂短期暴露相关的健康风险保持相对稳定⁵，但PM₁₀短期暴露与急诊就诊风险在不同时间段存在明显的波动²⁴。国内外基于长时间序列数据的研究探索了大气污染物短期暴露健康风险的长期变化趋势（表1-2），发现健康风险长期变化趋势

不同，原因可能来自污染物浓度、毒性（颗粒物理化性质）、人群暴露模式（室内外活动时间）以及人群易感性的变化。

季节变化：由于空气污染浓度的季节性差异以及人群在不同季节的暴露模式差异，空气污染的健康风险也存在季节性差异。有研究表明，在冷季，PM_{2.5}、CO和NO₂短期暴露引起急性冠脉综合征发病的风险要高于暖季，其原因可能是大气污染物浓度在冷季更高且心血管疾病在冷季的发病风险更高²¹。但也有研究发现PM_{2.5}短期暴露在暖季导致心血管疾病寿命损失年增加的风险要高于冷季²⁵；臭氧长期暴露相关的死亡风险在暖季要高于冷季⁶。

1.2.2 空气污染健康风险的空间分布

地理区域分布：由于不同地区的空气污染水平、理化性质、人群易感性等因素差异，空气污染健康风险也呈现一定的空间分布规律。全球多中心的研究结果显示，与PM_{2.5}、PM₁₀、CO、NO₂和SO₂短期暴露相关的全因死亡风险在西班牙、巴西等国家最高，在英国、葡萄牙等国家较低⁵⁻⁸；而O₃短期暴露相关的全因死亡风险则呈现相反的空间分布特点⁹（图1-2）。我国研究显示，PM_{2.5}短期暴露相关的心血管疾病和呼吸系统疾病的死亡风险在北方更高，慢性阻塞性肺疾病的死亡风险在南方更高²⁶；孕期PM_{2.5}的长期暴露导致新生儿发生先天性心脏病的风险在我国北方更高⁸。国内多项基于全国代表性人群的研究报告了空气污染短期暴露健康风险的地理分布差异（表1-3）。

表 1-2 大气污染物短期暴露健康风险的长期变化趋势

长期变化趋势	健康结局	时间跨度	污染物种类	研究区域	研究
PM _{2.5} 短期暴露水平每升高 10μg/m ³ ，呼吸系统疾病死亡风险在 2006–2009、2010–2013 及 2014–2016 年期间分别增加 0.39% (95% CI: -0.66%, 1.46%)、1.12% (95% CI: 0.05%, 2.20%)、1.91% (95% CI: 0.25%, 3.60%)；PM ₁₀ 短期暴露水平每升高 10μg/m ³ ，呼吸系统疾病死亡风险在 2006–2009、2010–2013 及 2014–2016 年期间分别增加 0.24% (95% CI: -0.47%, 0.96%)、1.01% (95% CI: 0.26%, 1.77%)、1.37% (95% CI: 0.22%, 2.53%)。	心血管疾病死亡 呼吸系统疾病死亡	2006–2016	PM _{2.5} PM _{2.5-10} PM ₁₀	广州	Wu, 2018 ²⁷
NO ₂ 短期暴露与急诊就诊风险之间的关联随着时间的推移保持不变 (P>0.05)，而 PM ₁₀ 短期暴露与急诊就诊风险的关联存在明显的时间变化趋势 (P<0.05)，其关联的效应值在 2008–2011 年期间最小，随后效应值开始波动上升，并在 2012–2015 期间达到最大。	急诊就诊	2008–2019	PM ₁₀ NO ₂	上海	Zhu, 2022 ²⁴
SO ₂ 、NO ₂ 、Ox 等污染物短期暴露与各种疾病死亡风险之间的关联在不同时期保持相对稳定。而总悬浮颗粒物短期暴露引起心血管疾病死亡风险增加的效应呈现随着时间下降的趋势 (P=0.03)。	非意外死亡 心血管疾病死亡 呼吸系统疾病死亡	1977–2015	SO ₂ NO ₂ Ox 总悬浮颗粒物	日本 10 城市	Nishikawa, 2023 ²⁸
PM ₁₀ 短期暴露与全因死亡、心血管疾病死亡、呼吸系统疾病死亡风险的关联均有明显的时间趋势。如 PM ₁₀ 每升高 10μg/m ³ ，全因死亡风险在 2001–2005、2005–2009、2011–2015 年期间分别增加 0.31% (95% CI: 0.15%, 0.46%)、0.61% (95% CI: 0.34%, 0.89%)、-0.06% (95% CI: -0.38%, 0.25%)。	全因死亡 心血管疾病死亡 呼吸系统疾病死亡	2001–2015	PM ₁₀	韩国 首尔	Choi, 2018 ²⁹
PM ₁₀ 短期暴露水平每升高 10μg/m ³ ，在 2006–2008、2009–2011、2012–2014 年期间，因心血管疾病住院的相对风险 (RR) 分别为 1.0050 (95% CI: 0.9965, 1.0135)、1.0086 (95% CI: 1.0000, 1.0174) 和 1.0103 (95% CI: 1.0041, 1.0165) (P 交互 <0.01)。	心血管疾病住院 呼吸系统疾病住院	2006–2014	PM ₁₀	泰国 曼谷	Phosri, 2020 ³⁰

未观察到大气污染物与非意外死亡的关联存在明显的长期变化趋势。PM ₁₀ 短期暴露水平每升高 10μg/m ³ ，在 2001–2005、2006–2010、2011–2014 年期间，非意外死亡风险分别增加 1.16% (95% CI: 0.53%, 1.79%)、0.99% (95% CI: 0.23%, 1.77%) 和 1.87% (95% CI: 1.00%, 2.74%)，而 NO ₂ 短期暴露水平每升高 10μg/m ³ ，其对应的死亡风险分别增加 4.20% (95% CI: 3.15%, 5.25%)、1.78% (95% CI: 0.73%, 2.85%)、3.32% (95% CI: 2.03%, 4.63%)。	非意外死亡	1998–2014	PM _{2.5} PM ₁₀ NO ₂ SO ₂ CO	意大利 罗马	Renzi, 2017 ³¹
未观察到 NO ₂ 、O ₃ 短期暴露与非意外死亡的关联存在明显的长期变化趋势。	非意外死亡	1984–2000	NO ₂ O ₃	加拿大 24 城市	Shin, 2008 ³²
O ₃ 短期暴露与循环系统疾病死亡风险之间的关联在总体上呈现“上升–下降”的长期变化趋势；该关联在 2002–2004 年之前呈略微上升趋势，之后则呈总体下降趋势。	循环系统疾病 死亡	1984–2012	O ₃	加拿大 24 城市	Shin, 2020 ³³
PM _{2.5} 短期暴露水平每增加 10μg/m ³ ，呼吸系统疾病住院增加的风险从 1999 年的 0.75% (95% CI: 0.05%, 1.46%) 下降到 2008 年的 -0.28% (95% CI: -0.79%, 0.23%)，然后在 2016 年上升到 1.44% (95% CI: 0.00%, 2.91%)。未观察到 PM _{2.5} 短期暴露与循环系统疾病住院风险之间的关联存在统计学上显著的长期时间变化趋势。	循环系统疾病 住院 呼吸系统疾病 住院	1999–2016	PM _{2.5}	美国 173 个县	Chen, 2021 ³⁴

地区	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO ₂	SO ₂	O ₃	CO
澳大利亚	1.32	1.42	0.64	0.39	0.18	0.39
加拿大	0.76	1.70	0.62	0.35	0.23	1.71
中国	0.28	0.41	0.57	0.34	0.14	0.32
日本	1.05	1.42	0.36	0.16	0.20	0.63
葡萄牙	0.11	0.03	0.52	0.67	0.11	0.96
韩国	0.42		0.41	0.97	0.14	3.09
西班牙	0.87	1.96	0.70	1.14	0.06	2.17
瑞士	0.47	0.79	0.24	0.80	0.19	0.79
台湾	0.25	0.62	0.52	-0.06	0.10	-0.92
捷克共和国	0.40		0.46	-0.01	0.18	
爱沙尼亚	0.46	0.23	0.40	0.29	0.23	
芬兰	0.07	0.14	0.41	-0.32		1.16
德国			0.62	0.27	0.15	0.75
瑞典	0.20	0.08	0.55		0.20	0.02
泰国	0.61		0.32	1.01		1.35
巴西	1.22		0.34	2.34		
智利	0.33	0.27	0.53			1.26
哥伦比亚	0.03		0.31	0.04		
希腊	0.53	2.54	0.62		0.11	
意大利	0.65				0.18	2.11
罗马尼亚			0.27	0.43		-0.04
英国	0.06		0.17		0.35	
美国	0.79	1.58	0.57		0.16	

图 1-2 大气污染物短期暴露与全因死亡风险关联（变化百分比）的地区差异（数据来源于 MCC 研究）

表 1-3 大气污染物短期暴露健康风险的地理分布差异

健康风险的地理差异	健康结局	浓度 (Mean ± SD)	污染物 种类	研究 区域	研究
PM _{2.5-10} 短期暴露水平每升高 10μg/m ³ ，全因死亡风险在南方（160 城市）、北方（112 城市）人群中分别增加 0.55%（95% CI: 0.35%, 0.75%）、0.05%（95% CI: -0.05%, 0.14%）	全因死亡				
PM _{2.5-10} 短期暴露水平每升高 10μg/m ³ ，心血管疾病死亡风险在南方（160 城市）、北方（112 城市）人群中分别增加 0.55%（95% CI: 0.26%, 0.83%）、0.13%（95% CI: 0.00%, 0.25%）	心血管疾病死亡	39 ± 23 μg/m ³	PM _{2.5-10}	272 城市	Chen, 2019 ³⁵
PM _{2.5-10} 短期暴露水平每升高 10μg/m ³ ，呼吸系统疾病死亡风险在南方（160 城市）、北方（112 城市）人群中分别增加 0.41%（95% CI: 0.09%, 0.73%）、0.17%（95% CI: -0.07%, 0.42%）	呼吸系统疾病死亡				
NO ₂ 短期暴露水平每升高 10μg/m ³ ，全因死亡风险在南方（140 城市）、北方（107 城市）、西北人群（21 城市）中分别增加 1.26%（95%CI: 0.96%, 1.55%）、0.41%（95%CI: 0.10%, 0.72%）、0.54%（95%CI: -1.47%, 2.54%）	全因死亡				
NO ₂ 短期暴露水平每升高 10μg/m ³ ，心血管疾病死亡风险在南方（140 城市）、北方（107 城市）、西北人群（21 城市）中分别增加 1.30%（95%CI: 0.91%, 1.69%）、0.46%（95%CI: 0.06%, 0.85%）、0.71%（95%CI: -1.58%, 3.00%）	心血管疾病死亡	31 ± 11 μg/m ³	NO ₂	143 城市	Chen, 2018 ³⁶
NO ₂ 短期暴露水平每升高 10μg/m ³ ，呼吸系统疾病死亡风险在南方（140 城市）、北方（107 城市）、西北人群（21 城市）中分别增加 1.41%（95%CI: 0.91%, 1.92%）、0.79%（95%CI: 0.19%, 1.40%）、2.26%（95%CI: -2.79%, 7.32%）	呼吸系统疾病死亡				
O ₃ 短期暴露水平每升高 10μg/m ³ ，全因死亡风险在南方（140 城市）、北方（107 城市）、西北（21 城市）、青藏地区人群（4 城市）中分别增加 0.24%（95%CI: 0.09%, 0.39%）、0.28%（95%CI: 0.06%, 0.51%）、-0.24%（95%CI: -1.75%, 1.28%）、0.90%（95%CI: -2.12%, 3.93%）	全因死亡				
O ₃ 短期暴露水平每升高 10μg/m ³ ，心血管疾病死亡风险在南方（140 城市）、北方（107 城市）、西北（21 城市）、青藏地区人群（4 城市）中分别增加 0.31%（95%CI: 0.09%, 0.52%）、0.26%（95%CI: 0.01%, 0.52%）、0.36%（95%CI: -1.70%, 2.42%）、1.47%（95%CI: -0.81%, 3.74%）	心血管疾病死亡	77 ± 14 μg/m ³	O ₃	272 城市	Yin, 2017 ³⁷

<p>O₃ 短期暴露水平每升高 10μg/m³，呼吸系统疾病死亡风险在南方（140 城市）、北方（107 城市）、西北（21 城市）、青藏地区人群（4 城市）中分别增加 0.29%（95%CI: -0.05%，0.63%）、0.03%（95%CI: -0.56%，0.62%）、-0.02%（95%CI: -3.94%，3.91%）、-1.23%（95%CI: -5.14%，2.68%）</p>	<p>呼吸系统 疾病死亡</p>	<p>1.2 ± 0.38 mg/m³</p>	<p>CO</p>	<p>272 城市</p>	<p>Liu, 2018³⁸</p>
<p>CO 短期暴露水平每升高 1mg/m³，心血管疾病死亡风险在南方（140 城市）、北方（107 城市）、西北（21 城市）、青藏地区人群（4 城市）中分别增加 1.25%（95% CI: 0.06%，2.44%）、1.05%（95% CI: 0.06%，2.44%）、1.73%（95% CI: -2.25%，5.71%）、-4.02%（95% CI: -11.39%，3.35%）</p>	<p>心血管疾 病死亡</p>	<p>1.2 ± 0.38 mg/m³</p>	<p>CO</p>	<p>272 城市</p>	<p>Liu, 2018³⁸</p>
<p>PM_{2.5} 短期暴露水平每升高一个四分位间距（Interquartile Range, IQR）（36.0μg/m³），急性冠脉综合征风险在南方、北方、西北、青藏地区人群中分别增加 1.78%（95% CI: 1.27%，2.29%）、1.51%（95% CI: 1.16%，1.86%）、0.23%（95% CI: -0.64%，1.10%）、-3.87%（95% CI: -13.64%，7.00%）</p>	<p>急性冠脉 综合征 发作</p>	<p>44.3 ± 45.5 μg/m³</p>	<p>PM_{2.5}</p>	<p>318 城市</p>	<p>Chen, 2022²¹</p>
<p>NO₂ 短期暴露水平每升高一个 IQR（29.0μg/m³），急性冠脉综合征风险在南方、北方、西北、青藏地区人群中分别增加 3.23%（95% CI: 2.54%，3.92%）、4.76%（95% CI: 4.06%，5.47%）、1.77%（95% CI: -0.90%，4.50%）、-0.64%（95% CI: -15.19%，16.41%）</p>	<p>急性冠脉 综合征 发作</p>	<p>33.7 ± 24.6 μg/m³</p>	<p>NO₂</p>	<p>318 城市</p>	<p>Chen, 2022²¹</p>
<p>SO₂ 短期暴露水平每升高一个 IQR（9.0μg/m³），急性冠脉综合征风险在南方、北方、西北、青藏地区人群中分别增加 0.78%（95% CI: 0.38%，1.18%）、1.02%（95% CI: 0.70%，1.35%）、0.05%（95% CI: -0.65%，0.75%）、-5.01%（95% CI: -10.44%，0.76%）</p>	<p>急性冠脉 综合征 发作</p>	<p>14.0 ± 19.8 μg/m³</p>	<p>SO₂</p>	<p>318 城市</p>	<p>Chen, 2022²¹</p>
<p>CO 短期暴露水平每升高一个 IQR（0.6mg/m³），急性冠脉综合征风险在南方、北方、西北、青藏地区人群中分别增加 1.33%（95% CI: 0.81%，1.86%）、1.79%（95% CI: 1.35%，2.23%）、0.15%（95% CI: -1.28%，1.61%）、0.16%（95% CI: -7.82%，8.84%）</p>	<p>急性冠脉 综合征 发作</p>	<p>0.9 ± 0.7 mg/m³</p>	<p>CO</p>	<p>318 城市</p>	<p>Chen, 2022²¹</p>



城乡或不同社会经济发展水平区域差异：

有研究显示美国少数族裔以及低收入人群大气污染物的暴露水平要高于白种人群和高收入人群³⁹，同时该人群面临的空气污染健康风险也更高，这可能与其居住环境以及医疗卫生服务的可及性相对较差有关^{16,40,41}。我国研究显示社会经济因素（教育、职业、家庭人均收入等）相对较好、城市地区以及汉族人群对空气PM_{2.5}、NO₂等污染物的暴露水平更高⁴²，相应的健康风险更高^{10,11,43-45}；但也有研究显示，农村人群空气PM_{2.5}长期暴露相关的心血管疾病发病风险要高于城市人群⁹。

室内、外空气污染健康风险差异：人们大多数时间是在室内度过的，室内空气污染造成了严重的疾病负担。然而，随着清洁能源如电和天然气的普及，室内空气污染导致的健康问题已明显下降^{46,47}。尽管如此，目前关于室内外空气污染对健康风险差异的直接比较研究还相对缺乏，这需要未来的研究去进一步探究。

本节简要介绍了空气污染与健康风险的时空分布，包括时间效应模式、长期趋势、季节性变化、不同地理区域、城乡及社会经济发展水平差异以及室内外环境的差别等方面。未来，应根据空气污染健康风险的这些特点，制定并实施有针对性的防控措施，以减少空气污染对健康的影响。

1.3

空气污染与健康效应的暴露反应关系

空气污染与健康效应的暴露反应关系可量化单一大气污染物单位浓度变化相关的特定健康效应终点的变化幅度，主要基于人群流行病学研究获得，是空气污染健康风险评估的重要基础参数。本节关注室外大气污染物 $PM_{2.5}$ 、 O_3 和 NO_2 的短期和长期暴露与疾病死亡或发病结局之间的暴露反应关系，且主要纳入基于我国人群研究获得的证据，当我国研究证据不充分时则考虑全球研究证据。

1.3.1 我国空气污染的短期健康危害

通常，空气污染的短期健康效应指的是人们

在短时间内(从几小时到几周)接触大气污染物后，可能导致疾病发生或加速、症状恶化，甚至引发死亡的现象。在中国，已有广泛研究探讨空气污染短期暴露与居民死亡率之间的关系。早期的研究大多集中在单个城市，但基于多中心的研究由于样本量大、代表性强、统一的分析方法和较少的发表偏倚，被认为更可靠。中国最大规模的多城市时间序列研究表明， $PM_{2.5}$ 、 O_3 和 NO_2 短期暴露浓度每增加 $10\mu g/m^3$ ，全因死亡风险分别增加 0.22%、0.24% 和 0.90%^{36,37,48}；此外，这些研究还发现这些污染物对心肺系统疾病死亡率的不利影响。除了死亡率，中国的多中心研究还发现空气污染对疾病发病率的不利影响。例如，研



究发现 PM_{2.5} 暴露浓度每增加 10μg/m³，多种心脑血管疾病的入院率增加 0.19%–0.31%⁴⁹；还有研究报告了空气污染短期暴露与呼吸系统疾病死亡风险之间的显著关联（表 1-4）^{50–52}。暴露–反应曲线拟合的结果与国际研究类似，我国研究发现短期 PM_{2.5} 暴露与死亡风险的关系在低浓度段呈现线性，随着 PM_{2.5} 污染水平升高，两者关联的斜率变小；而 NO₂ 与死亡风险的关系接近于线性^{36,48}。

1.3.2 我国空气污染的长期健康危害

空气污染长期暴露（从数月致数十年）可能引起疾病发病和加剧，甚至导致死亡。据估算，2019 年全球因空气污染暴露导致 667 万的过早死亡，在导致过早死亡的众多因素中排在第四位，也是首要的环境风险因素⁵³。其中，PM_{2.5} 是对健康危害最大的大气污染物，使得全球人口平均预期寿命降低近 1 年，大气 O₃ 暴露使得全球人口平均预期寿命降低 0.07 年^{54, 55}。队列研究提供的暴露反应关系是证明空气污染与健康结局之间因果关联的关键证据，也是健康风险评估的核心参数之一。近年来，基于我国人群的前瞻性队列研究逐渐增多，但主要集中在 PM_{2.5} 的研究上。基于我国男性队列、China–PAR 队列和 CLHLS 跟踪调查的研究发现 PM_{2.5} 每增加 10μg/m³，全因死亡率增加 8–11%（表 1-5）^{15,56–58}。但是不同研究中 PM_{2.5} 与总死亡风险的暴露–反应曲线特征存在差异。例如，男性队列和 China–PAR 队列显示在 PM_{2.5} 浓度较高时斜率更陡，而基于 CLHLS 的研究观察到这一关系在较低 PM_{2.5} 浓度时更陡。此外，针对分疾病别死亡风险的研究发现，PM_{2.5} 浓度每增加 10μg/m³，心血管疾病死亡、慢阻肺死亡、肺癌死亡的危险比分别为 1.09–1.16、1.12 和 1.12^{15,57,58}。

除死亡结局外，队列研究还发现了 PM_{2.5} 对特定疾病发病风险的影响，但各研究间的疾病种类和暴露反应系数存在较大差异。例如，国家癌症登记中心的研究发现，PM_{2.5} 两年平均浓度每增加 10μg/m³，男性肺癌和女性肺癌发病的相对风险为 1.06 和 1.15⁵⁹。CKB 队列的研究发现 PM_{2.5} 暴露水平每增加 10μg/m³ 心血管疾病发病风险增加 4%⁶⁰。China–PAR 队列的研究则显示 PM_{2.5} 暴露水平每增加 10μg/m³ 与心血管疾病（HR: 1.25）、冠心病（HR: 1.43）、卒中（HR: 1.13）、糖尿病（HR: 1.16）和高血压（HR: 1.11）发病风险增加有关（表 1-6）^{13,15,61–64}。

对于气态污染物，基于中国人群的队列研究较少。一项基于中国慢性疾病危险因素调查的队列研究发现，暖季臭氧每升高 10μg/m³，心血管疾病死亡风险增加 9%，缺血性心脏病死亡风险增加 18%，中风死亡风险增加 6%，且暴露反应关系近似线性¹⁰。另一项基于全球多个队列的荟萃分析报告称，NO₂ 浓度每上升 10μg/m³，总死亡风险升高为 2%，呼吸系统疾病死亡风险升高 3%⁶⁵。

因此，在过去十年中，基于我国人群的研究逐渐增多，关注空气污染短期和长期暴露对健康的影响。这些研究包括一系列高质量的多中心研究和队列研究，报道了颗粒物、O₃ 和 NO₂ 污染对居民总死亡（或发病）和分疾病别死亡（或发病）风险的不良影响。这些研究主要关注心肺系统疾病和代谢相关疾病，为高污染环境下空气污染与健康效应之间的暴露反应关系提供了证据。在中国队列研究中，关注的污染物主要为颗粒物，而气态污染物长期暴露对人群健康影响的研究相对较少。不同研究得到的暴露反应关系系数差异可能与研究纳入的研究对象数量、生物学因素水平、污染物污染特征和分析方法等因素相关。

表 1-4 基于我国多中心研究报道的空气污染短期暴露的急性健康危害

效应值	健康结局	浓度 (Mean \pm SD, $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	污染物种类	研究区域	研究
PM _{2.5} 每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 全因死亡风险增加 0.22% (95% PI: 0.15%, 0.28%), 心血管疾病死亡风险增加 0.27% (95% PI: 0.18%, 0.36%), 呼吸系统疾病死亡风险增加 0.29% (95% PI: 0.17%, 0.42%)	死亡	56 \pm 20	PM _{2.5}	我国 272 个城市	Chen, 2017 ⁴⁸
O ₃ 每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 每日总死亡风险增加 0.24% (95% PI: 0.13%, 0.35%), 心血管系统疾病死亡风险增加 0.27% (95% PI: 0.10%, 0.44%), 呼吸系统疾病死亡风险增加 0.18% (95% PI: -0.11%, 0.47%)	死亡	77 \pm 14	O ₃	我国 272 个城市	Yin, 2017 ³⁷
NO ₂ 每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 全死因死亡风险增加 0.9% (95% PI: 0.7%, 1.1%), 总心血管系统疾病死亡风险增加 0.9% (95% PI: 0.7%, 1.2%), 总呼吸系统疾病死亡风险增加 1.2% (95% PI: 0.9%, 1.5%)	死亡	31 \pm 11	NO ₂	我国 272 个城市	Chen, 2018 ³⁶
PM _{2.5} 每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 心脑血管疾病的入院率增加 0.26% (95% PI: 0.17%, 0.35%)	发病	50 \pm 34	PM _{2.5}	我国 184 个城市	Tian, 2019 ⁴⁹
PM _{2.5-10} 浓度每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 因呼吸系统疾病住院的人数增加 1.52% (95% CI: 1.00%, 2.05%)	发病	28.7 \pm 18.3	PM _{2.5-10}	四川省 21 个市	Qiu, 2020 ⁵¹
PM _{2.5} 浓度每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 总呼吸系统疾病的每日入院风险增加 0.29% (95% PI: 0.23%, 0.34%)	发病	Mean: 50.6	PM _{2.5}	我国 252 个城市	Gu, 2020 ⁵⁰
O ₃ 浓度每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 总呼吸系统疾病的每日入院风险增加 0.18% (95% PI: 0.11%, 0.25%)	发病	Mean: 87.2	O ₃		
臭氧浓度每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 肺炎入院率增加 0.14% (95% CI: 0.03%, 0.25%)	发病	89 \pm 13	O ₃	我国 184 个城市	Tian, 2020 ⁵²

表 1-5 基于我国队列研究报道的空气污染长期暴露对居民死亡的影响

效应	健康结局	浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	污染物 种类	样本量	研究区域	研究
PM _{2.5} 每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 非意外死亡风险 HR 为 1.09 (95%CI: 1.08, 1.09); 心血管系统疾病死亡风险 HR 为 1.09 (95%CI:1.08,1.10); 慢阻肺死亡风险 HR 为 1.12 (95% CI:1.10,1.13); 肺癌死亡风 HR 为 1.12 (95%CI:1.07,1.14)	死亡	Median: 38.9 Range: 4.23 ~ 83.8	PM _{2.5}	189,793	45 个地区	Yin, 2017 ⁵⁸
PM _{2.5} 每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 非意外死亡率 HR 为 1.11 (95% CI: 1.08, 1.14); 心脏代谢性疾病死亡风险 HR 为 1.22 (95% CI: 1.16, 1.27)	死亡	Mean \pm SD: 64.9 \pm 14.2	PM _{2.5}	116,821	15 个省	Yang, 2020 ⁵⁷
PM _{2.5} 每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 心血管系统疾病发病风险 HR 为 1.25 (95% CI: 1.22, 1.28); 心血管系统疾病死亡风险 HR 为 1.16 (95% CI: 1.12, 1.21)	发病 / 死亡	Mean \pm SD: 67.4 \pm 15.1	PM _{2.5}	116,972	15 个省	Liang, 2020 ¹⁵
PM _{2.5} 每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 全因死亡的风险 HR 为 1.08 (95% CI: 1.06, 1.09)	死亡	Median: 50.7 Range: 6.7 ~ 113.3	PM _{2.5}	13,344	22 个省	Li, 2018 ⁵⁶

表 1-6 基于我国队列研究报道的空气污染长期暴露对居民发病的影响

效应值	结局	浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	污染物	样本量	研究区域	研究
PM _{2.5} 每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 男性肺癌发病的相对风险为 1.06 (95% CI: 1.038, 1.072), 女性肺癌发病的相对风险为 1.15 (95% CI: 1.120, 1.178)	发病	未报告	PM _{2.5}	368, 762	75 个全国 肿瘤登记 社区	Guo, 2016 ⁵⁹
PM _{2.5} 每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 心血管疾病发病风险增加: HRs=1.04 (95% CI: 1.02, 1.07)	发病	Mean \pm SD: 52.3 \pm 10.6	PM _{2.5}	512, 689	10 个地区	Liu, 2022 ⁶⁰
PM _{2.5} 每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 冠心病发病风险增加, HRs=1.43 (95% CI: 1.35, 1.51)	发病	Mean: 64.96 Range: 31.17 ~ 96.96	PM _{2.5}	118, 229	15 个省	Li, 2020 ⁶²
PM _{2.5} 每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 卒中发病风险增加, HR=1.13 (95% CI: 1.09, 1.17)	发病	Mean \pm SD: 64.9 \pm 14.2	PM _{2.5}	117, 575	15 个省	Huang, 2019 ¹³
PM _{2.5} 每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 糖尿病发病率的多变量调整百分比增加估计为 15.66% (95% CI: 6.42%, 25.70%)	发病	Mean \pm SD: 79.1 \pm 13.8	PM _{2.5}	88, 397	15 个省	Liang, 2019 ⁶³
PM _{2.5} 每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 高血压发病风险增加, HR=1.11 (95% CI: 1.05, 1.17)	发病	Mean \pm SD: 77.7 \pm 13.2	PM _{2.5}	59, 456	15 个省	Huang, 2019 ⁶¹
PM _{2.5} 每升高 1 个 IQR (IQR=27.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 总心血管疾病的 HR 为 1.291 (95% CI: 1.147, 1.454), 高血压的 HR 为 1.326 (95% CI: 1.151, 1.528)	发病	Mean \pm SD: 47.6 \pm 19.4	PM _{2.5}	14, 331	25 个省	Liu, 2021 ⁶⁴

1.4

空气污染导致健康损伤的毒理机制

大气污染物如 $PM_{2.5}$ 和 O_3 进入人体后，通过呼吸系统进入血液循环，与不同器官接触，引发多种健康问题。这些问题主要包括内皮功能损伤、脂质代谢紊乱、免疫功能失调，甚至细胞凋亡和自噬，最终导致各类疾病（图 1-3）。

炎症反应和氧化应激是目前已知的两个主要的健康影响机制。污染物的暴露会导致血液中 C 反应蛋白、IL-6、TNF- α 等炎性物质水平升高，引起全身性炎症。同时，污染物还能诱导氧化应激，产生的活性氧（ROS）与生物大分子（如脂质、蛋白质、DNA）反应，破坏其结构和功能，引发心肺系统和全身性功能障碍。这两者之间的相互作用和顺序目前尚不清楚。一方面，大气污染物可能先诱导炎症介质或血管活性分子的释放，损伤身体；另一方面，可能先引发氧化应激，进而激活炎症性转录因子（如 NF- κ B 和 AP-1），引起炎症基因的表达。

在氧化应激过程中，ROS 的产生可能导致表观遗传改变。低水平 ROS 可作为第二信使，调节基因表达；高水平则直接损伤细胞，引起 DNA 结

构改变，甚至基因突变。目前的研究主要关注氧化应激对表观遗传修饰的影响，特别是 DNA 甲基化的改变。研究表明大气污染物诱导的 DNA 去甲基化修饰过程，可能涉及 DNMT1 介导的被动去甲基化和 TET1/TET2 介导的主动去甲基化。这种 DNA 甲基化水平的改变与癌症、衰老、老年痴呆等多种疾病密切相关。另外，RNA 甲基化也是一种重要的表观遗传调控方式，大气污染物暴露可能导致肺脏 RNA 高甲基化，与多种癌症发病相关。

总体来说，炎症反应和氧化应激是目前公认的空气污染导致不良健康效应的主要机制，位于调控机制的顶层。在此基础上，还有许多更细致和精准的调控路径，如细胞自噬和凋亡、DNA 甲基化水平变化、脂质代谢紊乱和铁、铜稳态失衡，甚至大气污染物还可能通过影响肠道菌群分布和多样性，进而影响胆固醇代谢和炎症反应，导致免疫和新陈代谢异常。厘清暴露过程的潜在生物标志物及调控过程和方式，将会为明确疾病预防靶点、空气污染健康基准/标准的制/修订提供理论依据。

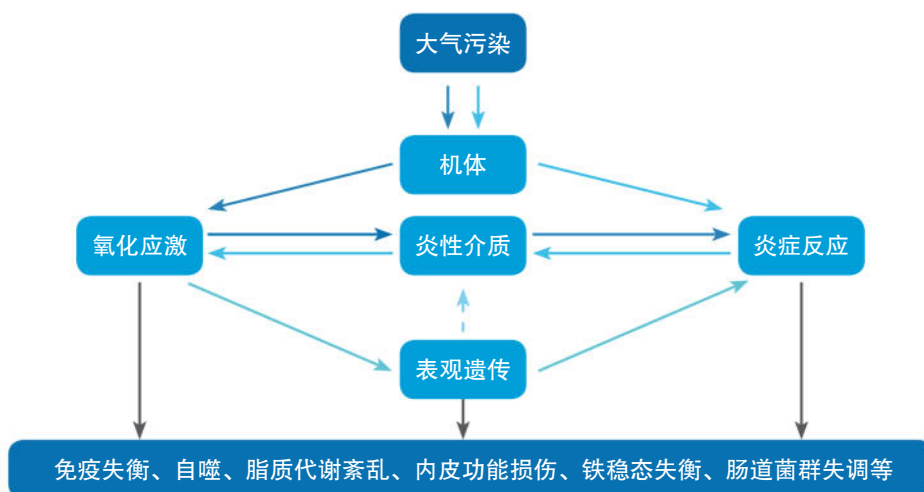


图 1-3 空气污染导致健康损伤的毒理机制示意图

影响个体对空气污染健康效应敏感性的因素主要分为社会因素（如居住地区、收入、教育水平等）和生物学因素（如年龄、性别、健康状况等）。在中国，空气污染水平在不同地区差异较大，尤其是中东部地区的PM_{2.5}浓度较高，加之人口密集，导致当地居民的疾病负担较为显著。2015至2019年，中东部地区由PM_{2.5}长期暴露导致的疾病负担占该地区总疾病负担的18.5–24.2%，超过全国平均水平17%⁶⁹。NO₂和O₃等其他污染物也表现出类似的地区差异^{70,71}。

研究显示，老年人、妇女、儿童、心肺疾病患者、低收入和教育程度较低的人群对空气污染的短期（日尺度）和长期（年尺度）健康影响更为敏感（图1-4），特别是老年人，由于更高的慢性病

风险和较弱的免疫力，对PM_{2.5}的敏感性尤为明显。一项涵盖272个中国城市的研究发现，PM_{2.5}短期暴露与全因、心血管及呼吸系统死亡风险显著相关，老年人、妇女、教育程度较低者更易受影响⁶⁹。此外，PM_{2.5}短期暴露与心血管、呼吸系统、代谢系统疾病的住院率升高显著相关，表明患有相关疾病的人群对空气污染更敏感^{70,71}，值得注意的是，儿童（尤其是新生儿）对PM_{2.5}短期暴露引发的死亡风险显著高于成人⁷²。提示对空气污染健康效应的干预应当覆盖人的全生命周期。除PM_{2.5}外，其他污染物如NO₂、O₃等短期暴露亦会显著影响老年人、女性等易感人群健康^{73,74}。

针对空气污染长期暴露的影响，一项涵盖



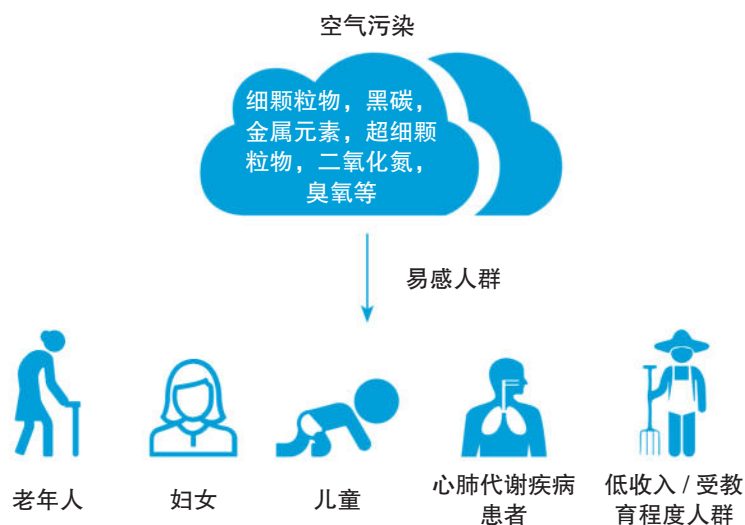


图 1-4 空气污染健康效应的易感人群

11.7 万人的全国队列研究发现，老年人、农村居民、高血压患者对 $PM_{2.5}$ 长期暴露相关的心血管疾病死亡风险更敏感^{75,76}。该研究还揭示了 $PM_{2.5}$ 长期暴露与心脑血管疾病、糖尿病等发病显著相关，老年人、农村居民、女性风险尤为显著^{77,78}。此外，老年人对 O_3 长期暴露引发的心血管疾病死亡风险也更敏感⁷⁹。 $PM_{2.5}$ 中的黑碳、金属元素、有机物等组分可能是影响敏感人群健康的重要因素⁸⁰。

测量亚临床指标和生物标志物有助于解释人群敏感性的生物学机制。多项研究发现，空气污染可能通过氧化应激、炎症反应、内皮和凝血功能、糖脂代谢、表观遗传等机制影响易感人群的健康。例如， $PM_{2.5}$ 短期暴露与儿童呼吸系统的炎症及氧化应激升高显著相关^{81,82}；长期暴露与青少年高血压和肥胖风险增大相关，年幼者更易受

影响^{83,84}。此外， $PM_{2.5}$ 长期暴露与老年人和教育程度较低者的血糖、胆固醇升高有关^{85,86}。对于患慢性疾病的人群，糖尿病前期、慢阻肺、高血压患者可能对 $PM_{2.5}$ 、 NO_2 、黑碳、超细颗粒物短期暴露相关的炎症反应、血管功能损伤、激素失调等效应更敏感⁸⁷⁻⁹⁰。

多组学技术的应用为揭示人群易感性机制提供了新的证据。例如，转录组学和代谢组学研究发现，缺氧诱导因子和泛醌代谢通路、氧化脂代谢通路可能是超细颗粒物引发慢阻肺患者血糖升高和血栓形成的介导因素^{91,92}。

综合来看，老年人、儿童、妇女、低收入和教育程度较低的人群以及慢性心血管代谢疾病患者对空气污染更敏感。其中，氧化应激、炎症反应、血管功能和代谢失调、表观遗传改变等机制在这种易感性中起着重要作用。

参考文献

- 1 WHO. WHO Ambient Air Quality Database (update 2023). Version 6.0. Geneva, World Health Organization, 2023.
- 2 生态环境部通报 10 月和 1—10 月全国环境空气质量状况 .https://www.mee.gov.cn/ywdt/xwfb/202311/t20231120_1056839.shtml
- 3 中国大气成分近实时追踪数据集 (Tracking Air Pollution in China, TAP) . http://tapdata.org.cn/?page_id=88
- 4 Geng, G. et al. Tracking Air Pollution in China: Near Real-Time PM_{2.5} Retrievals from Multisource Data Fusion. *Environmental Science & Technology* 55, 12106–12115 (2021).
- 5 O'Brien, E. et al. Short-Term Association between Sulfur Dioxide and Mortality: A Multicountry Analysis in 399 Cities. *Environ Health Perspect* 131, 37002 (2023).
- 6 Liu, C. et al. Ambient Particulate Air Pollution and Daily Mortality in 652 Cities. *N Engl J Med* 381, 705–715 (2019).
- 7 Chen, K. et al. Ambient carbon monoxide and daily mortality: a global time-series study in 337 cities. *Lancet Planet Health* 5, e191–e199 (2021).
- 8 Meng, X. et al. Short-term associations of ambient nitrogen dioxide with daily total, cardiovascular, and respiratory mortality: multilocation analysis in 398 cities. *Bmj* 372, n534 (2021).
- 9 Vicedo-Cabrera, A. M. et al. Short-term association between ozone and mortality: global two stage time series study in 406 locations in 20 countries. *Bmj* 368, m108 (2020).
- 10 Niu, Y. et al. Long-term exposure to ozone and cardiovascular mortality in China: a nationwide cohort study. *Lancet Planet Health* 6, e496–e503 (2022).
- 11 Li, G. et al. Long-Term Exposure to Ambient PM_{2.5} and Increased Risk of CKD Prevalence in China. *J Am Soc Nephrol* 32, 448–458 (2021).
- 12 Zhang, Y. et al. Ambient PM_{2.5}, ozone and mortality in Chinese older adults: A nationwide cohort analysis (2005–2018). *J Hazard Mater* 454, 131539 (2023).
- 13 Huang, K. et al. Long-term exposure to ambient fine particulate matter and incidence of stroke: prospective cohort study from the China-PAR project. *Bmj* 367, l6720 (2019).
- 14 Yuan, X. et al. Maternal Exposure to PM_{2.5} and the Risk of Congenital Heart Defects in 1.4 Million Births: A Nationwide Surveillance-Based Study. *Circulation* 147, 565–574 (2023).
- 15 Liang, F. et al. Long-Term Exposure to Fine Particulate Matter and Cardiovascular Disease in China. *J Am Coll Cardiol* 75, 707–717 (2020).
- 16 Yazdi, M. D. et al. Long-term effect of exposure to lower concentrations of air pollution on mortality among US Medicare participants and vulnerable subgroups: a doubly-robust approach. *Lancet Planet Health* 5, e689–e697 (2021).
- 17 Zhang, L. W. et al. Long-term exposure to high particulate matter pollution and cardiovascular mortality: a 12-year cohort study in four cities in northern China. *Environ Int* 62, 41–47 (2014).
- 18 Qiu, X. et al. Association of Long-term Exposure to Air Pollution with Late-Life Depression in Older Adults in the US. *JAMA Netw Open* 6, e2253668 (2023).

- 19 Xue, X. et al. Hourly air pollution exposure and the onset of symptomatic arrhythmia: an individual–level case–crossover study in 322 Chinese cities. *Cmaj* 195, E601–e611 (2023).
- 20 Jiang, Y. et al. Hourly Ultrafine Particle Exposure and Acute Myocardial Infarction Onset: An Individual–Level Case–Crossover Study in Shanghai, China, 2015–2020. *Environ Sci Technol* 57, 1701–1711 (2023).
- 21 Chen, R. et al. Hourly Air Pollutants and Acute Coronary Syndrome Onset in 1.29 Million Patients. *Circulation* 145, 1749–1760 (2022).
- 22 Zhang, Y. et al. Risk of Cardiovascular Hospital Admission After Exposure to Fine Particulate Pollution. *J Am Coll Cardiol* 78, 1015–1024 (2021).
- 23 Fuller, R. et al. Pollution and health: a progress update. *Lancet Planet Health* 6, e535–e547 (2022).
- 24 Zhu, Y. et al. Temporal variations of short–term associations between PM₁₀ and NO₂ concentrations and emergency department visits in Shanghai, China 2008–2019. *Ecotoxicol Environ Saf* 229, 113087 (2022).
- 25 Li, J., Zhang, X., Yin, P., Wang, L. & Zhou, M. Ambient fine particulate matter pollution and years of life lost from cardiovascular diseases in 48 large Chinese cities: Association, effect modification, and additional life gain. *Sci Total Environ* 735, 139413 (2020).
- 26 Dong, Z. et al. Time–weighted average of fine particulate matter exposure and cause–specific mortality in China: a nationwide analysis. *Lancet Planet Health* 4, e343–e351 (2020). [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(20\)30164-9](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(20)30164-9)
- 27 Wu, R. et al. Temporal variations in ambient particulate matter reduction associated short–term mortality risks in Guangzhou, China: A time–series analysis (2006–2016). *Sci Total Environ* 645, 491–498 (2018).
- 28 Nishikawa, H. et al. Long–term trends in mortality risk associated with short–term exposure to air pollution in 10 Japanese cities between 1977 and 2015. *Environ Res* 219, 115108 (2023).
- 29 Choi, Y., Kim, H. & Lee, J. T. Temporal variability of short–term effects of PM₁₀ on mortality in Seoul, Korea. *Sci Total Environ* 644, 122–128 (2018).
- 30 Phosri, A., Sihabut, T. & Jaikanlaya, C. Temporal variations of short–term effects of particulate matter on hospital admissions in the most densely populated city in Thailand. *Sci Total Environ* 742, 140651 (2020).
- 31 Renzi, M. et al. Analysis of Temporal Variability in the Short–term Effects of Ambient Air Pollutants on Nonaccidental Mortality in Rome, Italy (1998–2014). *Environ Health Perspect* 125, 067019 (2017).
- 32 Shin, H. H. et al. A temporal, multicity model to estimate the effects of short–term exposure to ambient air pollution on health. *Environ Health Perspect* 116, 1147–1153 (2008).
- 33 Shin, H. H., Parajuli, R. P., Maquiling, A. & Smith–Doiron, M. Temporal trends in associations between ozone and circulatory mortality in age and sex in Canada during 1984–2012. *Sci Total Environ* 724, 137944 (2020).
- 34 Chen, C. et al. Temporal variation in association between short–term exposure to fine particulate matter and hospitalisations in older adults in the USA: a long–term time–series analysis of the US Medicare dataset. *Lancet Planet Health* 5, e534–e541 (2021). [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(21\)00168-6](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(21)00168-6)
- 35 Chen, R. et al. Associations between Coarse Particulate Matter Air Pollution and Cause–Specific Mortality: A Nationwide Analysis in 272 Chinese Cities. *Environ Health Perspect* 127, 17008 (2019).
- 36 Chen, R. et al. Associations Between Ambient Nitrogen Dioxide and Daily Cause–specific

- Mortality: Evidence from 272 Chinese Cities. *Epidemiology* 29, 482–489 (2018).
- 37 Yin, P. et al. Ambient Ozone Pollution and Daily Mortality: A Nationwide Study in 272 Chinese Cities. *Environ Health Perspect* 125, 117006 (2017).
- 38 Liu, C. et al. Ambient carbon monoxide and cardiovascular mortality: a nationwide time–series analysis in 272 cities in China. *Lancet Planet Health* 2, e12–e18 (2018).
- 39 Jbaily, A. et al. Air pollution exposure disparities across US population and income groups. *Nature* 601, 228–233 (2022).
- 40 Josey, K. P. et al. Air Pollution and Mortality at the Intersection of Race and Social Class. *N Engl J Med* 388, 1396–1404 (2023).
- 41 Liu, J. et al. Disparities in Air Pollution Exposure in the United States by Race/Ethnicity and Income, 1990–2010. *Environ Health Perspect* 129, 127005 (2021).
- 42 Wang, Y., Wang, Y., Xu, H., Zhao, Y. & Marshall, J. D. Ambient Air Pollution and Socioeconomic Status in China. *Environ Health Perspect* 130, 67001 (2022).
- 43 Yang, C. et al. Ambient ozone pollution and prevalence of chronic kidney disease: A nationwide study based on the China National survey of chronic kidney disease. *Chemosphere* 306, 135603 (2022).
- 44 He, Y. et al. Composition of fine particulate matter and risk of preterm birth: A nationwide birth cohort study in 336 Chinese cities. *J Hazard Mater* 425, 127645 (2022).
- 45 Guo, H., Chang, Z., Wu, J. & Li, W. Air pollution and lung cancer incidence in China: Who are faced with a greater effect? *Environ Int* 132, 105077 (2019).
- 46 Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *Lancet* 396, 1223–1249 (2020).
- 47 Zhao, B. et al. Change in household fuels dominates the decrease in PM_{2.5} exposure and premature mortality in China in 2005–2015. *Proc Natl Acad Sci U S A* 115, 12401–12406 (2018).
- 48 Chen, R. et al. Fine Particulate Air Pollution and Daily Mortality. A Nationwide Analysis in 272 Chinese Cities. *Am J Respir Crit Care Med* 196, 73–81 (2017).
- 49 Tian, Y. et al. Association between ambient fine particulate pollution and hospital admissions for cause specific cardiovascular disease: time series study in 184 major Chinese cities. *Bmj* 367, l6572 (2019).
- 50 Gu, J. et al. Ambient air pollution and cause–specific risk of hospital admission in China: A nationwide time–series study. *PLoS Med* 17, e1003188 (2020).
- 51 Qiu, H., Wang, L., Zhou, L. & Pan, J. Coarse particles (PM_{2.5–10}) and cause–specific hospitalizations in southwestern China: Association, attributable risk and economic costs. *Environ Res* 190, 110004 (2020).
- 52 Tian, Y. et al. The impact of ambient ozone pollution on pneumonia: A nationwide time–series analysis. *Environ Int* 136, 105498 (2020).
- 53 Health Effects Institute. 2020. State of Global Air 2020. Special Report. Boston, MA: Health Effects Institute.
- 54 Health Effects Institute. 2022. How Does Air Pollution Affect Life Expectancy Around the World? A State of Global Air Special Report. Boston, MA: Health Effects Institute.
- 55 GBD 2019 Risk Factors Collaborators. 2020. Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *Lancet* 396:1223–1249; doi.org/10.1016/S0140–6736(20)30752–2.
- 56 Li, T. et al. All–cause mortality risk associated with long–term exposure to ambient PM_{2.5} in

- China: a cohort study. *Lancet Public Health* 3, e470–e477 (2018).
- 57 Yang, X. et al. Associations of long-term exposure to ambient PM_{2.5} with mortality in Chinese adults: A pooled analysis of cohorts in the China-PAR project. *Environ Int* 138, 105589 (2020).
- 58 Yin, P. et al. Long-term Fine Particulate Matter Exposure and Nonaccidental and Cause-specific Mortality in a Large National Cohort of Chinese Men. *Environ Health Perspect* 125, 117002 (2017).
- 59 Guo, Y. et al. The association between lung cancer incidence and ambient air pollution in China: A spatiotemporal analysis. *Environ Res* 144, 60–65 (2016).
- 60 Liu, C. et al. Long-Term Exposure to Ambient Fine Particulate Matter and Incidence of Major Cardiovascular Diseases: A Prospective Study of 0.5 Million Adults in China. *Environ Sci Technol* 56, 13200–13211 (2022).
- 61 Huang, K. et al. Long-Term Exposure to Fine Particulate Matter and Hypertension Incidence in China. *Hypertension* 73, 1195–1201 (2019).
- 62 Li, J. et al. Long-Term Effects of High Exposure to Ambient Fine Particulate Matter on Coronary Heart Disease Incidence: A Population-Based Chinese Cohort Study. *Environ Sci Technol* 54, 6812–6821 (2020).
- 63 Liang, F. et al. Long-term exposure to ambient fine particulate matter and incidence of diabetes in China: A cohort study. *Environ Int* 126, 568–575 (2019).
- 64 Liu, L., Zhang, Y., Yang, Z., Luo, S. & Zhang, Y. Long-term exposure to fine particulate constituents and cardiovascular diseases in Chinese adults. *J Hazard Mater* 416, 126051 (2021).
- 65 Huangfu, P. & Atkinson, R. Long-term exposure to NO₂ and O₃ and all-cause and respiratory mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environ Int* 144, 105998 (2020).
- 66 Han, C. et al. Mortality burden due to long-term exposure to ambient PM_{2.5} above the new WHO air quality guideline based on 296 cities in China. *Environment International* 166, 107331 (2022).
- 67 Li, X. et al. Mortality burden due to ambient nitrogen dioxide pollution in China: Application of high-resolution models. *Environment International* 176, 107967 (2023).
- 68 Xiao, Q. et al. Tracking PM_{2.5} and O₃ pollution and the related health burden in China 2013–2020. *Environmental Science & Technology* (2021).
- 69 Chen, R. et al. Fine particulate air pollution and daily mortality. A nationwide analysis in 272 Chinese cities. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 196, 73–81 (2017).
- 70 Gu, J. et al. Ambient air pollution and cause-specific risk of hospital admission in China: a nationwide time-series study. *PLoS Medicine* 17, e1003188 (2020).
- 71 Tian, Y. et al. Association between ambient fine particulate pollution and hospital admissions for cause specific cardiovascular disease: time series study in 184 major Chinese cities. *Bmj* 367 (2019).
- 72 He, C. et al. Fine particulate matter air pollution and under-5 children mortality in China: a national time-stratified case-crossover study. *Environment International* 159, 107022 (2022).
- 73 Chen, R. et al. Associations between ambient nitrogen dioxide and daily cause-specific mortality: evidence from 272 Chinese cities. *Epidemiology* 29, 482–489 (2018).
- 74 Yin, P. et al. Ambient ozone pollution and daily mortality: a nationwide study in 272 Chinese cities. *Environmental Health Perspectives* 125, 117006 (2017).
- 75 Liang, F. et al. Long-term exposure to fine particulate matter and cardiovascular disease in China. *J. Am. Coll. Cardiol.* 75, 707–717 (2020).
- 76 Yang, X. et al. Associations of long-term exposure to ambient PM_{2.5} with mortality in Chinese adults: A

- pooled analysis of cohorts in the China–PAR project. *Environment International* 138, 105589 (2020).
- 77 Huang, K. et al. Long–term exposure to ambient fine particulate matter and incidence of stroke: prospective cohort study from the China–PAR Project. *Bmj* 367 (2019).
- 78 Li, J. et al. Long–term effects of high exposure to ambient fine particulate matter on coronary heart disease incidence: a population–based Chinese cohort study. *Environmental Science & Technology* 54, 6812–6821 (2020).
- 79 Niu, Y. et al. Long–term exposure to ozone and cardiovascular mortality in China: a nationwide cohort study. *The Lancet Planetary Health* 6, e496–e503 (2022).
- 80 Zhang, Q. et al. Overview of particulate air pollution and human health in China: Evidence, challenges, and opportunities. *The Innovation* (2022).
- 81 Lin, W. et al. Acute respiratory inflammation in children and black carbon in ambient air before and during the 2008 Beijing Olympics. *Environmental Health Perspectives* 119, 1507–1512 (2011).
- 82 Lin, W. et al. Association between changes in exposure to air pollution and biomarkers of oxidative stress in children before and during the Beijing Olympics. *American Journal of Epidemiology* 181, 575–583 (2015).
- 83 Wu, Q.–Z. et al. Ambient airborne particulates of diameter $\leq 1 \mu\text{m}$, a leading contributor to the association between ambient airborne particulates of diameter $\leq 2.5 \mu\text{m}$ and children's blood pressure. *Hypertension* 75, 347–355 (2020).
- 84 Zhang, J.–S. et al. Long–term exposure to ambient air pollution and metabolic syndrome in children and adolescents: a national cross–sectional study in China. *Environment International* 148, 106383 (2021).
- 85 Liu, C. et al. Associations between long–term exposure to ambient particulate air pollution and type 2 diabetes prevalence, blood glucose and glycosylated hemoglobin levels in China. *Environment International* 92, 416–421 (2016).
- 86 Li, J. et al. Association of long–term exposure to $\text{PM}_{2.5}$ with blood lipids in the Chinese population: Findings from a longitudinal quasi–experiment. *Environment International* 151, 106454 (2021).
- 87 Chen, W. et al. Associations between changes in adipokines and exposure to fine and ultrafine particulate matter in ambient air in Beijing residents with and without pre–diabetes. *BMJ Open Diabetes Research and Care* 8, e001215 (2020).
- 88 Chen, W. et al. Glucose Metabolic Disorders Enhance Vascular Dysfunction Triggered by Particulate Air Pollution: a Panel Study. *Hypertension* 79, 1079–1090 (2022).
- 89 Chen, X. et al. Susceptibility of individuals with chronic obstructive pulmonary disease to air pollution exposure in Beijing, China: A case–control panel study (COPDB). *Science of The Total Environment* 717, 137285 (2020).
- 90 Yao, Y. et al. Neuroendocrine stress hormones associated with short–term exposure to nitrogen dioxide and fine particulate matter in individuals with and without chronic obstructive pulmonary disease: A panel study in Beijing, China. *Environmental Pollution* 309, 119822 (2022).
- 91 Yao, Y. et al. Transcriptional pathways of elevated fasting blood glucose associated with short–term exposure to ultrafine particles: A panel study in Beijing, China. *Journal of Hazardous Materials* 430, 128486 (2022).
- 92 Wang, T. et al. Pro–thrombotic changes associated with exposure to ambient ultrafine particles in patients with chronic obstructive pulmonary disease: roles of lipid peroxidation and systemic inflammation. *Part. Fibre Toxicol.* 19, 65 (2022).



气候变化与 人体健康

气候变化是 21 世纪人类面临的巨大挑战，对公众健康和社会发展构成了严重威胁。气候变化会导致海平面上升，热浪、干旱、洪水、台风等极端天气事件频发，从而对清洁空气、安全饮用水、营养食品供应和安全住所的可及性产生威胁。根据世界卫生组织估算，在 2030–2050 年期间，气候变化仍可导致全球每年至少 25 万人死于营养不良、疟疾、腹泻和热应激。未来，气候变化很可能会超过环境污染而成为全人类健康的最大风险因素。因此，在减缓气候变化，有效、经济和公平地实现“碳中和”目标的过程中，亟需采取保护人类健康的适应性措施，以降低气候变化对人类健康的影响。

02



2.1.1 气候及气候变化的定义

气候是地球上某一地区多年时段大气的一般状态，是该时段各种天气过程的综合表现。气候变化是指气候平均值和气候离差值出现了统计意义上的显著变化，如平均气温、平均降水量、最高气温、最低气温，以及极端天气事件等的变化。

2.1.2 全球和我国气候变化的变化趋势

据世界气象组织（WMO）报道，2022年全球地表平均气温较工业化前水平（1850~1900年

平均值）高出 1.15°C ，可能是有完整气象观测记录以来的八个最暖年份之一¹。联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）第六次气候变化评估报告指出，全球2011–2020年的平均地表气温比工业化前水平高出了 1.09°C ，而2013–2022年的平均气温则高出了 1.14°C ，说明全球气温的升高速度正在加快²。

我国的气候变化趋势也比较明显，1951–2021年期间，我国地表年平均气温增速达 $0.26^{\circ}\text{C}/10$ 年，高出全球平均水平（ $0.15^{\circ}\text{C}/10$ 年）³。2022年，全国平均气温 10.51°C ，较常年偏高 0.62°C ，为1951年以来历史次高，其中3月、6月和8月

的气温为历史同期最高⁴。1961年以来，我国区域性干旱事件频次呈微弱上升趋势，并且具有明显的年代际变化特征：20世纪70年代后期至80年代区域性气象干旱事件偏多，90年代偏少，2003–2008年阶段偏多，2009年以来总体偏少³。

2.1.3 气候变化的主要驱动因素

气候变化的主要驱动力来自地球气候系统之外的外强迫因子以及气候系统内部因子间的相互作用（图2-1）。自然强迫因子包括太阳活动、

火山活动等。人类活动也是气候变化的重要驱动因素，尤其是工业化时代燃烧石化燃料等排放的大量温室气体、气溶胶等物质，同时土地利用方式的改变也影响了大气辐射的收支平衡，进而影响气候变化。

全球气候变化的背景下，全球气温的升高速度正在加快，而我国地表年平均气温增速更是超过全球平均水平。作为世界上主要的“气候脆弱区”之一，未来我国气象灾害也将越来越频繁。因此，亟需实施气候缓解和适应的相关政策，降低气候变化对人群健康产生的威胁。

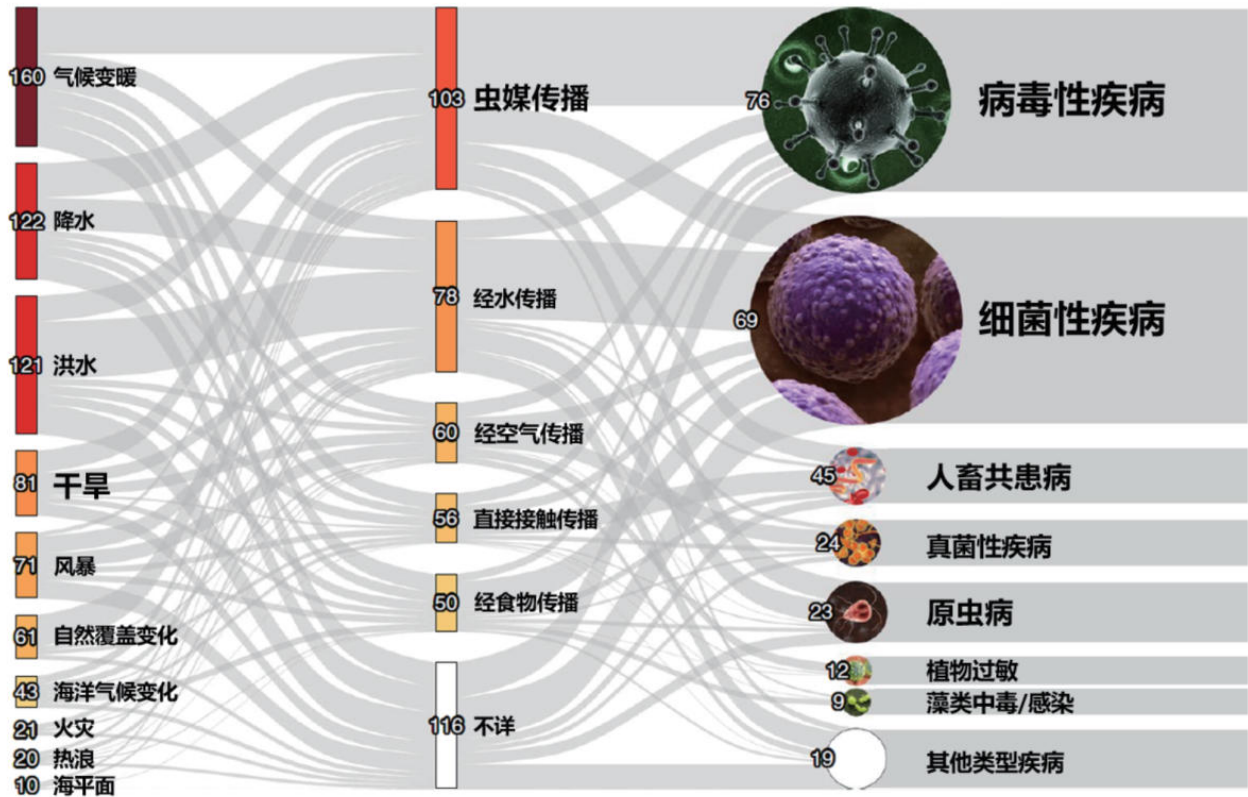


图 2-1 气候变化对人类传染性疾影响的可追溯证据¹⁶

2.2.1 气候变化对媒介生物性传染病的影响

气候变化一方面影响病原体在媒介体内的繁殖与扩增，另一方面也会导致媒介生物数量和分布的变化，进而影响人群与媒介生物的互作关系。

登革热、疟疾和流行性乙型脑炎，经伊蚊或按蚊传播，是我国乃至全球重要蚊媒传染病。研究表明，环境温度不仅会增加蚊媒传染病的传播风险，而且具有延迟效应。例如，珠江三角洲滞后 2 月的月均气温每升高 1℃，登革热传播风险增加 101.0%⁵。苏州市的日平均气温在 10℃ 以上时，每升高 5℃，疟疾病例在 4 周后增加 22%⁶。此外，水文气象条件也会对登革热暴发产生重要影响。例如，极端湿润和极端干旱均能增加登革热发病风险，极端湿润在滞后第 1 个月时效应最大；极端干旱表现出更长的滞后性，在第 6 个月效应最大⁷。

气候变化可能会影响以发热伴血小板减少综合征 (severe fever with thrombocytopenia syndrome, SFTS) 为代表的蜱传疾病的暴发或流行。例如全国 SFTS 病例数与周平均气温的关系呈反 U 型，高温在滞后 0 周时相对风险值 (Relative risk, RR) 最高，低温在滞后 13 周时 RR 最高⁸。

2.2.2 气候变化对介水传播疾病的影响

霍乱和细菌性痢疾是典型介水传染病。多种气候因素如降雨量、温度等通过影响霍乱弧菌在水生环境中的发生、生长和分布，从而影响霍乱的发病风险。在温暖的月份，低降水和高温使霍乱弧菌更快复制⁹。细菌性痢疾的发病与各气象因素密切相关。随着气温的升高，多个地区细菌性痢疾的风险显著增加¹⁰。

2.2.3 气候变化对食源性疾病的影响

气象因素，如气温、降雨量等都会影响食源性疾病的发病率¹¹。例如，一项研究表明高温、高湿与沙门氏菌住院呈正相关，相对于 13℃，气温在 30.5℃ 时沙门氏菌住院的 RR 可达 6.13¹²。

2.2.4 气候变化对经空气传播疾病的影响

气温和相对湿度是影响流感发生和流行的重要因素，并且不同地区间的关系也存在差异。有研究发现在我国北方，绝对湿度降低，流感活动增加，而在南方，绝对湿度与流感活动呈正相关¹³。目前有多项研究探索气象因素与新型冠状病毒感染的关系，但结论不一。总体来说，较低的环境温度和较低的湿度与新型冠状病毒感染风险增加有关。例如，中国多个省会城市日均气温与每日确诊病例数呈现负相关，相应的总 RR 为 0.80¹⁴。

2.2.5 气候变化对其他传染病的影响

其他传播途径传染病的暴发或流行也与多种气象因素有关。手足口病在我国儿童发病率较高，可经呼吸道、消化道和间接接触等多种途径传播，而温暖潮湿的气候条件会增加传播风险。例如，2009–2018 年陕西省的降雨量与手足口病发病率呈正相关：县月累计降雨量每增加 1%，本县手足口病发病率增加 0.071%，周边县手足口病的发病率增加 0.218%。月均气温每升高 1℃，周边县手足口病发病率将增加 0.450%¹⁵。

全球气候变化背景下，气象因素变化和极端天气事件的发生会影响多种传染性疾病的传播方式及流行特征，进而影响发病格局和分布。

2.3

气候变化对非传染性疾病的影响



2.3.1 气候变化对心血管疾病的影响

心血管疾病是最主要的气候变化敏感疾病：高温热浪¹⁷、低温寒潮¹⁸和温度变异¹⁹均会增加该类的疾病发病和死亡风险。2019年，我国约有40万心血管疾病死亡归因于非适宜温度（高温和低温），主要来自缺血性心脏病（15万）和脑卒中（22万）²⁰。此外，多种心血管疾病，如急性心肌梗死、脑卒中、心率失常等对异常气温敏感，发病风险不仅在当天或数天（短期效应）内，甚至在数小时（超短期）内都可能升高²¹。

2.3.2 气候变化对呼吸系统疾病的影响

气候变化主要影响慢性阻塞性肺病、上下呼吸道感染和哮喘等疾病。据估计，2013–2015年全国约有10%的呼吸系统疾病死亡归因于非适宜温度，在2019年达到30%，约18万人死亡²²。呼吸系统疾病还受到极端天气的影响，如寒潮²³

和热带气旋²⁴。此外，气候变化增加野火的发生风险，造成突发空气污染（特别是细颗粒物），增加呼吸系统疾病发病风险²⁵。气候变化还可通过增加花粉和其它自然过敏原加剧儿童哮喘、过敏性鼻炎等呼吸道过敏性疾病²⁶。

2.3.3 气候变化对消化系统疾病的影响

气候变化与消化系统疾病的关联近年来逐渐得到研究证实。夏季高温条件下，胃病发病率明显升高²⁷，而冬季低温与上消化道出血和消化性溃疡的发病有关²⁸。热浪、干旱、洪涝等极端天气事件也会导致水源短缺和水质问题，影响居民的饮水安全，诱发消化系统疾病²⁹。

2.3.4 气候变化对泌尿系统疾病的影响

2019年，我国大约有3万（1.8%）糖尿病和肾脏疾病的死亡归因于非适宜温度，且低温的

影响大于高温³⁰。高温、低相对湿度及降雨量增加会诱发泌尿系统疾病，如肾绞痛、肾炎和尿路感染的门诊量和救护车调度量上升有关^{31,32}。

2.3.5 气候变化对生殖系统疾病的影响

气候变化对生殖系统影响当下主要聚焦于非适宜温度与出生结局的关系。孕期高温和低温暴露均可能增加早产风险，且孕晚期暴露风险更高³³。据估计高温热浪平均每年在我国引起 1.3 万早产，其中 25.8% 的早产与人为因素导致的气候变化有关³⁴。孕中期和孕晚期的低温暴露与孕妇血压升高和妊娠期高血压患病率增加有关³⁵。

2.3.6 气候变化对精神心理疾病的影响

气候变化会影响认知、情绪及行为：如高温和低温增加焦虑、抑郁和精神分裂症的发病风险。据最新研究表明：全国每年 15.2% 的自杀死亡与非适宜温度相关³⁶。此外，洪水会增加创伤后应激障碍的发病率³⁷。气候变化导致长期的环境变化（如干旱、野火和降水模式改变）也在世界多地报道会降低幸福感，威胁精神心理健康³⁸。

因此，气候变化不仅会影响循环系统疾病和呼吸系统疾病的发病和死亡，消化系统疾病、泌尿系统疾病、生殖系统疾病和精神系统疾病同样会受到气候变化的影响。

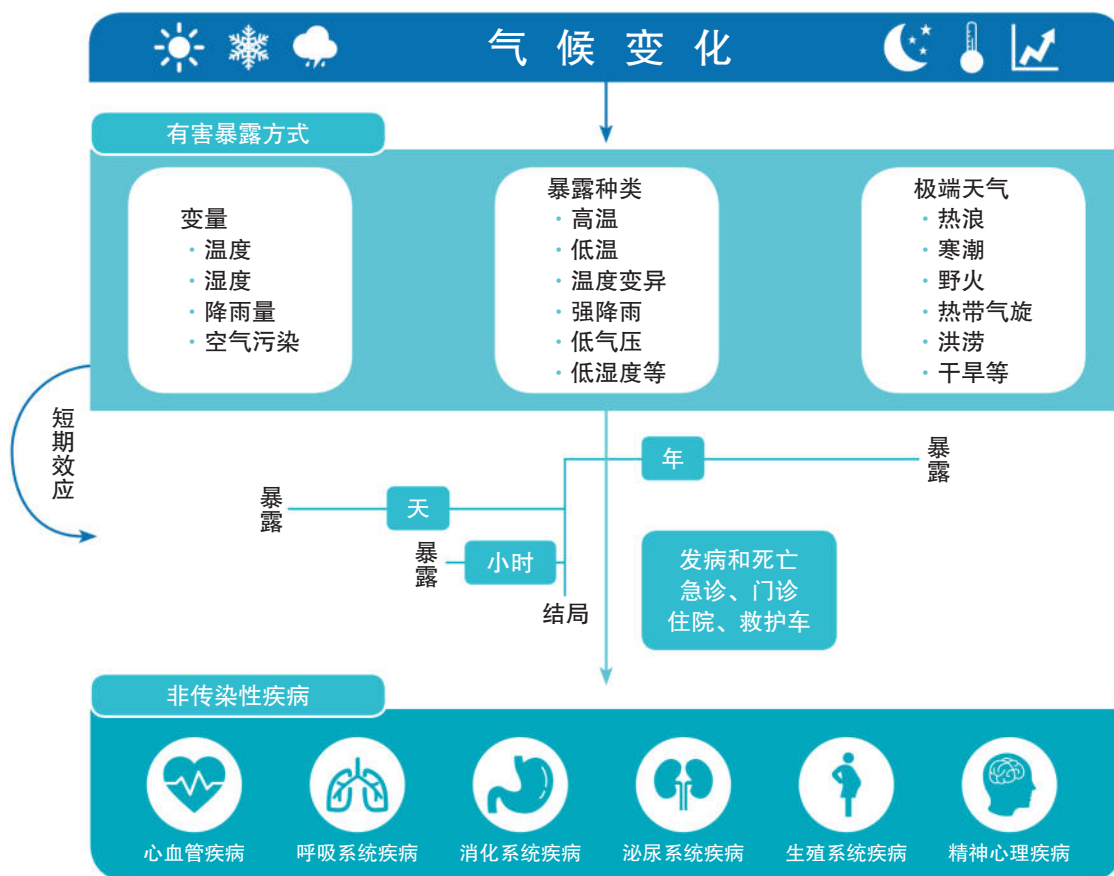


图 2-2 气候变化对非传染性疾病的影响

2.4

气候变化健康影响的机制

气候变化通过一系列广泛而复杂的过程影响公共健康，其主要方式包括热浪、寒潮、洪涝和台风等极端气象事件的发生直接影响健康，以及改变传染病媒介生物的分布、粮食减产、空气质量恶化等间接方式，对健康造成影响。

2.4.1 气候变化直接影响的机制

热浪：热应激引起的出汗和皮肤血流量增加会导致人体短时间内大量水分流失，加剧心血管压力，导致急性肾损伤和肾衰竭，而慢性脱水可导致肾纤维化和慢性肾病³⁹⁻⁴¹。伴随血浆容量的减少，红细胞和其他血液成分浓度增加，以及血液粘度上升和胆固醇浓度升高，致使血栓栓塞、缺血性中风和心脏病的风险升高^{42, 43}。体温过高引起血液再分配后的缺血和氧化应激，可导致细胞、组织和器官的损伤。此外，体温过高引起血液再分配后的缺血和氧化应激，可造成细胞、组织和器官的损伤，最终导致内皮功能障碍和细胞

毒性作用，可引发心肌梗塞、急性冠脉综合征和内毒素血症⁴⁴。

寒潮：低温寒潮可通过影响血压和血浆、血液粘度以及炎症反应等因素引起心血管应激^{45, 46}。低温可诱发血管收缩，血压、血液胆固醇、血小板计数和红细胞计数增加，这些均为动脉粥样硬化斑块破裂和心肌梗死等心血管疾病的危险因素⁴⁷。寒冷还可通过吸入冷空气干燥鼻腔和气道的黏膜，引起呼吸道支气管收缩，抑制气道黏膜纤毛清除功能和其他免疫反应，导致局部炎症反应，增加哮喘、慢性阻塞性肺病和呼吸道感染的风险⁴⁸⁻⁵⁰。

洪涝：洪涝通常由暴雨、风暴潮和海平面上升等因素引起，洪水可造成溺水事故和严重伤亡，并对当地基础设施与卫生资源造成严重的破坏⁵¹，同时，也不利于救援行动的展开。洪涝还可能引发不良的心理健康结果，如抑郁和创伤后应激障碍⁵²。

台风：台风对健康的直接影响主要来自意外

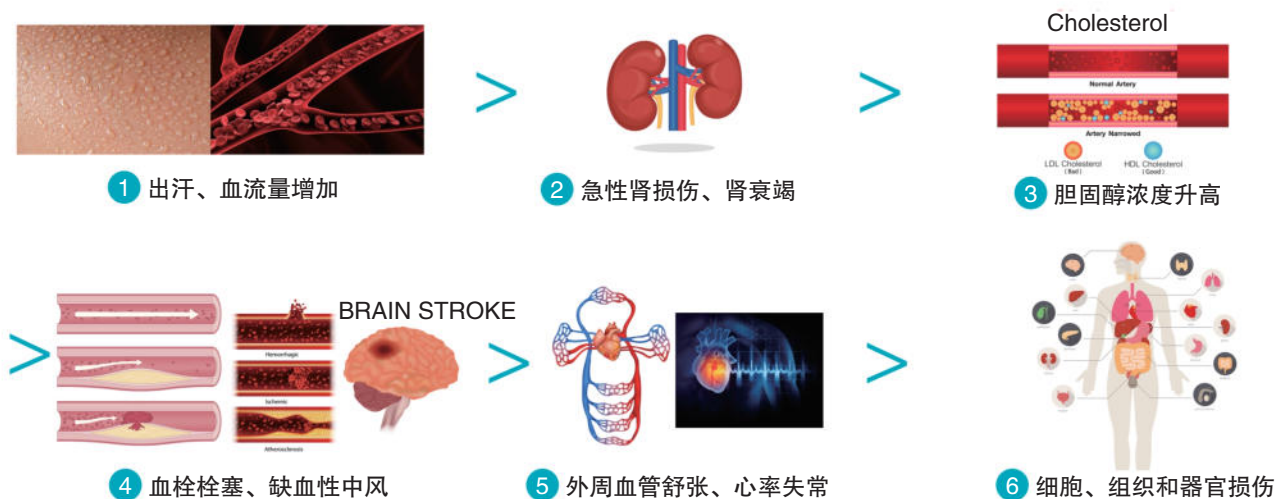


图 2-3 高温影响人体健康的机制

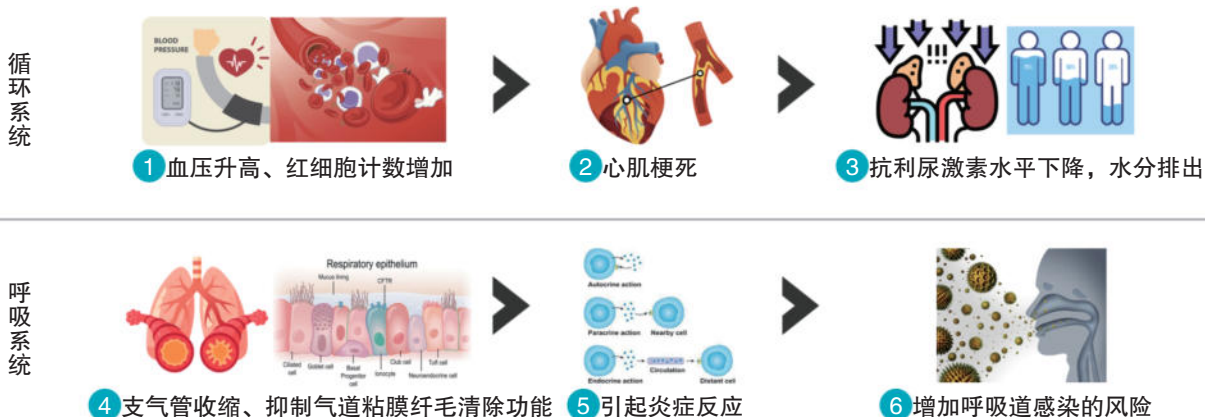


图 2-4 低温影响人体健康的机制

伤害，其中包括撕裂伤害、触电和跌倒等^{53,54}。台风可摧毁房屋和基础设施，造成人员伤亡，影响用水、用电与粮食安全，导致医疗资源短缺和卫生条件恶化。台风过后，人群中出现精神障碍的风险较高，如急性应激、睡眠障碍和创伤后应激障碍^{55,56}。

2.4.2 气候变化间接影响的机制

媒介分布：气候变化导致的升温和降雨模式的改变等，对传染病病原体、宿主、媒介等产生影响，从而改变传染病流行模式，增加疟疾、登革热等传染性疾病的风险⁵⁷。气候变化影响节肢动物媒介的生命周期，包括存活率、种群数量、媒介病原体相互作用、病原体复制，有利于提升媒介生物传播潜力⁵⁸。

粮食安全：气候变化可影响农业、渔业、畜牧业和水产业等，进而影响人类健康。其中，气候变化可降低粮食中矿物质与维生素等人体必需元素成分的占比，导致营养不良型疾病的发生，使得人群免疫功能下降，更易感染传染性疾病⁵⁹。洪水会导致化学污染物侵蚀土壤、污染水源，并可能被作物吸收，增加食源性疾病的风险^{60,61}。由于全球变暖，高海表温度可能会加速

沿海地区水传播病原体的扩散，如霍乱弧菌、创伤弧菌和副溶血性弧菌，食用受污染的海鲜会导致人群受到感染⁶²。

空气污染：气温升高、降水减少、风速降低都不利于大气污染物的扩散。气候变暖会增加逆温层出现的频率。正常气象条件下，污染物从气温高的低空向气温低的高空扩散，但逆温条件下，逆温层阻碍了空气的垂直对流运动，近地面大气污染物沉积，加剧地面空气污染，对人群健康产生短期和长期影响⁶³。同时，频发的高温热浪与干旱事件、闪电模式的改变，增加野火的风险；而野火燃烧排放大量的PM_{2.5}、一氧化碳、氮氧化物、黑碳、挥发性有机碳以及其他有毒有害物质，加剧空气污染对公共健康的危害³⁸。

由此可知，气候变化影响公共健康的主要方式包括通过热浪、寒潮、洪涝和台风等极端气象事件直接影响健康，以及改变传染病媒介生物的分布、造成粮食减产、空气质量恶化等间接方式对健康造成影响。鉴于气候变化对人类健康影响的复杂性，未来需要加强机制性研究，尤其是社会经济因素、人群适应性等因素的影响，进而可通过对中介因素的干预来降低气候变化相关的人群健康风险。



图 2-5 媒介分布受气候变化的因素



2.5.1 气候变化健康风险概述

气候是自然界的重要组成部分，是人类赖以生存和发展的基础。气候变化使人类的生存环境变得日益复杂，对人体健康造成显著影响。气候变化导致的升温、降水规律改变、极端天气事件增加等可直接或间接影响人群健康。

2.5.2 气象因素对不同地区主要健康结局的影响差异

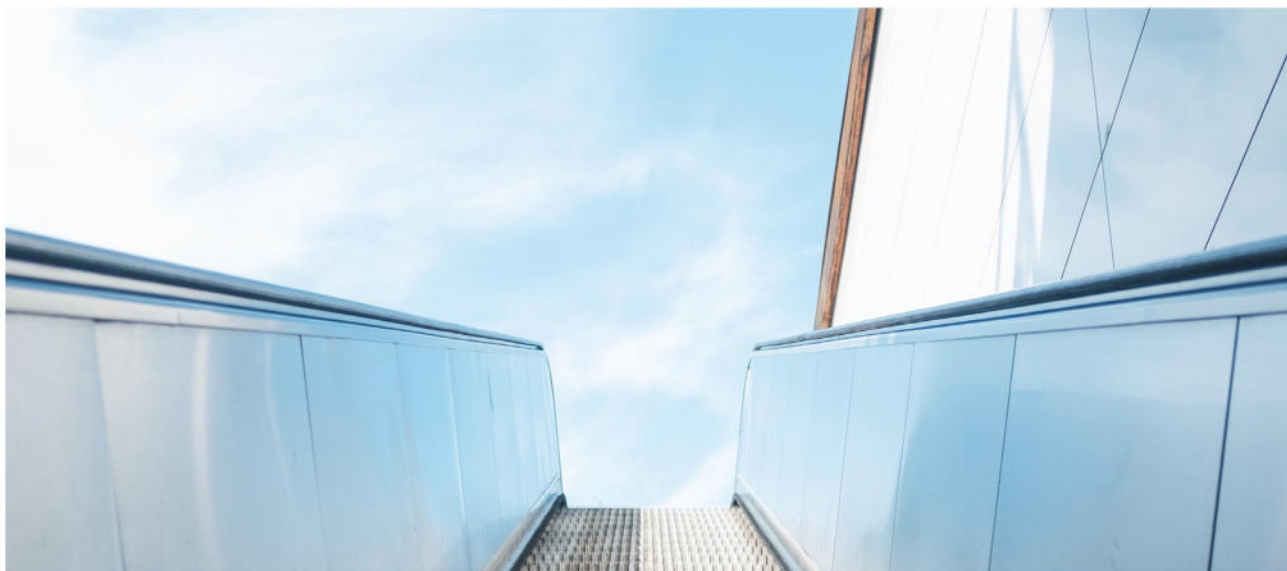
气候变化引起健康风险具有明显的时空异质性。高温对北方居民造成的健康风险高于南方居民，而低温对南方居民造成的健康风险则高于北方居民⁶⁴。气候变化对农村地区居民造成的健康风险普遍高于城市地区。这种区域的差异与不同地区居民对气温的适应能力有关，例如南方居民长期生活在高温环境中，一旦遇到低温天气，短期内生理功能难以适应，加上缺乏供暖设施等，易引发心血管疾病等，甚至导致死亡。另外，气候变化可影响多种传染病的流行模式，并且具有

明显的时空异质性。例如，气候变暖使我国南方的登革热流行风险增加；同时，随着未来气候变暖加剧，登革热的流行区域向北方和高海拔等地区扩散⁶⁵。

2.5.3 不同人群对气候变化的易感性差异

气候变化对健康的影响也存在人群异质性，不同人群对气候变化的敏感性不同。老年人、儿童、孕产妇、贫困人群以及慢性病患者等受气候变化的影响一般较大，健康风险较高，这与他们的适应能力密切相关⁶⁶⁻⁶⁸。因此，在气候变化日趋明显的未来，需要加强对这几类人群的保护。

因此，气候变化对不同地区和人群的影响存在异质性。如高温对北方居民造成的健康风险较高，而低温对南方居民造成的健康风险较高。气候因素对农村地区居民造成的健康风险普遍较高。老年人、儿童、孕产妇、贫困人群以及慢性病患者等受气候变化的影响一般较大。需要加强对气候脆弱人群健康的关注。



2.6

未来气候变化情景下的疾病负担变化

未来全球所有地区的气候变化都将加剧，气温呈加速上升态势，非适宜温度相关的人群健康风险也将显著升高^{69, 70}。在不同气候区域及人口变化的情景下，预测未来气候变化对人群健康造成的影响，有助于健康干预策略的制定和实施，以减少由气候变化造成的不利影响。

2.6.1 未来气候变化对传染性疾病负担的影响

气候变化使得传染病发病率增加、传染病分布范围扩大、人群对疾病易感性增强。过去研究发现，在气候变化情境下，未来大部分地区细菌性痢疾的疾病负担都呈现上升趋势，其中华北，东北，内蒙古地区疾病负担升高尤为显著⁷¹。此外，在多种排放情境下，未来我国麻疹伤寒病例数均呈现先上升后下降的趋势。病例数达到峰值时，相比2010年基线水平将增加35–39%⁷²。未来气候变暖导致的传染性疾病风险，对脆弱人群（孕产妇、未成年人、老年人）威胁巨大。根据一项全国性研究预测，在中等排放情景下，与2009–2014年基线相比，儿童手足口病感染率到本世纪30年代和90年代分别增加1.5%和3.2%。内蒙古、东北、青藏、华北地区增长显著，其中内蒙古地区上升最大⁷³。气候变化同时会增加跨物种病毒传播风险。有研究显示，气候变化、栖息地遭破坏迫使动物迁徙以及人与动物之间的接触增加，病毒外溢不断增加，并将在未来50年内加速，气候变化可能成为跨物种病毒传播的主要驱动因素⁷⁴。

2.6.2 未来气候变化对非传染性疾病负担的影响

在气候变化背景下，未来气温升高会造成循环系统、呼吸系统等非传染性疾病负担显著升高。研究预测，在高排放情景下，未来热相关超额死亡率将从2010年代的1.9%增加到2030年代的2.4%，到2090年代将升高到5.5%。其中，心血管系统和呼吸系统的超额死亡率升高最为显著（图2–6）⁷⁵。另外，在高排放情景下，到2080年代，北京急性缺血性心脏病和缺血性中风的气温相关死亡数相比20世纪80年代将分别增长约20%和100%⁷⁶。

气候变化还会导致意外伤害和意外死亡事件风险升高。模型预测研究发现，与2010年代相比，在中等排放情景下，2090年代气温变化导致的总伤害死亡人数将增加到67,895人（4.88/10万人）⁷⁷。其中，前三大伤害死亡事件分别为溺水、交通伤害和自杀。此外，针对自杀事件的研究发现，不同气候变化情景下，全国不适温度相关的自杀死亡数在2050年代将增加8.3%–11.4%，2090年代将增加8.5%–21.7%，其中华南地区和冬季的增长率最高³⁶。

未来气候变化使得传染病发病率增加、传染病分布范围扩大、人群对疾病易感性增强，同时还会增加跨物种病毒传播风险。未来气温升高会造成循环系统、呼吸系统等非传染性疾病负担显著升高，并引起意外伤害和意外死亡事件等风险升高。

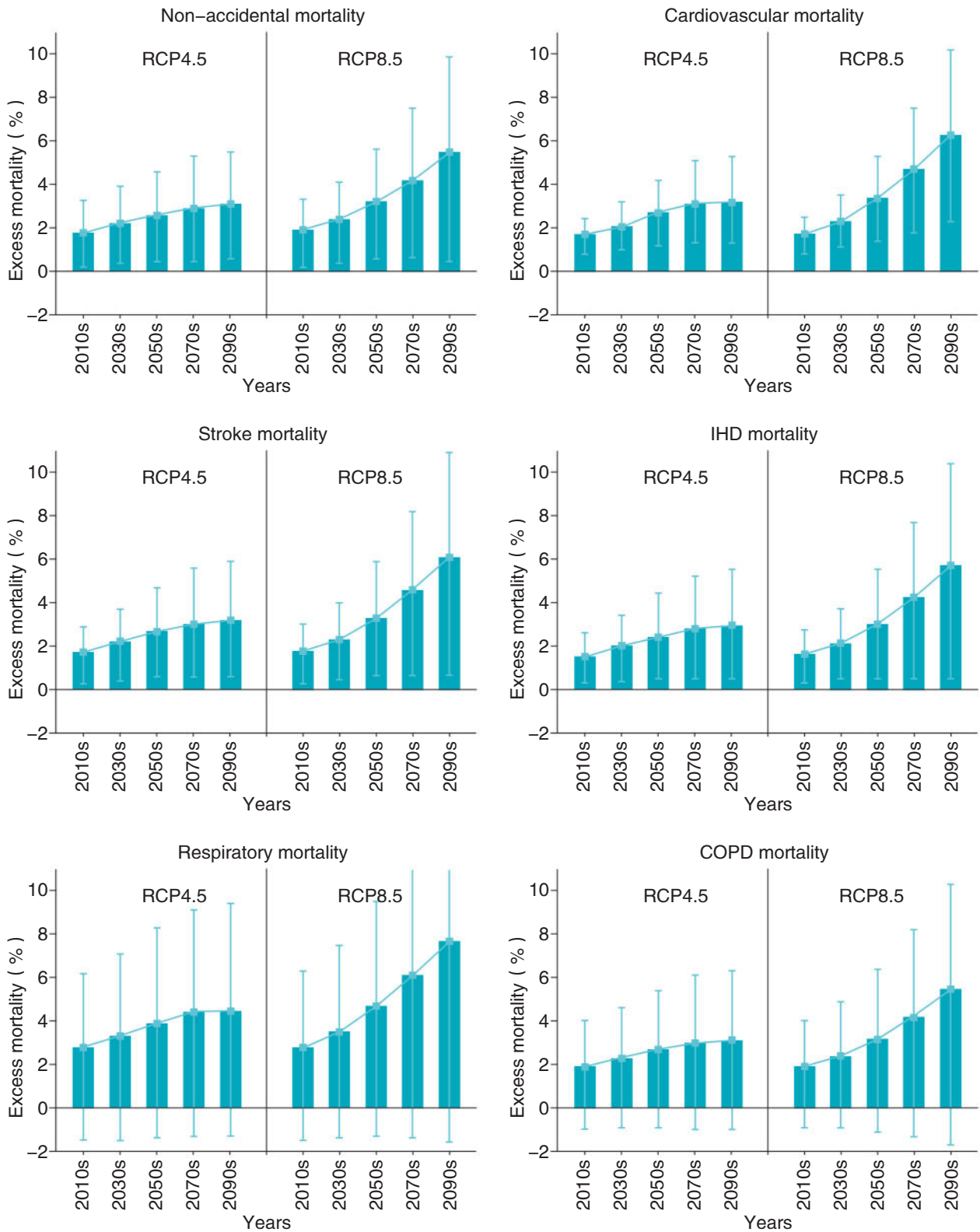


图 2-6 非意外死亡、心血管系统和呼吸系统疾病热相关超额死亡的变化趋势⁷²

参考文献

- 1 World Meteorological Association. (2023). State of the global climate 2022.
- 2 IPCC. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. In Press., (2021).
- 3 中国气象局气候变化中心 . 中国气候变化蓝皮书 2022. (科学出版社 , 2022) .
- 4 中国气象局 . 中国气象公报 (2023) .
- 5 Quan, Y. et al. How do temperature and precipitation drive dengue transmission in nine cities, in Guangdong Province, China: a Bayesian spatio-temporal model analysis. *Air Quality Atmosphere and Health* 16, 1153–1163 (2023).
- 6 Liu, Z. et al. Effect of temperature and its interactions with relative humidity and rainfall on malaria in a temperate city Suzhou, China. *Environmental Science and Pollution Research International* 28, 16830–16842 (2021).
- 7 Liu, Z. et al. Temperature Increase Enhances *Aedes albopictus* Competence to Transmit Dengue Virus. *Frontiers in Microbiology* 8, 2337 (2017).
- 8 孙继民 . 发热伴血小板减少综合征时空预测研究 , 北京 : 中国疾病预防控制中心 , (2018).
- 9 Asadgol, Z., Mohammadi, H., Kermani, M., Badirzadeh, A. & Gholami, M. The effect of climate change on cholera disease: The road ahead using artificial neural network. *PloS one* 14, e0224813 (2019).
- 10 Feng, F. et al. Effects of temperature on incidence of bacillary dysentery in a temperate continental arid climate city in northwest China. *Environmental Geochemistry and Health* 45, 4043–4056 (2023).
- 11 Oh, E. J., Kim, J. M. & Kim, J. K. Interrelationship between climatic factors and incidence of FBD caused by *Clostridioides difficile* toxin B, *Clostridium perfringens*, *Campylobacter* spp., and *Escherichia coli* O157:H7. 28, 44538–44546 (2021).
- 12 Wang, P., Goggins, W. B. & Chan, E. Y. Y. Associations of *Salmonella* hospitalizations with ambient temperature, humidity and rainfall in Hong Kong. *Environment International* 120, 223–230 (2018).
- 13 Qi, L. et al. Effect of absolute humidity on influenza activity across different climate regions in China. *Environmental Science and Pollution Research International* 29, 49373–49384 (2022).
- 14 Liu, J. et al. Impact of meteorological factors on the COVID-19 transmission: A multi-city study in China. *The Science of the Total Environment* 726, 138513 (2020).
- 15 Ding, L. et al. Spatiotemporal characteristics and meteorological determinants of hand, foot and mouth disease in Shaanxi Province, China: a county-level analysis. *BMC Public Health* 21, 374 (2021).
- 16 Mora C, McKenzie T, Gaw IM, Dean JM, von Hammerstein H, Knudson TA, Setter RO, Smith CZ, Webster KM, Patz JA, Franklin EC. Over half of known human pathogenic diseases can be aggravated by climate change. *Nature Climate Change*;12 869–875 (2022).
- 17 Cheng, J. et al. Cardiorespiratory effects of heatwaves: A systematic review and meta-analysis of global epidemiological evidence. *Environ Res* 177, 108610 (2019).
- 18 Lei, J. et al. Association between Cold Spells and Mortality Risk and Burden: A Nationwide Study in China. *Environ Health Perspect* 130, 27006 (2022).

- 19 Tian, Y. et al. Association between temperature variability and daily hospital admissions for cause-specific cardiovascular disease in urban China: A national time-series study. *PLoS Med* 16, e1002738 (2019).
- 20 Liu, J. et al. Mortality burden attributable to high and low ambient temperatures in China and its provinces: Results from the Global Burden of Disease Study 2019. *Lancet Reg Health West Pac* 24, 100493 (2022).
- 21 Wu, K. et al. A systematic review and meta-analysis of intraday effects of ambient air pollution and temperature on cardiorespiratory morbidities: First few hours of exposure matters to life. *EBioMedicine* 86, 104327 (2022).
- 22 Chen, R. J. et al. Association between ambient temperature and mortality risk and burden: time series study in 272 main Chinese cities. *Bmj-Brit Med J* 363 (2018).
- 23 Zhou, M. G. et al. Health impact of the 2008 cold spell on mortality in subtropical China: the climate and health impact national assessment study (CHINAs). *Environ Health* 13, 60 (2014).
- 24 He, C. et al. Tropical cyclone and daily respiratory mortality across East Asia: a time series study. *Eur Respir J* (2023).
- 25 Johnston, F. H. et al. Estimated global mortality attributable to smoke from landscape fires. *Environ Health Perspect* 120, 695–701 (2012).
- 26 Wong, G. W. K. et al. Pediatric allergy and immunology in China. *Pediatr Allergy Immunol* 29, 127–132 (2018).
- 27 Wen, B. et al. Temperature variability and common diseases of the elderly in China: a national cross-sectional study. *Environ Health* 22, 4 (2023).
- 28 殷冬林等. 寒冷气候对南昌地区消化性溃疡及其合并上消化道出血的影响与预防策略 [J]. *世界华人消化杂志* 21, 3914–3919 (2013).
- 29 Bush, K. F. et al. Associations between extreme precipitation and gastrointestinal-related hospital admissions in Chennai, India. *Environ Health Perspect* 122, 249–254 (2014).
- 30 Liu, Y. et al. Burden of diabetes and kidney disease attributable to non-optimal temperature from 1990 to 2019: A systematic analysis from the Global Burden of Disease Study 2019. *Sci Total Environ* 838, 156495 (2022).
- 31 Yang, C. et al. Daily ambient temperature and renal colic incidence in Guangzhou, China: a time-series analysis. *Int J Biometeorol* 60, 1135–1142 (2016).
- 32 Li, Y. et al. Ambient temperature, humidity, and urinary system diseases: a population-based study in Western China. *Environ Sci Pollut Res Int* 29, 28637–28646 (2022).
- 33 Wang, Y. Y. et al. Ambient temperature and the risk of preterm birth: A national birth cohort study in the mainland China. *Environ Int* 142, 105851 (2020).
- 34 Zhang, Y. et al. The burden of heatwave-related preterm births and associated human capital losses in China. *Nat Commun* 13, 7565 (2022).
- 35 Sun, Y. et al. Potential impact of ambient temperature on maternal blood pressure and hypertensive disorders of pregnancy: A nationwide multicenter study based on the China birth cohort. *Environ Res* 227, 115733 (2023).
- 36 Zhou, Y. et al. Assessing the Burden of Suicide Death Associated With Nonoptimum Temperature in a Changing Climate. *JAMA Psychiatry* 80, 488–497 (2023).
- 37 Hu, S. et al. Recovery from post-traumatic stress disorder after a flood in China: a 13-year follow-up and its prediction by degree of collective action. *BMC Public Health* 15, 615 (2015).
- 38 Xu, R. et al. Wildfires, Global Climate Change, and Human Health. *N Engl J Med* 383, 2173–2181 (2020).
- 39 José, G. I.-A., Mora-Rodríguez, R., Below, P. R. & Coyle, E. F. Dehydration markedly impairs

- cardiovascular function in hyperthermic endurance athletes during exercise. *Journal of Applied Physiology* 82, 1229–1236 (1997).
- 40 Roncal–Jimenez, C., Lanaspá, M., Jensen, T., Sanchez–Lozada, L. & Johnson, R. Mechanisms by which dehydration may lead to chronic kidney disease. *Annals of Nutrition and Metabolism* 66, 10–13 (2015).
 - 41 Glaser, J. et al. Climate change and the emergent epidemic of CKD from heat stress in rural communities: the case for heat stress nephropathy. *Clinical Journal of the American Society of Nephrology* 11, 1472–1483 (2016).
 - 42 Keatinge, W. R. et al. Increased platelet and red cell counts, blood viscosity, and plasma cholesterol levels during heat stress, and mortality from coronary and cerebral thrombosis. *The American Journal of Medicine* 81, 795–800 (1986).
 - 43 Liu, C., Yavar, Z. & Sun, Q. Cardiovascular response to thermoregulatory challenges. *American Journal of Physiology–Heart and Circulatory Physiology* 309, H1793–H1812 (2015).
 - 44 Hall DM. et al. Mechanisms of circulatory and intestinal barrier dysfunction during whole body hyperthermia. *American Journal Of Physiology–heart And Circulatory Physiology*. H509–21 (2001).
 - 45 Keatinge, W. et al. Increases in platelet and red cell counts, blood viscosity, and arterial pressure during mild surface cooling: factors in mortality from coronary and cerebral thrombosis in winter. *Br Med J (Clin Res Ed)* 289, 1405–1408 (1984).
 - 46 Woodhouse, P., Khaw, K., Plummer, M., Meade, T. & Foley, A. Seasonal variations of plasma fibrinogen and factor VII activity in the elderly: winter infections and death from cardiovascular disease. *The Lancet* 343, 435–439 (1994).
 - 47 Thakur, C. P., Anand, M. P. & Shahi, M. P. Cold weather and myocardial infarction. *Int J Cardiol* 16, 19–25 (1987).
 - 48 Eccles, R. An explanation for the seasonality of acute upper respiratory tract viral infections. *Acta Oto–laryngologica* 122, 183–191 (2002).
 - 49 Carlsen, K.–H. Sports in extreme conditions: the impact of exercise in cold temperatures on asthma and bronchial hyper–responsiveness in athletes. *British Journal of Sports Medicine* 46, 796–799 (2012).
 - 50 Donaldson, G. C. & Wedzicha, J. A. The causes and consequences of seasonal variation in COPD exacerbations. *International Journal of Chronic Obstructive Pulmonary Disease*, 1101–1110 (2014).
 - 51 Watson, J. T., Gayer, M. & Connolly, M. A. Epidemics after natural disasters. *Emerging Infectious Diseases* 13, 1 (2007).
 - 52 Lieberman–Cribbin, W., Liu, B., Schneider, S., Schwartz, R. & Taioli, E. Self–reported and FEMA flood exposure assessment after Hurricane Sandy: association with mental health outcomes. *PLoS One* 12, e0170965 (2017).
 - 53 Ragan, P., Schulte, J., Nelson, S. J. & Jones, K. T. Mortality surveillance: 2004 to 2005 Florida hurricane–related deaths. *The American Journal of Forensic Medicine and Pathology* 29, 148–153 (2008).
 - 54 McNabb, S., Kelso, K. Y., Wilson, S. A., McFarland, L. & Farley, T. A. Hurricane Andrew–related injuries and illnesses, Louisiana, 1992. *Southern Medical Journal* 88, 615–618 (1995).
 - 55 Mehmood, Z. et al. Prevalence and determinants of stunting among preschool and school–going children in the flood–affected areas of Pakistan. *Brazilian Journal of Biology* 82 (2021).
 - 56 Tasdik Hasan, M. et al. Exploring mental health needs and services among affected population in a cyclone affected area in costal Bangladesh: a qualitative case study. *International Journal of Mental Health Systems* 14, 1–9 (2020).

- 57 Liu, B. et al. Modeling the present and future distribution of arbovirus vectors *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* under climate change scenarios in Mainland China. *Sci Total Environ* 664, 203–214 (2019).
- 58 Tabachnick, W. Challenges in predicting climate and environmental effects on vector-borne disease epistystems in a changing world. *Journal of Experimental Biology* 213, 946–954 (2010).
- 59 Ahmed, T. et al. Water-Related Impacts of Climate Change on Agriculture and Subsequently on Public Health: A Review for Generalists with Particular Reference to Pakistan. *Int J Environ Res Public Health* 13 (2016).
- 60 Myers SS. et al. Climate Change and Global Food Systems: Potential Impacts on Food Security and Undernutrition. *Annual Review Of Public Health*. 38:259–277 (2017).
- 61 李国栋等. 气候变化对传染病爆发流行的影响研究进展. *生态学报* 33, 6762–6773 (2013).
- 62 Zhao, Q. et al. Global climate change and human health: Pathways and possible solutions. *Eco-Environment & Health* 1, 53–62 (2022).
- 63 Fussell, J. C. & Kelly, F. J. Mechanisms underlying the health effects of desert sand dust. *Environment International* 157, 106790 (2021).
- 64 Liu, T. et al. Ambient Temperature and Years of Life Lost: A National Study in China. *Innovation (New York, N.Y.)* 2, 100072 (2021).
- 65 Li, C. et al. Projecting future risk of dengue related to hydrometeorological conditions in mainland China under climate change scenarios: a modelling study. *The Lancet Planetary Health* 7, e397–e406 (2023).
- 66 Li, M. et al. Temperature, temperature extremes, and cause-specific respiratory mortality in China: a multi-city time series analysis. *Air Quality, Atmosphere & Health* (2019).
- 67 马文娟. 温度对我国 16 城市居民死亡影响的研究, 复旦大学, (2014).
- 68 Chen, R. et al. Association between ambient temperature and mortality risk and burden: time series study in 272 main Chinese cities. *BMJ* 363, k4306 (2018).
- 69 Huang, C. et al. Projecting future heat-related mortality under climate change scenarios: a systematic review. *Environ Health Perspect* 119, 1681–1690 (2011).
- 70 Gasparri, A. et al. Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios. *Lancet Planet Health* 1, e360–e367 (2017).
- 71 Liu, Z. et al. Daily Temperature and Bacillary Dysentery: Estimated Effects, Attributable Risks, and Future Disease Burden in 316 Chinese Cities. *Environ Health Perspect* 128, 57008 (2020).
- 72 Ding, F. et al. Climate drives the spatiotemporal dynamics of scrub typhus in China. *Glob Chang Biol* 28, 6618–6628 (2022).
- 73 Zhao, Q. et al. Modeling the Present and Future Incidence of Pediatric Hand, Foot, and Mouth Disease Associated with Ambient Temperature in Mainland China. *Environ Health Perspect* 126, 047010 (2018).
- 74 Carlson, C. J. et al. Climate change increases cross-species viral transmission risk. *Nature* 607, 555–562 (2022).
- 75 Yang, J. et al. Projecting heat-related excess mortality under climate change scenarios in China. *Nat Commun* 12, 1039 (2021).
- 76 Li, T. et al. Long-term projections of temperature-related mortality risks for ischemic stroke, hemorrhagic stroke, and acute ischemic heart disease under changing climate in Beijing, China. *Environ Int* 112, 1–9 (2018).
- 77 Hu, J. et al. Temperature-related mortality in China from specific injury. *Nat Commun* 14, 37 (2023).



空气污染与气候变化的交互影响

气候变化，主要由大气中温室气体的积累引起，是全球环境变化的主要驱动力，其影响主要在几十年到几个世纪的时间尺度上体现。相比之下，空气污染则主要在地表附近产生，其影响的时间尺度通常为几天到几周，空间尺度从局地到区域不等。然而，尽管两者在空间和时间尺度上存在明显差异，但它们之间存在着密切的相互作用关系¹⁻³。一方面，大气污染物会改变辐射强迫，从而影响气候；另一方面，气候变化可能导致空气质量恶化，进一步加剧空气污染对环境和健康的负面影响³⁻⁷。

3.1.1 气候变化对空气污染的影响机制

(1) 气候变化对自然源排放的影响

气候变暖导致温湿度和降水发生变化，进而影响生态系统、植被分布、土壤和海洋等环境，并对生物地球化学循环产生影响，从而改变自然源排放情况。

生物挥发性有机物排放 (BVOCs) BVOCs 主要包括异戊二烯和单萜烯等，是大气中臭氧和二次颗粒物的重要前体物质⁸。辐射、温度、叶片状态和大气中 CO₂ 的浓度会对 BVOCs 的排放产生影响^{8,9}。

野火排放 野火排放大量的黑碳、有机碳及其他有毒有害物质，是重要的空气污染源¹⁰。气候变暖，尤其是温度和降水的变化，通常会改变野火发生的风险，同时土壤湿度、闪电和风等因素也会对野火发生产生影响¹¹。

沙尘排放 沙尘的发生和强度受土壤成分、土壤粒径、土壤湿度、大气稳定性、降水、近地面风速和植被等因素的影响¹²。同时，气候变化也会影响沙尘的传输和沉降。

土壤 NO_x 排放 土壤中的 NO_x 排放与硝化和反硝化过程有关，这些过程对温度、降水、土壤水分以及碳和养分含量敏感¹³。由于酶活性随着温度升高而增加，预计到本世纪末，非农业生态系统的总固氮量可能比 2000 年增加 40%³。

闪电 NO_x 排放 闪电排放的 NO_x 约占全球 NO_x 总排放量的 10%¹⁴。气候变暖将伴随云顶高度的抬升和雷电强度的增强，从而导致雷电排放的 NO_x 显著增加¹⁵。

湿地甲烷排放 湿地是大气中甲烷排放的主要来源之一¹⁶。湿地甲烷排放与温度和水位高度等因素相

关¹⁷。由于气候变化的影响，2007–2021 年全球甲烷年均排放量较 2000–2006 年增加了 5–6%¹⁸。

海洋排放 海洋排放主要包括海洋飞沫排放的颗粒物以及浮游植物排放的二硫化物 (DMS)¹⁹。气候变化引起的温度和风速变化会影响海洋排放，而 CO₂ 变化也会影响海洋的酸度，从而影响海洋浮游植物排放 DMS²⁰。

(2) 气候变化对人为源排放的影响

除对自然源排放的影响以外，气候变化也会通过对人类活动、能源系统、社会经济等方面的影响对人为源排放产生深远影响。例如，温度升高可增加肥料中氮的挥发，影响作物产量，农民往往通过增加施肥量以弥补氮损失，但最终导致更多的氮挥发²¹。此外，随着温度的改变，居民冬季取暖和夏季制冷的需求增加，由此带来生活源排放的增加²²。气候变化对人为源排放影响的机制复杂，亟待进一步研究。

(3) 气候变化对大气化学、传输和沉降的影响

除对排放影响之外，气候变化还通过影响污染物的物理过程和化学生成、大气传输、干、湿沉降等对空气质量产生影响²³。

温度是影响局地空气质量的重要气象因素，因此全球气温上升，可能会影响一系列大气物理、化学过程。例如，温度升高会降低过氧乙酰硝酸酯的大气寿命，影响臭氧的生成²³。同时，温度可以通过改变光化学反应速率影响二次颗粒物的生成，还可以通过调节气固平衡影响某些颗粒物组分浓度^{24,25}。

大气污染物的传输受风向、风速、锋面等与气候变化有关的多尺度因素影响²⁶⁻²⁸。气候变化可能降低中纬度气旋和冷锋的发生频率，改变风的速度和方向，影响大气污染物的长距离传输，导致静稳天的频率增加，易于污染物累积²⁹⁻³²。此外，气候变化可能会改变大气的稳定性和混合层高度，从而影响大气污染物的垂直扩散²³。

气候变化可能改变降水的模式和强度，从而影响大气污染物的湿沉降。例如，如果气候变暖导致降雨增加，可能会增加污染物从大气到地表的移动，反之则可能会减少。同时，温度和湿度的变化，可能会影响大气污染物的性质和地表的性质，从而改变污染物干沉降的速率³³。

3.1.2 极端气候事件对空气污染的影响

(1) 极端高温 - 干旱对空气污染的影响

随气候变化，极端气候事件越来越频繁，持续时间和发生强度也越来越大。极端高温天气会加剧空气污染的程度，研究发现中国华北平原超50%的臭氧污染都伴随着极端高温³⁴。一方面，高温提高了大气中的化学反应速率³⁵，促进了对VOCs等物质的氧化，直接影响臭氧生成的速率³⁶；另一方面，高温天气往往伴随着下沉气流，大气循环处于静稳状态，风速较低³⁷，使得污染物更容易积聚在地面，加剧了空气污染。

此外，高温往往伴随着干旱事件的发生，高温天气会使得蒸发加剧，湿度降低，土壤和植被水分流失。在干旱条件下，植物的光合作用和蒸腾作用都会受到抑制，从而导致VOCs排放量的下降³⁸，进而影响颗粒物和臭氧的浓度。

(2) 台风对空气污染影响

目前观测和模式模拟表明，随着全球气候变暖，西北太平洋海盆中台风发生频次减少，但台



风强度在缓慢地加强³⁹⁻⁴¹。因此，气候变化背景下台风特性的改变对中国空气污染状况可能会产生重要的影响。台风影响范围内的大风和极端降水够使臭氧和颗粒物浓度迅速降低^{42,43}，但台风外围的天气条件对夏季、秋季中国的空气污染形成和发展有显著的促进作用^{34,44}。台风的临近极大地增强了生物源排放和跨区域臭氧输送，增量分别达到78.0%和22.5%³⁴。

(3) 极端低温对空气污染的影响

低温会促使人们增加对取暖设备的使用，进而导致颗粒物和其他污染物的排放增加；极端低温通常伴随着静稳天气条件，即风速减小和大气稳定性增加，从而降低大气污染物的扩散能力，使污染物更容易积累；同时，低温环境还可能降低混合层高度，限制了污染物的垂直扩散；此外，低温会影响大气化学反应的过程。虽然某些光化学反应在低温条件下可能会减慢，但在低温和高湿度条件下，一些颗粒物形成的化学反应却可能得到促进。例如，低温可能会加速硫酸盐的液相生成速率^{45,46}，从而进一步推高颗粒物的浓度。

短寿命气候强迫因子 (SLCFs) 不仅会对气候产生影响, 它们本身也是大气污染物。SLCFs 主要包括氮氧化物 (NO_x)、一氧化碳 (CO)、二氧化硫 (SO_2)、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、臭氧 (O_3)、挥发性有机化合物 (VOCs)、氨气等。相较温室气体, 多数 SLCFs 在空气中存留的时间较短, 一般只有几个小时到几个月。这些污染物可以通过改变地气系统的辐射平衡从而影响气候。例如, 气溶胶不仅可以吸收、散射短波和长波辐射, 还作为云凝结核和冰核影响云的辐射特性、云的生命期及降水特性, 对气候有冷却或者增暖的作用^{47,48}。

3.2.1 典型污染事件对天气气候的影响

(1) 沙尘事件对天气气候的影响

沙尘可以通过散射和吸收地球 - 大气系统中的短波和长波辐射来直接影响气候^{49,50}, 沙尘气溶胶的增加能够降低地表温度, 对全球变暖产生负反馈效应^{51,52}。沙尘还可以充当云凝结核或冰核, 通过改变云反照率和降雨分布间接影响气候⁵³。同时, 当沙尘颗粒沉积在海洋表面时, 可以为海洋生态系统提供营养物质, 进而刺激浮游植物的生长, 从大气中吸收二氧化碳, 最终可能影响全球碳循环^{54,55}。

(2) 野火事件对天气气候的影响

野火事件产生的气溶胶和温室气体在地球气候系统中扮演着重要角色, 是全球气候变化的重要驱动因子之一^{56,57}。野火排放的颗粒物能够散射太阳辐射、延长云寿命并提高云反照率, 从而产生降温作用; 此外, 野火又通过破坏地表植被来影响下垫面反照率、潜热和感热通量等, 进一

步对大气产生反馈作用。

(3) COVID-19 封控期间污染物减排对天气气候的影响

新冠疫情导致 2020 年全球人类活动显著降低, 交通、工业和商业活动的减少使得气溶胶排放量也相应减少, 这对大气辐射平衡以及天气气候产生了重要影响。研究发现 COVID-19 期间气溶胶及其前体排放的减少, 使得人为气溶胶减少引起的大气冷却效应减弱, 导致全球不同区域产生一定的地表增温, 区域增温最高可达 $+0.3^\circ\text{C}$, 但对全球平均地表温度的影响仅约为 $+0.03^\circ\text{C}$ ⁵⁸。另有研究发现新冠疫情期间北半球大陆地区的地表温度显著升高, 并且随着减排时间的持续增加, 大气增温的影响越来越明显⁵⁹。

疫情封控措施对区域极端降水也具有重要贡献。研究发现受封控影响, 中国东部地区气溶胶排放量减少, 导致该区域大气异常加热, 加剧了夏季海陆温差, 导致西北太平洋出现海平面气压正异常, 从而增强了向中国东部的水汽输送及该区域的降水⁶⁰。另有研究发现封控期间亚洲地区气溶胶的减少增加了到达地表的太阳辐射, 使北印度 - 青藏高原地区升温约 1.5K , 加速了水汽向印度大陆的输送, 使印度中部的夏季平均降雨量增加了 $5\% - 15\%$ ⁶¹。

3.2.2 长期污染防控政策对气候的影响

在过去几十年里, 随着欧美地区长期污染防控政策的实施, 使这两个地区气溶胶及其前体物的排放量减少^{62,63}。各种长期地面观测、卫星反演及模式模拟的数据均显示, 1980 年以来气溶胶的减少导致了美国东部大气层顶 $+0.8\text{W}/\text{m}^2$ 的直

接辐射效应和 $+1.0\text{W}/\text{m}^2$ 的间接辐射效应，使得美国中东部出现了 $0.5\text{--}1.0^\circ\text{C}$ 的增温^{64,65}。在欧洲地区，相比 1981—1985 年，2001—2005 年间气溶胶减少造成大气层顶产生 $+1.26\text{W}/\text{m}^2$ 的辐射效应⁶⁶，1980—2018 年期间硫酸盐的减少造成 $+2.0\text{W}/\text{m}^2$ 辐射效应⁶⁷。

自 2013 年中国实施“大气污染防治行动计划”等一系列污染防控政策以来，颗粒物污染防治取得了显著的成效⁶⁸，人为气溶胶排放量 2013—2017 年减少了 21—59%⁶⁸，74 个城市年均细颗粒物的浓度在此期间下降了 33.3%⁶⁹。虽然颗粒物污染得到改善，但是对流层臭氧污染加剧^{70,71}。这期间中国气溶胶的减少造成中国东部大气层顶产生 $+1.18\text{W}/\text{m}^2$ 的辐射效应，对流层臭氧的增加加剧了正的辐射效应⁷²。研究发现 2013—2017 年中国气溶胶的减少造成中国东部增温 0.09°C ，对流层臭氧的增加进一步使气候变暖，协同作用造成中国东部增温 0.16°C ⁷³。

综上所述，大气污染物—气候系统相互作用同时涉及到大气环境、天气、气候变化这几个关系到国计民生和社会经济协调发展的重要研究领域。大气中短寿命的化学物质臭氧和气溶胶对人体健康和生态系统均有着直接的危害，是当前空气污染治理的主要对象。同时这些化学物质还是仅次于长寿命温室气体影响气候变化的重要大气成分。对流层臭氧能够引起气候增暖。气溶胶吸收、散射短波和长波辐射，还作为云凝结核影响云的辐射特性、云的生命史及降水特性，从而导致气候变化。同时，大气污染物除了受到排放的影响而外，还受到气候变化的影响。气候变化引起大多数自然源排放以及一些人为排放的排放量发生变化，从而导致气候反馈。气候变化（例如边界层厚度、风速风向、温度、湿度和降雨等的变化）还会影响大气化学和物理过程（例如大气化学反应速率、污染物的传输和沉降等），从而影响大气成分导致气候反馈。

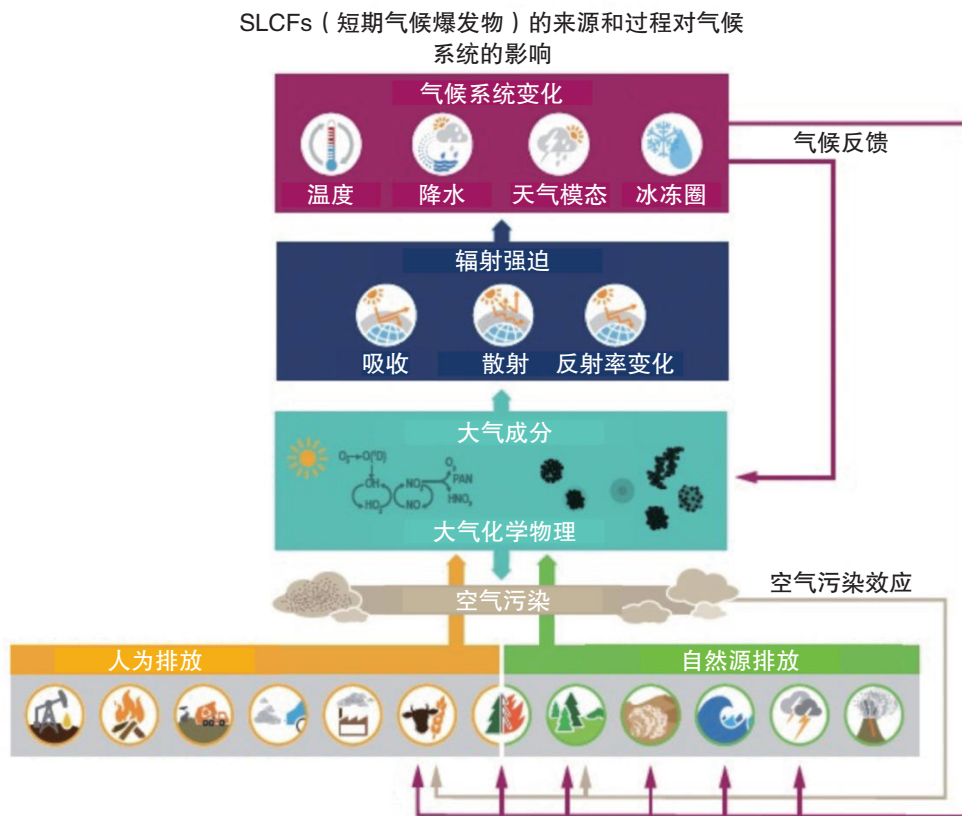


图 3-1 空气污染与气候系统的相互作用（翻译自：IPCCA R6 WGI 报告，图 6.1）⁷⁴

▼ 参考文献

- 1 Fiore, A. M. et al. Global air quality and climate. *Chemical Society Reviews* 41, 6663–6683 (2012).
- 2 West, J. J. et al. Co-benefits of mitigating global greenhouse gas emissions for future air quality and human health. *Nature Climate Change* 3, 885–889 (2013).
- 3 IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* (Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021).
- 4 Lin, J. et al. Global climate forcing of aerosols embodied in international trade. *Nature Geoscience* 9, 790–794 (2016).
- 5 Zhang, H., Xie, B. & Wang, Z. Effective Radiative Forcing and Climate Response to Short-Lived Climate Pollutants Under Different Scenarios. *Earths Future* 6, 857–866 (2018).
- 6 Zhang, Y., Liao, H., Ding, X., Jo, D. & Li, K. Implications of RCP emissions on future concentration and direct radiative forcing of secondary organic aerosol over China. *Science of the Total Environment* 640, 1187–1204 (2018).
- 7 Zhu, J. & Liao, H. Future ozone air quality and radiative forcing over China owing to future changes in emissions under the Representative Concentration Pathways (RCPs). *Journal of Geophysical Research–Atmospheres* 121, 1978–2001 (2016).
- 8 Ng, N. L. et al. Nitrate radicals and biogenic volatile organic compounds: oxidation, mechanisms, and organic aerosol. *Atmospheric Chemistry and Physics* 17, 2103–2162 (2017).
- 9 Wang, X. et al. Numerical model to quantify biogenic volatile organic compound emissions: The Pearl River Delta region as a case study. *Journal of Environmental Sciences* 46, 72–82 (2016).
- 10 Chen, J. et al. A review of biomass burning: Emissions and impacts on air quality, health and climate in China. *Science of the Total Environment* 579, 1000–1034 (2017).
- 11 Jones, M. W. et al. Global and regional trends and drivers of fire under climate change. *Reviews of Geophysics* 60, e2020RG000726 (2022).
- 12 D' Odorico, P., Bhattachan, A., Davis, K. F., Ravi, S. & Runyan, C. W. Global desertification: Drivers and feedbacks. *Advances in Water Resources* 51, 326–344 (2013).
- 13 Young, P. J. et al. Tropospheric Ozone Assessment Report: Assessment of global-scale model performance for global and regional ozone distributions, variability, and trends. *Elem Sci Anth* 6, 10 (2018).
- 14 Murray, L. T. Lightning NO_x and impacts on air quality. *Current Pollution Reports* 2, 115–133 (2016).


- 15 Thornhill, G. et al. Climate-driven chemistry and aerosol feedbacks in CMIP6 Earth system models. *Atmospheric Chemistry and Physics* 21, 1105–1126 (2021).
- 16 Saunio, M. et al. The global methane budget 2000–2017. *Earth System Science Data* 12, 1561–1623 (2020).
- 17 Gedney, N., Cox, P. & Huntingford, C. Climate feedback from wetland methane emissions. *Geophysical Research Letters* 31 (2004).
- 18 Nisbet, E. G. Climate feedback on methane from wetlands. *Nature Climate Change* 13, 421–422 (2023).
- 19 Saliba, G. et al. Factors driving the seasonal and hourly variability of sea-spray aerosol number in the North Atlantic. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116, 20309–20314 (2019).
- 20 Barthel, S., Tegen, I. & Wolke, R. Do new sea spray aerosol source functions improve the results of a regional aerosol model? *Atmospheric Environment* 198, 265–278 (2019).
- 21 Shen, H. et al. Intense warming will significantly increase cropland ammonia volatilization threatening food security and ecosystem health. *One Earth* 3, 126–134 (2020).
- 22 Zhu, D. et al. Temporal and spatial trends of residential energy consumption and air pollutant emissions in China. *Applied Energy* 106, 17–24 (2013).
- 23 Jacob, D. J. & Winner, D. A. Effect of climate change on air quality. *Atmospheric Environment* 43, 51–63 (2009).
- 24 Aw, J. & Kleeman, M. J. Evaluating the first-order effect of intraannual temperature variability on urban air pollution. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108 (2003).
- 25 Sheehan, P. E. & Bowman, F. M. Estimated effects of temperature on secondary organic aerosol concentrations. *Environmental Science & Technology* 35, 2129–2135 (2001).
- 26 Giovannini, L. et al. Atmospheric pollutant dispersion over complex terrain: Challenges and needs for improving air quality measurements and modeling. *Atmosphere* 11, 646 (2020).
- 27 Kim, K. H., Lee, S.-B., Woo, D. & Bae, G.-N. Influence of wind direction and speed on the transport of particle-bound PAHs in a roadway environment. *Atmospheric Pollution Research* 6, 1024–1034 (2015).
- 28 Zoras, S., Triantafyllou, A. & Deligiorgi, D. Atmospheric stability and PM₁₀ concentrations at far distance from elevated point sources in complex terrain: Worst-case episode study. *Journal of Environmental Management* 80, 295–302 (2006).
- 29 Forkel, R. & Knoche, R. Regional climate change and its impact on photooxidant concentrations in southern Germany: Simulations with a coupled regional climate-chemistry model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 111 (2006).
- 30 Mickley, L. J., Jacob, D. J., Field, B. & Rind, D. Effects of future climate change on regional air

pollution episodes in the United States. *Geophysical Research Letters* 31 (2004).

- 31 Murazaki, K. & Hess, P. How does climate change contribute to surface ozone change over the United States? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 111 (2006).
- 32 Wu, S. et al. Effects of 2000–2050 global change on ozone air quality in the United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 113 (2008).
- 33 Vet, R. et al. A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus. *Atmospheric Environment* 93, 3–100 (2014).
- 34 Wang, N. et al. Typhoon–boosted biogenic emission aggravates cross–regional ozone pollution in China. *Science Advances* 8, eabl6166 (2022).
- 35 Kalisa, E., Fadlallah, S., Amani, M., Nahayo, L. & Habiyaremye, G. Temperature and air pollution relationship during heatwaves in Birmingham, UK. *Sustainable Cities and Society* 43, 111–120 (2018).
- 36 Coates, J., Mar, K. A., Ojha, N. & Butler, T. M. The influence of temperature on ozone production under varying NO_x conditions—a modelling study. *Atmospheric Chemistry and Physics* 16, 11601–11615 (2016).
- 37 Parker, T. J., Berry, G. J. & Reeder, M. J. The influence of tropical cyclones on heat waves in Southeastern Australia. *Geophysical Research Letters* 40, 6264–6270 (2013).
- 38 Feller, U. & Vaseva, I. I. Extreme climatic events: impacts of drought and high temperature on physiological processes in agronomically important plants. *Frontiers in Environmental Science* 2, 39 (2014).
- 39 Hong, C.–C. et al. Future changes in tropical cyclone intensity and frequency over the western North Pacific based on 20–km HiRAM and MRI models. *Journal of Climate* 34, 2235–2251 (2021).
- 40 Knutson, T. et al. Tropical cyclones and climate change assessment: Part II: Projected response to anthropogenic warming. *Bulletin of the American Meteorological Society* 101, E303–E322 (2020).
- 41 Wang, G., Wu, L., Mei, W. & Xie, S.–P. Ocean currents show global intensification of weak tropical cyclones. *Nature* 611, 496–500 (2022).
- 42 Jiang, F. et al. An ozone episode in the Pearl River Delta: Field observation and model simulation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 115 (2010).
- 43 Liu, W. et al. An aerosol air pollution episode affected by binary typhoons in east and central China. *Atmospheric Pollution Research* 9, 634–642 (2018).
- 44 Qu, K. et al. A comparative study to reveal the influence of typhoons on the transport, production and accumulation of O₃ in the Pearl River Delta, China. *Atmospheric Chemistry and Physics* 21, 11593–11612 (2021).
- 45 Wang, G. et al. Persistent sulfate formation from London Fog to Chinese haze. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113, 13630–13635 (2016).

- 46 Wang, W. et al. Sulfate formation is dominated by manganese-catalyzed oxidation of SO₂ on aerosol surfaces during haze events. *Nature Communications* 12, 1993 (2021).
- 47 Anderson, T. L. et al. Climate forcing by aerosols—a hazy picture. *Science* 300, 1103–1104 (2003).
- 48 Haywood, J. & Boucher, O. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review. *Reviews of geophysics* 38, 513–543 (2000).
- 49 Satheesh, S. & Moorthy, K. K. Radiative effects of natural aerosols: A review. *Atmospheric Environment* 39, 2089–2110 (2005).
- 50 Lambert, F. et al. The role of mineral-dust aerosols in polar temperature amplification. *Nature Climate Change* 3, 487–491 (2013).
- 51 Kaufman, Y. J., Tanré, D. & Boucher, O. A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature* 419, 215–223 (2002).
- 52 Allen, R. J., Landuyt, W. & Rumbold, S. T. An increase in aerosol burden and radiative effects in a warmer world. *Nature Climate Change* 6, 269–274 (2016).
- 53 Pósfai, M. & Buseck, P. R. Nature and climate effects of individual tropospheric aerosol particles. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 38, 17–43 (2010).
- 54 Hand, J. et al. Estimates of atmospheric-processed soluble iron from observations and a global mineral aerosol model: Biogeochemical implications. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 109 (2004).
- 55 Conway, T. M., Wolff, E. W., Röthlisberger, R., Mulvaney, R. & Elderfield, H. Constraints on soluble aerosol iron flux to the Southern Ocean at the Last Glacial Maximum. *Nature Communications* 6, 7850 (2015).
- 56 Aldersley, A., Murray, S. J. & Cornell, S. E. Global and regional analysis of climate and human drivers of wildfire. *Science of the Total Environment* 409, 3472–3481 (2011).
- 57 Langmann, B., Duncan, B., Textor, C., Trentmann, J. & Van Der Werf, G. R. Vegetation fire emissions and their impact on air pollution and climate. *Atmospheric Environment* 43, 107–116 (2009).
- 58 Gettelman, A., Lamboll, R., Bardeen, C. G., Forster, P. M. & Watson-Parris, D. Climate impacts of COVID-19 induced emission changes. *Geophysical Research Letters* 48, e2020GL091805 (2021).
- 59 Yang, Y. et al. Fast climate responses to aerosol emission reductions during the COVID-19 pandemic. *Geophysical Research Letters* 47, e2020GL089788 (2020).
- 60 Yang, Y. et al. Abrupt emissions reductions during COVID-19 contributed to record summer rainfall in China. *Nature Communications* 13, 959 (2022).
- 61 Fadnavis, S. et al. The impact of COVID-19 lockdown measures on the Indian summer monsoon. *Environmental Research Letters* 16, 074054 (2021).

- 62 Hoesly, R. M. et al. Historical (1750–2014) anthropogenic emissions of reactive gases and aerosols from the Community Emissions Data System (CEDS). *Geoscientific Model Development* 11, 369–408 (2018).
- 63 Smith, S. J. et al. Anthropogenic sulfur dioxide emissions: 1850–2005. *Atmospheric Chemistry and Physics* 11, 1101–1116 (2011).
- 64 Leibensperger, E. et al. Climatic effects of 1950–2050 changes in US anthropogenic aerosols–Part 2: Climate response. *Atmospheric Chemistry and Physics* 12, 3349–3362 (2012).
- 65 Leibensperger, E. M. et al. Climatic effects of 1950–2050 changes in US anthropogenic aerosols–Part 1: Aerosol trends and radiative forcing. *Atmospheric Chemistry and Physics* 12, 3333–3348 (2012).
- 66 Pozzoli, L. et al. Re-analysis of tropospheric sulfate aerosol and ozone for the period 1980–2005 using the aerosol–chemistry–climate model ECHAM5–HAMMOZ. *Atmospheric Chemistry and Physics* 11, 9563–9594 (2011).
- 67 Yang, Y., Lou, S., Wang, H., Wang, P. & Liao, H. Trends and source apportionment of aerosols in Europe during 1980–2018. *Atmospheric Chemistry and Physics* 20, 2579–2590 (2020).
- 68 Zheng, B. et al. Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions. *Atmospheric Chemistry and Physics* 18, 14095–14111 (2018).
- 69 Huang, J., Pan, X., Guo, X. & Li, G. Health impact of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan: an analysis of national air quality monitoring and mortality data. *Lancet Planet Health* 2, e313–e323 (2018).
- 70 Li, K. et al. Anthropogenic drivers of 2013–2017 trends in summer surface ozone in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116, 422–427 (2019).
- 71 Lu, X. et al. Severe surface ozone pollution in China: a global perspective. *Environmental Science & Technology Letters* 5, 487–494 (2018).
- 72 Dang, R. & Liao, H. Radiative forcing and health impact of aerosols and ozone in China as the consequence of clean air actions over 2012–2017. *Geophysical Research Letters* 46, 12511–12519 (2019).
- 73 Gao, J. et al. Fast climate responses to emission reductions in aerosol and ozone precursors in China during 2013–2017. *Atmospheric Chemistry and Physics* 22, 7131–7142 (2022).
- 74 Szopa, S. et al. Short-Lived Climate Forcers. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson–Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. P é an, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 817–922, (2021).



空气污染与 气候变化的 协同健康 效应

气候变化与空气污染是当前全球面临的两大主要挑战。气象条件对大气污染物的形成、积累、扩散等产生强烈影响，而全球气候变化引起的气象条件改变进一步影响空气污染的特征，包括发生频次、理化成分和严重程度等，进而直接或间接地影响人群健康^{1,2}。

04

臭氧 (O₃) 和 PM_{2.5} 都是对人类健康具有重大影响的大气污染物。臭氧是一种二次污染物，由氮氧化物和挥发性有机物等前体物质在阳光照射下的光化学反应产生。影响臭氧浓度的主要气象因素包括紫外线辐射、云量、温度、风向和风速等^{1,3}。PM_{2.5} 的来源多样化，既包括交通尾气、野火、发电厂等直接排放源，也包括前体气体在大气中的化学反应产生的二次源⁴。

不利的气象条件是导致严重雾霾和持续性空气污染的主要外部原因之一。气温通过调节大气环流和影响化学反应，与大气污染物浓度紧密相关。降雨可以通过湿沉降作用减轻空气污染，增加的风速有助于加强近地表空气流动，有利于污染物的扩散和稀释。而高湿度条件下，氮氧化物和硫化物更易从气相转化为颗粒相，增加了雾霾事件的发生概率⁵。频繁出现的极端降水事件可能与温室气体和气溶胶污染有关。

在中国长三角地区的一项研究发现，空气污染会增加形状参数 - 斜率参数关系、降雨动能 - 降雨强度关系的不确定性⁶。四川盆地的大气模拟实验表明，气溶胶通过吸收太阳辐射和增加盆地大气的日间稳定性来抑制对流。多余的潮湿空气被输送到山区并随地形抬升，导致夜间产生强对流和极端强降水⁷。

复合极端事件是指两个或多个极端事件同时发生，或多个事件组合加强形成一个极端事件⁸。由于相似的气象驱动因素，空气污染事件与极端天气事件容易形成更具有健康威胁的复合事件。同时，二者的健康效应往往是非线性的，因此复

合极端事件暴露的健康影响不同于单一极端事件健康影响的加和^{9,10}。

热浪与 O₃ 污染通常在温暖季节同时发生，目前已成为全球范围内对健康威胁最大的复合事件之一^{11,12}。停滞的高压系统有利于热量和 O₃ 前体物的积累，是热浪与 O₃ 污染复合事件发生的主要驱动因素¹³。一项预估研究探讨了全球范围内高温与 O₃ 污染复合暴露日及其对人口的影响，结果表明这种复合事件正呈快速增长趋势。与 1995–2014 年的基线相比，到 2071–2090 年，在中高等强迫情景下 (SSP3–7.0)，年平均复合事件天数预计增加 34.6 天，人群暴露量增加 9350 万人日¹¹。

冬季颗粒物污染事件受逆温和大气停滞现象影响，并可能与寒潮形成复合极端事件。一项关于气候变化对中国空气质量影响的预测研究显示，在代表性浓度路径 4.5 (RCP4.5) 下，与 2006–2010 年相比，到 2046–2050 年，中国 74 个主要城市冬季 PM_{2.5} 浓度超标天数预计将显著增加，其中大气停滞事件与高污染天数的重叠超过 70%¹⁴。

对于热浪与 O₃ 复合暴露事件的健康影响，目前已逐渐形成共识。随着近年来热浪事件的频繁发生，探索应对这种复合暴露事件的适应性行为变得尤为必要和迫切。此外，低温引起的健康风险也不容忽视，尤其是与颗粒物污染的复合暴露可能导致更严重的健康影响。这些复合暴露的健康效应以及在气候变化背景下的未来发展趋势仍需进一步研究。

4.2

空气污染修饰气象因素的协同健康效应

空气污染和气象因素已被证明可独立产生不良健康效应，同时大气污染物修饰气象因素的健康效应正逐步受到关注。空气污染可能加剧非适宜温度短期暴露相关的死亡风险，尤其 PM_{10} 和 O_3 对高温相关的死亡风险具有修饰作用¹⁵⁻¹⁹。一项包括中国在内的对全球 482 个地区开展的多中心人群研究结果显示， $PM_{2.5}$ 、 O_3 和 NO_2 水平升高可导致与高温相关的心血管系统和呼吸系统疾病死亡风险增大，其中对呼吸系统疾病死亡的修饰作用更强(表 4-1)¹⁵。上海的一项研究也报道了 $PM_{2.5}$ 暴露可增加寒流对呼吸系统疾病死亡率的影响¹⁶。

空气污染对非适宜温度暴露相关的人群疾病发病和患病风险可能存在效应修饰作用，然而研究证据相对有限，目前主要关注的健康结局包括儿童哮喘^{20,21} 和水痘²²。同时，有证据表明空气污染可能修饰温度变异度相关的健康风险^{23,24}，如高浓度 $PM_{2.5}$ 条件下，温度变异度相关的儿童哮喘住院风险高于低浓度 $PM_{2.5}$ 的情况²⁴。

空气污染对其他气象因素(如湿度、降水)

暴露相关的不良健康效应也可具有修饰作用。研究显示，对于气象因素暴露相关的传染病发病、患病风险，空气污染具有明显的效应修饰作用^{25,26}。例如，高浓度 SO_2 条件下环境湿度相关的儿童手足口病发病风险低于低浓度 SO_2 时的情况²⁵。

空气污染修饰气象因素产生不良健康效应的可能机制涉及氧化应激、炎症反应和细胞凋亡等²⁷。空气污染可能引起巨噬细胞损伤、植物神经功能失调和细胞周期阻滞等，导致暴露人群更易受到气象因素的影响²⁸。

空气污染对非适宜温度短期暴露相关的死亡风险具有修饰作用，但对非适宜温度暴露相关的发病和患病风险，以及其他气象因素(如湿度、降水)暴露相关的健康风险是否存在修饰作用仍有待进一步研究。空气污染对气象因素相关健康效应的修饰作用使得空气污染及气候变化的同步监测和治理变得更加迫切，提示在制定气象因素危害阈值或高温热浪预警系统时也需考虑空气污染的影响。

表 4-1 空气污染修饰热相关人群死亡风险¹⁵ (∗: $P < 0.05$)

大气污染物浓度组		% 风险变化百分比 (95% 置信区间)	
		心血管系统疾病死亡	呼吸系统疾病死亡
PM_{10}	低	2.07 (2.04–2.10)	9.90 (9.85–9.95)
	中	4.29 (4.26–4.32) ∗	12.21 (12.15–12.27) ∗
	高	7.33 (7.29–7.37) ∗	14.62 (14.49–14.74) ∗
$PM_{2.5}$	低	1.53 (1.48–1.58)	7.65 (7.60–7.69)
	中	3.81 (3.77–3.85) ∗	11.29 (11.21–11.38) ∗
	高	7.01 (6.94–7.07) ∗	14.32 (14.18–14.46) ∗
O_3	低	1.60 (1.58–1.61)	4.12 (4.09–4.15)
	中	5.16 (5.14–5.18) ∗	8.34 (8.31–8.38) ∗
	高	8.73 (8.69–8.76) ∗	13.53 (13.42–13.65) ∗
NO_2	低	6.18 (6.14–6.22)	13.12 (13.06–13.19)
	中	7.09 (7.05–7.12) ∗	14.89 (14.79–14.98) ∗
	高	8.56 (8.51–8.61) ∗	15.46 (15.33–15.58) ∗

气象因素对空气污染暴露相关的人群死亡风险存在修饰作用^{19,29-31}。研究发现,高温可增加PM_{2.5}、PM₁₀和O₃污染暴露相关的非意外死亡、心血管疾病和呼吸系统疾病死亡风险¹⁹;低温可增加O₃污染相关非意外死亡和SO₂污染相关过早死亡风险,但降低PM₁₀污染相关的呼吸系统疾病死亡²⁹。基于2013—2018年我国128个县人群的研究表明,在高温条件下(>75%分位数)O₃浓度每升高10μg/m³,每日非意外死亡、心血管疾病和呼吸系统疾病死亡风险分别增加0.44%、0.42%和0.50%;而在较适宜温度条件下(25%~75%分位数),O₃暴露相关的三类死亡风险分别增加0.36%、0.34%和0.39%³⁰。我国深圳的一项时间序列研究显示,低温可加剧NO₂暴露相关老年人和男性的心血管疾病死亡风险³¹。此外,气象因素可能修饰空气污染长期暴露相关的人群死亡风险³²。中国老年健康影响因素跟踪调查显示,在65岁及以上老年人群中,NO₂长期暴露的全因死亡风险在较冷气候条件和季节温度变化较大的地区更高³²。

气象因素对空气污染暴露的人群疾病发病和患病风险存在修饰作用^{29,33}。高温可增加PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、SO₂、O₃和CO污染相关的特异性皮炎门诊人次,呼吸和循环系统疾病及偏头痛急诊人次,院外心脏骤停发生,以及II型糖尿病、

中风和冠心病住院风险。低温也能增加PM_{2.5}、PM₁₀、CO和SO₂污染相关的神经系统疾病急诊人次,心力衰竭住院和死亡,急性冠脉综合征发生,以及慢性阻塞性肺疾病住院风险²⁹。季节也对空气污染相关疾病的发病存在修饰作用。在温暖季节CO和O₃污染相关的发病率更高,SO₂和NO₂污染相关的发病率更低,且18岁以下的儿童和75岁及以上的老年人是易感人群,但PM_{2.5}和PM₁₀污染相关的发病率不存在季节性差异³³。

气象因素对空气污染暴露相关的不良妊娠结局和儿童健康风险具有修饰作用³⁴⁻³⁶。高温可增加孕早期PM_{2.5}、CO、NO₂、SO₂和O₃暴露相关子代先天性心脏病风险³⁴。在温暖季节怀孕时,低温和低湿气候均能增加PM₁₀污染相关子代低出生体重风险³⁶。研究显示,气象因素能干扰细胞因子的生成并引发系统性炎症,也可导致血压和血液流变学指标改变³⁷⁻³⁹,这或许是其造成暴露人群更易受到空气污染影响的原因。

气象因素对空气污染相关健康效应的修饰作用因气象条件和污染物不同而存在差异,其中发育期胎儿、儿童及老年人为易感人群。目前的证据多来自时间序列研究,效应观察时间较短,且主要集中在气温及与之相关的季节因素上面,后续应采用队列研究进一步验证气象因素的修饰作用,并揭示其潜在的作用机制。

4.4

空气污染事件与极端天气事件复合暴露的协同健康效应

全球范围内高温热浪、干旱、洪水、台风等极端天气事件的发生频率、强度和持续时间呈现不同程度的增加。中国大陆地区极端偏暖事件有所增多，极端偏冷事件明显减少，气象干旱事件频率和影响范围增加，极端强降水事件持续增多。

《柳叶刀 2020 年中国健康与气候变化倒计时报告》指出：与 2001—2005 年相比，2016—2019 年中国 24 个省份人群的野火暴露天数有所增加，中国北部和东北地区增长最为迅速。同时，2000—2019 年间我国强台风发生频率大幅增加⁴⁰。政府间气候变化专门委员会第六次评估报告指出，随着未来气候变暖加剧，空气污染与极端天气事件同时发生的概率将增加，极端事件的复合暴露已成为新的气候危机⁴¹。

全球疾病负担研究已将空气污染与高温分别作为具有明确病因学证据的环境类危险因素⁴²。近年来，流行病学研究发现空气污染事件与极端天气事件复合暴露可能产生协同健康效应。研究

显示，寒潮与高浓度 PM_{2.5} 污染复合暴露相关的人群死亡风险高于两者单独暴露相关的死亡风险总和（图 4-1）⁴³。基于中国纵向健康长寿调查队列人群的研究显示，高温热浪与高浓度 PM_{2.5} 污染复合暴露对我国 65 岁及以上老年人高血压发病率存在升高的协同健康效应⁴⁴。广州出生队列的研究显示，孕期 PM_{2.5} 暴露与强度较小的热浪复合暴露对早产结局存在升高协同效应⁴⁵。我国 7 个城市的学龄前儿童回顾性队列研究显示，生命早期高温和高污染物水平（包括 PM₁₀ 和 SO₂）复合暴露增加儿童哮喘发病风险⁴⁶。

近年来，我国沙尘暴事件复现趋势明显。气候变化下，沙尘暴的频频发生对人群健康构成了严峻威胁。颗粒物（PM₁₀、PM_{2.5-10}）是与沙尘事件复合暴露的典型大气污染物。关于颗粒物污染与沙尘事件复合暴露是否具有协同健康效应，目前的研究结论尚不一致⁴⁷，颗粒物暴露相关的健康风险可能在沙尘日更高⁴⁸、更低⁴⁹、或与非沙

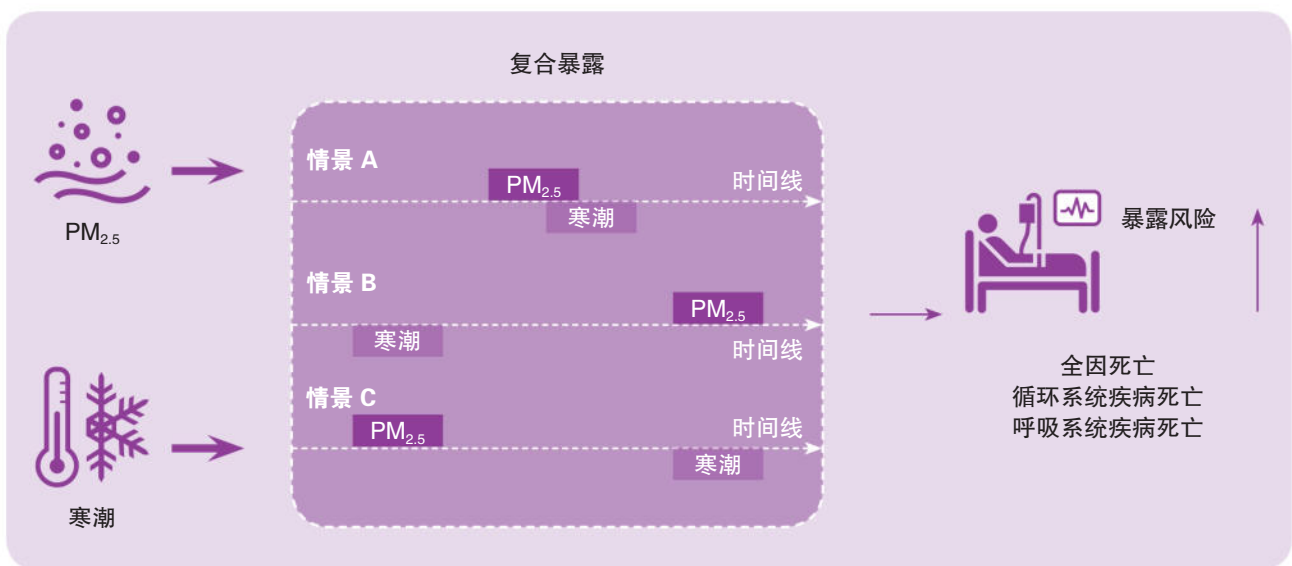


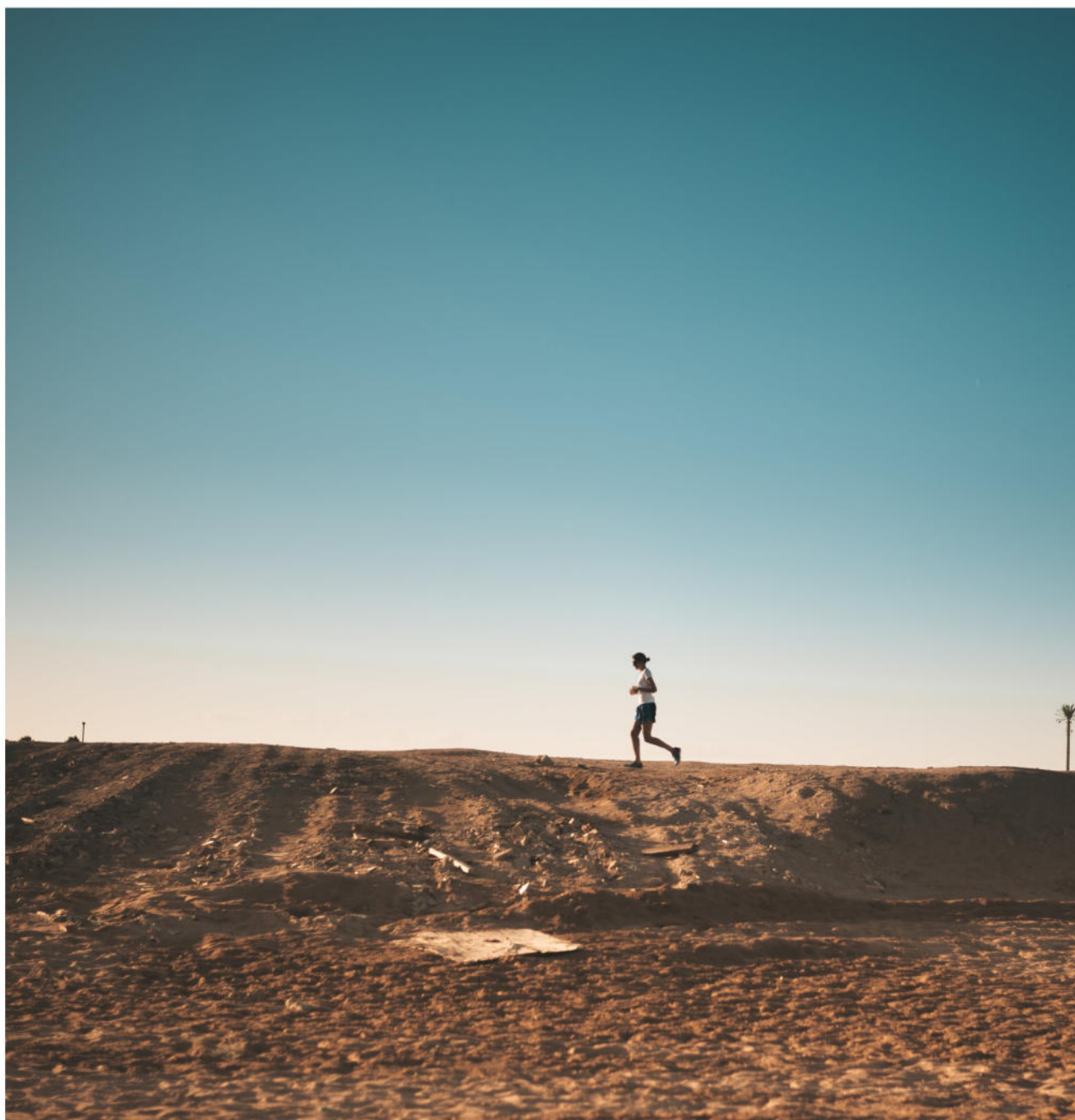
图 4-1 寒潮与高浓度 PM_{2.5} 事件复合暴露协同增加人群死亡风险⁴³

尘日无差异^{50,51}。

气候变化下，空气过敏原（如花粉）的种类、反应强度和分布特征会随之发生改变⁵²。尽管有证据表明大气污染物与空气过敏原的复合暴露具有协同健康效应，但目前相关研究证据比较有限，结论尚不明晰^{53,54}。

当前我国空气污染事件与极端天气事件复合

暴露的相关研究证据仍有待完善。虽有研究分析二者共同暴露的复合健康效应，但没有开发建立复合暴露指标。因此迫切需要开展系统性研究，明确空气污染事件和极端天气事件的复合暴露与人群健康的关系，并进一步厘清其空间异质性、敏感疾病、脆弱人群等特征，支撑精准预防策略的制定。



▼ 参考文献

- 1 Zhang, H., Wang, Y., Park, T.-W. & Deng, Y. Quantifying the relationship between extreme air pollution events and extreme weather events. *Atmospheric Research* 188, 64–79 (2017).
- 2 Sun, Y. et al. Examining the joint effects of heatwaves, air pollution, and green space on the risk of preterm birth in California. *Environ Res Lett* 15 (2020).
- 3 Kinney, P. L. Interactions of Climate Change, Air Pollution, and Human Health. *Curr Environ Health Rep* 5, 179–186 (2018).
- 4 Prospero, J. M. & Lamb, P. J. African Droughts and Dust Transport to the Caribbean: Climate Change Implications. *Science* 302, 1024–1027 (2003).
- 5 Li, R. et al. Air pollution characteristics in China during 2015–2016: Spatiotemporal variations and key meteorological factors. *Sci Total Environ* 648, 902–915 (2019).
- 6 Yang, Q. Q., Dai, Q., Chen, Y. H., Zhang, S. L. & Zhang, Y. R. Effects of Air Pollution on Rainfall Microphysics Over the Yangtze River Delta. *Journal of Geophysical Research–Atmospheres* 127 (2022).
- 7 Fan, J. W. et al. Substantial contribution of anthropogenic air pollution to catastrophic floods in Southwest China. *Geophys Res Lett* 42, 6066–6075 (2015).
- 8 Zhang, Y., Yang, P., Gao, Y., Leung, R. L. & Bell, M. L. Health and economic impacts of air pollution induced by weather extremes over the continental U.S. *Environ Int* 143, 105921 (2020).
- 9 Schwarz, L. et al. Spatial variation in the joint effect of extreme heat events and ozone on respiratory hospitalizations in California. *Proc Natl Acad Sci U S A* 118 (2021).
- 10 Sillmann, J. et al. Combined impacts of climate and air pollution on human health and agricultural productivity. *Environmental Research Letters* 16 (2021).
- 11 Ban, J., Lu, K., Wang, Q. & Li, T. Climate change will amplify the inequitable exposure to compound heatwave and ozone pollution. *One Earth* 5, 677–686 (2022).
- 12 Meehl, G. A. et al. Future heat waves and surface ozone. *Environmental Research Letters* 13 (2018).
- 13 Schnell, J. L. & Prather, M. J. Co-occurrence of extremes in surface ozone, particulate matter, and temperature over eastern North America. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 114, 2854–2859 (2017).
- 14 Hong, C. et al. Impacts of climate change on future air quality and human health in China. *Proc Natl Acad Sci U S A* 116, 17193–17200 (2019).
- 15 Rai, M. et al. Heat-related cardiorespiratory mortality: Effect modification by air pollution across 482 cities from 24 countries. *Environ Int* 174, 107825 (2023).

- 16 Huang, Y. et al. Exploring Health Effects under Specific Causes of Mortality Based on 90 Definitions of PM_{2.5} and Cold Spell Combined Exposure in Shanghai, China. *Environ Sci Technol* 57, 2423–2434 (2023).
- 17 Li, L. et al. Particulate matter modifies the magnitude and time course of the non-linear temperature–mortality association. *Environmental Pollution* 196, 423–430 (2015).
- 18 Hu, X. et al. Does air pollution modify temperature–related mortality? A systematic review and meta-analysis. *Environmental Research* 210, 112898 (2022).
- 19 Stafoggia, M. et al. Joint effect of heat and air pollution on mortality in 620 cities of 36 countries. *Environment International* 181, 108258 (2023).
- 20 Jin, X. et al. The modification of air particulate matter on the relationship between temperature and childhood asthma hospitalization: An exploration based on different interaction strategies. *Environmental Research* 214, 113848 (2022).
- 21 Pan, R. et al. Interactions between climate factors and air quality index for improved childhood asthma self-management. *Science of The Total Environment* 723, 137804 (2020).
- 22 Wang, H. et al. Association between meteorological factors and varicella incidence: a multicity study in Yunnan Province, China. *Environmental Science and Pollution Research* 30 (2023).
- 23 Luo, K., Li, R., Wang, Z., Zhang, R. & Xu, Q. Effect modification of the association between temperature variability and daily cardiovascular mortality by air pollutants in three Chinese cities. *Environmental Pollution* 230, 989–999 (2017).
- 24 Yan, S. et al. Seasonal characteristics of temperature variability impacts on childhood asthma hospitalization in Hefei, China: Does PM_{2.5} modify the association? *Environmental Research* 207, 112078 (2022).
- 25 Luo, C. et al. Long-term air pollution levels modify the relationships between short-term exposure to meteorological factors, air pollution and the incidence of hand, foot and mouth disease in children: a DLNM-based multicity time series study in Sichuan Province, China. *BMC Public Health* 22 (2022).
- 26 Li, C. et al. Modified effects of air pollutants on the relationship between temperature variability and hand, foot, and mouth disease in Zibo City, China. *Environmental Science and Pollution Research* 29, 44573–44581 (2022).
- 27 Montes, C. M., Demler, H. J., Li, S., Martin, D. G. & Ainsworth, E. A. Approaches to investigate crop responses to ozone pollution: from O₃-FACE to satellite-enabled modeling. *Plant J* 109, 432–446 (2022).
- 28 Zhu, C., Maharajan, K., Liu, K. & Zhang, Y. Role of atmospheric particulate matter exposure in COVID-19 and other health risks in human: A review. *Environ Res* 198, 111281 (2021).
- 29 Sillmann, J. et al. Combined impacts of climate and air pollution on human health and agricultural productivity. *Environ Res Lett* 16 (2021).
- 30 Shi, W. Y. et al. Modification effects of temperature on the ozone–mortality relationship: A nationwide

- multicounty study in China. *Environmental Science & Technology* 54, 2859–2868 (2020).
- 31 Duan, Y. et al. Effect of changes in season and temperature on cardiovascular mortality associated with nitrogen dioxide air pollution in Shenzhen, China. *Science of The Total Environment* 697, 134051 (2019).
 - 32 Ji, J. S. et al. NO₂ and PM_{2.5} air pollution co-exposure and temperature effect modification on pre-mature mortality in advanced age: a longitudinal cohort study in China. *Environmental Health* 21, 97 (2022).
 - 33 Bergmann, S. et al. Effect modification of the short-term effects of air pollution on morbidity by season: A systematic review and meta-analysis. *Sci Total Environ* 716, 136985 (2020).
 - 34 Jiang, W. et al. Independent and interactive effects of air pollutants and ambient heat exposure on congenital heart defects. *Reprod Toxicol* 104, 106–113 (2021).
 - 35 Tong, M. et al. The short-term effect of ozone on pregnancy loss modified by temperature: Findings from a nationwide epidemiological study in the contiguous United States. *Science of The Total Environment* 902, 166088 (2023).
 - 36 Wang, Q. et al. Interaction of Air Pollutants and Meteorological Factors on Birth Weight in Shenzhen, China. *Epidemiology* 30, S57–S66 (2019).
 - 37 Gostimirovic, M. et al. The influence of climate change on human cardiovascular function. *Arch Environ Occup Health* 75, 406–414 (2020).
 - 38 Wu, S. et al. Does ambient temperature interact with air pollution to alter blood pressure? A repeated-measure study in healthy adults. *Journal of Hypertension* 33, 2414–2421 (2015).
 - 39 Kahle, J. J. et al. Interaction effects of temperature and ozone on lung function and markers of systemic inflammation, coagulation, and fibrinolysis: a crossover study of healthy young volunteers. *Environmental Health Perspectives* 123, 310–316 (2015).
 - 40 Cai, W. J. et al. The 2020 China report of the Lancet Countdown on health and climate change. *Lancet Public Health* 6, E64–E81 (2021).
 - 41 IPCC. *Climate Change 2021*. doi:10.1007/s10584-021-03233-7 (2021).
 - 42 Murray, C. J. L. et al. Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet* 396, 1223–1249 (2020).
 - 43 Huang, Y. et al. Exploring health effects under specific causes of mortality based on 90 definitions of PM_{2.5} and cold spell combined exposure in Shanghai, China. *Environmental Science & Technology* 57, 2423–2434 (2023).
 - 44 Zhou, W. S. et al. Combined effects of heatwaves and air pollution, green space and blue space on the incidence of hypertension: A national cohort study. *Science of the Total Environment* 867 (2023).

- 45 Wang, Q. et al. Independent and combined effects of heatwaves and PM_{2.5} on preterm birth in Guangzhou, China: A survival analysis. *Environmental Health Perspectives* 128 (2020).
- 46 Lu, C. et al. Interaction effect of prenatal and postnatal exposure to ambient air pollution and temperature on childhood asthma. *Environment International* 167, 107456 (2022).
- 47 Kelly, F. J. & Fussell, J. C. Global nature of airborne particle toxicity and health effects: a focus on megacities, wildfires, dust storms and residential biomass burning. *Toxicology Research* 9, 331–345 (2020).
- 48 Samoli, E., Nastos, P. T., Paliatsos, A. G., Katsouyanni, K. & Priftis, K. N. Acute effects of air pollution on pediatric asthma exacerbation: Evidence of association and effect modification. *Environmental Research* 111, 418–424 (2011).
- 49 Samoli, E., Kougea, E., Kassomenos, P., Analitis, A. & Katsouyanni, K. Does the presence of desert dust modify the effect of PM₁₀ on mortality in Athens, Greece? *Science of The Total Environment* 409, 2049–2054 (2011).
- 50 Middleton, N. et al. A 10–year time–series analysis of respiratory and cardiovascular morbidity in Nicosia, Cyprus: the effect of short–term changes in air pollution and dust storms. *Environmental Health* 7, 39 (2008).
- 51 Perez, L. et al. Coarse particles from Saharan Dust and daily mortality. *Epidemiology* 19, 800–807 (2008).
- 52 Deng, S.–Z., Jalaludin, B. B., Ant ó, J. M., Hess, J. J. & Huang, C.–R. Climate change, air pollution, and allergic respiratory diseases: a call to action for health professionals. *Chinese Medical Journal* 133, 1552–1560 (2020).
- 53 Anenberg, S. C., Haines, S., Wang, E., Nassikas, N. & Kinney, P. L. Synergistic health effects of air pollution, temperature, and pollen exposure: a systematic review of epidemiological evidence. *Environmental Health* 19, 1–19 (2020).
- 54 Lam, H. C. Y., Jarvis, D. & Fuertes, E. Interactive effects of allergens and air pollution on respiratory health: A systematic review. *Science of the Total Environment* 757, 143924 (2021).



空气污染与 气候变化协 同治理对健 康的影响

无论中国还是世界其他国家及地区都针对空气污染和气候变化开展了不同程度的控制措施。从健康收益方面评估相关政策实施的效果可以为我们提供空气污染和气候变化协同治理的新思路。在双碳目标下开展的“降碳、减污、扩绿、增长”工作已经证明了二者协同治理的可行性和必要性。本章从空气污染和气候变化控制政策的健康效益、协同治理路径以及协同治理的健康和经济收益等四方面系统阐述空气污染与气候变化协同治理对健康的影响。

05

大量流行病学研究证明空气污染的短期和长期控制措施可显著改善人群健康。由于空气污染治理可以视为对公共健康的一次公共干预，因此相关研究也被称为“准实验研究”，是明确空气污染与健康的因果关系的重要依据之一。根据研究对象是急性或慢性健康效应，我国空气污染相关的准实验研究可以分为如下两类。

首先，研究急性健康效应往往以空气污染短期控制的保障性事件为契机。例如，2008年北京奥运会和2014年南京青奥会等。2008年为了保障奥运期间的空气质量，北京及其周边实施了严格的控制措施，期间PM_{2.5}下降了31%。朱彤研究团队利用定群研究追踪多组人群中的健康生物标志物的变化，在成人组中发现奥运期间P-选择素、C-反应蛋白和收缩压的改善¹，呼出气一氧化氮和8-羟基鸟苷水平的下降²；在儿童组发现类似的呼吸道炎症³和全身氧化应激水平⁴的大幅下降。基于常规健康登记数据——包括死亡登记、医院门诊住院登记、妇幼保健院出生登记数据，也可利用类似方法探究2008奥运期间的变化规律，发现空气质量管控可显著降低心脑血管疾病死亡率⁵、全因死亡率⁶、哮喘门诊率⁷、提高出生体重⁸。2014年南京青奥会的空气质量管控也揭示了类似的结论，发现了管控显著降低健康青年人系统炎性反应。无独有偶，国外的空气污染短期控制也展示了类似结果，包括1996年美国亚特兰大奥运会⁹和2002年釜山亚运会¹⁰期间交通污染管控可降低哮喘住院率。值得一提，上述研究往往观测到在短期空气污染控制措施结束后，健康回复到控制前的水平。

其次，研究慢性健康效应往往依赖空气污染的长期治理。在中国，以2013年以来的清洁空气行动——包括“大气十条”、“蓝天保卫战”

——为典型代表，长期空气污染控制措施也被证明可持续改善人群健康。利用中国老老龄调查队列，依据“大气十条”治理目标的高低划分对照和干预组，并通过对比两组人干预前后健康水平的变化，发现清洁空气行动显著改善老年人认知功能¹¹。利用类似方法分析中国健康与养老追踪调查队列，发现“大气十条”期间，成人肺功能¹²、血脂代谢¹³、肾功能¹⁴、精神健康¹⁵、行为活动能力¹⁶和家庭医疗支出¹⁷等多维度的显著改善。值得说明，中国清洁空气行动迅速改善了PM_{2.5}为代表的污染物水平，是全球独有的准实验研究契机。

与国际上的空气污染准实验研究相比，我国研究仍有如下不足。首先，我国缺少精细的、特定的空气污染长期控制措施健康效应的相关研究。与之对比，欧美国家往往在规划一项污染治理措施时，同时规划相关人群研究，用以评估相关政策对人群健康的促进作用。例如，欧美研究曾证明伦敦设立超低排放区对儿童呼吸功能的改善¹⁸，犹他州炼钢厂关停对新生儿健康的改善¹⁹，都柏林禁止燃煤对死亡率的降低作用²⁰，德国电厂强制安装脱硫装置对婴儿死亡率的影响²¹，上述研究夯实了空气污染暴露与健康的因果关系。未来应在我国开展类似的、针对具体空气污染控制措施的准实验研究。其次，揭示空气污染长期控制措施的健康影响，往往需要累积数十年的人群健康数据，例如，加州儿童队列研究通过整合横跨30多年的人群数据，揭示了长期清洁空气行动对儿童呼吸功能及其发育的改善作用^{22,23}。建议我国应该针对空气污染治理（以及其它可能影响空气质量的环境政策，例如，碳达峰、碳中和政策）规划长期的、跨代际的人群研究，用以纪录这些政策对人群健康的改善作用。

5.2

气候变化应对与健康

相比空气污染控制措施，气候变化的主要治理措施是碳减排，其不仅作用时间长，且往往对人群暴露水平无均一、稳定的影响。根据典型的气候变化情景，即便是“碳中和”等强力政策，依然不会明显逆转全球变暖的平均趋势，因此，关于长期碳减排政策如何影响当前人群暴露和健康水平，基于真实世界数据的实证研究几乎无能为力，往往需要求助于模型估算结果。

在个体水平，针对气候变化的应对措施是建立“气候-健康”预警机制、增强人群的气候适应能力，我国部分城市和地区推出了极端气候预警系统，尤以“高温预警”为代表。尽管现存研究不多且多局限于西方国家和地区，已有分析利用规范的因果推断方法、证明气候变化适应措施与人群健康改善存在潜在的联系。例如，美国20个城市的研究并未观测到高温预警与全因死亡率降低的一致关联，仅在费城发现高温预警可减少4.4%的全因死亡²⁴。与之类似，在蒙特利尔的全人群中并未发现高温预警与全因死亡降低的关联，但发现对显著减少老人、低教育水平等脆弱人群的死亡有影响²⁵。纽约市于2008年通过降低温度阈值、提高了高温预警等级，研究发现这次政策修订可进一步减少全因死亡²⁶。此外，还有部分研究应用传统流行病学方法评估了高温预警的健康效应。例如，通过分析英国热浪行动计划实施前后、温度-死亡暴露反应关系是否发生变化，作为该措施是否保护健康的间接证据，但该研究并未得出具有统计显著性的结果²⁷。在我国，上海气象局曾为慢性阻塞性肺病人群提

供气象健康预警服务，通过与未被干预的对照组病人相比，发现气象健康预警服务能够减少慢阻肺急性发作概率、减少病人就医次数和医疗开支²⁸。

气象健康预警效应的研究难点在于其不同于传统的干预措施，不同人群很可能对干预具有不同的响应模式，因此，相关研究设计和统计方法应该进一步优化。例如，2023年我国疾控局发布了首个《高温热浪公众健康防护指南》，然而，我国尚缺少多中心的、关于气象健康预警效果的评估研究，应尽快采取类似实证研究，明确各地区的预警措施在改善健康效果上的差异。

综上，可在以下三方面采取协同措施，应对空气污染和气候变化的健康危害。首先，大气污染物和温室气体同源，采取协同减排策略可以从根本上遏止气候变化和减少空气污染，在人类世的时间尺度上，是减少两者相关疾病负担的根本途径。因此，协同减排政策必将产生缓慢但持续的健康改善效果。其次，起效最快的对空气污染和气候变化健康影响的协同应对措施是增强人群韧性和适应能力——包括对极端天气、空气污染事件的及时预警，提高人群对相关健康危害的认知，建立、健全人群对相关暴露的个体防护指南——从根本上降低人群对空气污染和极端天气暴露的易感性。最后，极端气候和空气污染相互影响，往往造成复合暴露事件，可能造成更为严重的健康危害。针对上述复合暴露事件及其健康风险给与精准的风险分级和预警，是最直接的协同应对措施。

一方面，以清洁空气行动为指导的结构性调整措施具有降碳的效果，有利于推动我国实现碳达峰碳中和目标。中国清洁空气行动淘汰或升级了低能效、高污染的落后燃烧设施，起到了减少化石燃料消耗、推动中国能源系统的转型的效果。通过控制能源消费总量、调整能源结构和提升能源效率的相关措施，中国清洁空气行动产生了显著的碳减排协同效益^{2,5}。现有研究显示，实施中国清洁空气行动措施在2013—2020年间带来了24.3亿吨的二氧化碳协同减排量，超过同期中国二氧化碳排放量的累计增长量（20.3亿吨），其气候效益十分可观²⁹。“美丽中国”战略对空气质量的要求会在未来进一步推动低碳能源政策的实施，到2035年，由空气质量达标所驱动的低碳能源转型政策可将主要大气污染物的排放量进一步降低6—32%，同时使二氧化碳排放量在国家自主贡献的能源情景（NDC）基础上进一步降低22%，这与实现全球2℃温升目标、我国2060年碳中和目标所需的深度脱碳要求相一致³⁰。

反过来，达峰行动和碳中和行动在实现碳减排目标的同时，也具有显著的空气质量改善效益。已有研究表明，实施气候政策可显著减排SO₂和NO₂，通过提高能源利用效率、推动产业升级和结构调整，达峰行动将显著减少污染物排放，进而改善空气质量，为居民健康和生态环境提供显著的益处^{31,32}。2030年之后，由于末端治理措施

的减排潜力基本耗尽，碳中和目标下的深度低碳能源转型措施将成为我国空气质量持续深度改善的动力源泉^{33,34}。Cheng等人³⁶的研究进一步强调了中远期的碳中和行动对空气质量的积极影响。在碳中和情景下，到2060年中国将基本完成低碳能源转型，与此同时，全国人群PM_{2.5}年均暴露水平达到8μg/m³左右，78%的人群PM_{2.5}年均暴露水平低于WHO指导值，这意味着空气污染问题将得到根本解决，对人民的健康和生活环境将产生显著积极的影响³⁷。

除了以目标为导向的效益探究，路径变化带来的中短期效益也值得关注。这对人口密度大、当前高污染的地区非常关键，也是成本效益高的关键举措之一³⁸。研究发现2010—2018年间约92%与电力排放有关的死亡发生在中国、印度等新兴经济体。这一健康影响对未来气候-能源轨迹的敏感度很高，在雄心勃勃的气候目标（RCP1.9）下，提前退役高污染高排放燃煤机组能够减少235Gt二氧化碳和1200万例空气污染相关死亡³⁹。另有研究表明若我国电厂退役前实现1%、5%、20%的碳减排，则分别可贡献全国潜在协同健康效益的20%、40%和70%，研究证明了基于健康效益的中国退煤路径相较于传统路径可获得更大收益，并发现健康效益在山东省、长三角、珠三角等地区较为显著，而在京津冀、内蒙古等地区相对较低⁴⁰。

5.4

典型协同路径下的健康影响评估

在全球气候治理的背景下，中国作为世界上最大的碳排放国，承诺努力争取 2060 年前实现碳中和，这将引发能源系统的根本性变革，推动建立清洁低碳、安全高效的现代能源体系，因此也将对空气污染改善和人群健康水平提升产生积极作用²⁸。目前关于在不同气候变化减缓情景下空气污染协同治理健康影响评估研究主要集中在以下三个方面。

碳减排通过改善空气质量以减少与空气污染相关的疾病（包括哮喘、慢性支气管炎、呼吸道疾病和心脑血管疾病等）发病率，并节省公众的医疗支出⁴¹。Wang 等⁴²发现中国实现 2℃温控目标对减少中国及其下风向跨界地区（日本和南韩）因 O₃ 暴露而导致的致病例数有积极影响，与参考情景相比，2030 年和 2050 年呼吸道疾病将

分别减少 2500 万例和 5400 万例。在中国，实现 2℃温控目标可在 2030 年避免 560 万例与 PM_{2.5} 暴露相关的致病数，并减少 12 亿美元医疗支出⁴³。在部门层面，一项基于历史数据的研究表明，通过优化居民部门的能源消费结构，石家庄、郑州、太原和济南四个城市在 2017—2019 年累计减少呼吸系统疾病 948 万例，同时节省医疗支出 24.2 亿元⁴⁴。

碳减排通过改善空气质量以减少与空气污染相关的过早死亡人数和经济损失^{45,46}。在中国，Wang 等⁴⁷分别量化了在 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 情景下由 PM_{2.5} 和 O₃ 暴露引起的致死影响，结果显示，RCP4.5 可以带来更显著的健康协同效应。且与 2010 年相比，RCP4.5 情景下 2050 年由 PM_{2.5} 和 O₃ 暴露导致的过早死

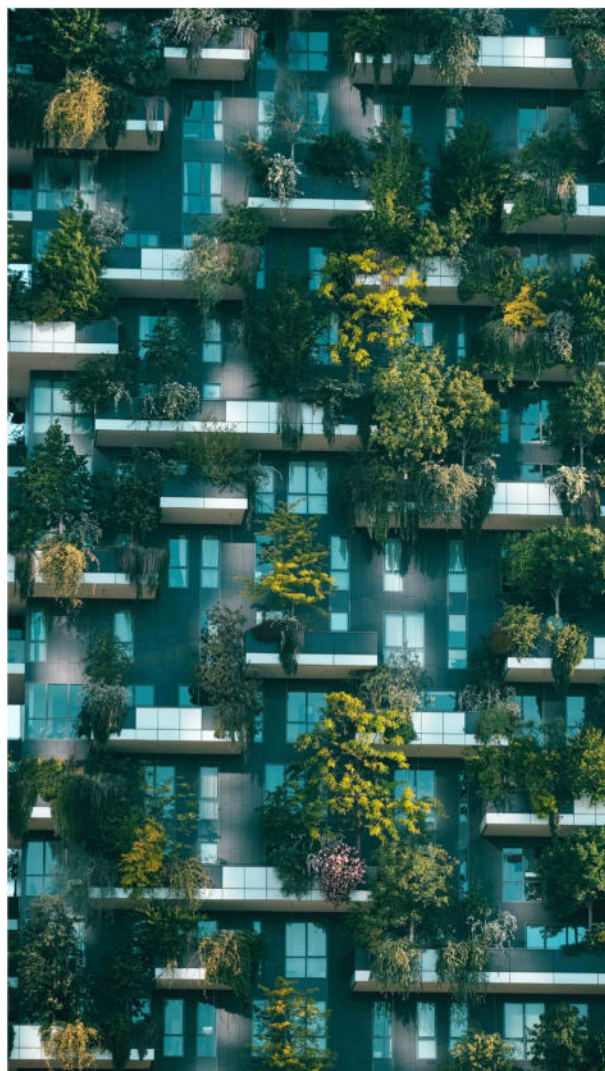


亡率将分别降低 13.5% 和 13.3%。Zhang 等⁴⁸指出，与参考情景相比，实现碳中和目标将使中国人口预期寿命在 2060 年提高 0.88—2.80 岁，并可在 2020—2060 年累计避免 2200—5000 万例过早死亡数，同时减少健康经济损失。在部门层面，Peng 等⁴⁹发现与参考情景相比，实现中国居民部门半脱碳化电力供应将在 2030 年避免 5.5—6.9 万例过早死亡人数。

农村居民能源向现代能源转型对于中国实现“碳中和”目标、空气质量改善目标至关重要。通过构建“居民能源—空气质量—公众健康”的模型框架，在省级层面探究中国农村居民部门实现碳中和目标的低碳转型路径，分析空气质量改善带来的健康影响，发现推广电炊事设备和空气源热泵有助于农村家庭向现代能源转型、实现“碳中和”目标、显著改善北方地区的空气质量，且大部分省份的货币化人群健康效益可抵消技术转型成本。北方地区因此获得显著的空气质量改善和人群健康效益。2050 年，北方大部分省份的 PM_{2.5} 浓度降低超过 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，避免约 52000 例/年过早死亡，占全国 70%⁵⁰。

大规模部署可再生能源带来各省有别的空气质量改善和健康协同。中国是全球可再生能源装机容量最高的国家。大规模发展可再生能源可减少化石燃料的使用，从而减少温室气体的排放、降低空气污染，有助于增强经济和环境的可持续性。发展可再生能源将大幅度减少与空气污染相关的过早死亡人数，且该正效应在东部和中部地区较为显著。中国东部和中部地区通过发展可再生能源可在 2030 年和 2050 年分别避免 0.29 万（占减少的空气污染相关死亡总人数的 73%）和 0.44 万（73%）例与空气污染相关的过早死亡人数⁵¹。

碳减排背景下空气质量提升将减少工作时间损失⁵²。研究指出，2 $^{\circ}\text{C}$ 温控目标情景下 2050 年避免的由 O₃ 暴露引起的工作日损失将是 2030 年的 3 倍⁴⁶。与 2015 年相比，碳达峰情景下 2030



年将避免超过 100% 的伤残调整寿命年损失⁵³。在部门层面，2 $^{\circ}\text{C}$ 温控目标情景下中国道路运输业对减少人群工作时间损失的贡献约为全行业的 8.7%⁴⁹。

人口老龄化因素将减弱气候减缓政策通过改善空气质量而产生的健康协同效益。研究显示，目前中国因长期 PM_{2.5} 暴露而导致的过早死亡人数为每年 223 万人。由于人为排放的减少，SSP1-2.6 情景下的 PM_{2.5} 及其组分浓度明显下降。但到本世纪中叶，因长期 PM_{2.5} 暴露导致的过早死亡人数将增加 76%，主要原因可能是老龄化显著抵消了空气质量改善带来的健康收益⁵⁴。

参考文献

- 1 Rich, D. Q. et al. Association between changes in air pollution levels during the Beijing Olympics and biomarkers of inflammation and thrombosis in healthy young adults. *Jama* 307, 2068–2078 (2012).
- 2 Huang, W. et al. Inflammatory and oxidative stress responses of healthy young adults to changes in air quality during the Beijing Olympics. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 186, 1150–1159 (2012).
- 3 Lin, W. et al. Acute respiratory inflammation in children and black carbon in ambient air before and during the 2008 Beijing Olympics. *Environmental Health Perspectives* 119, 1507–1512 (2011).
- 4 Lin, W. et al. Association between changes in exposure to air pollution and biomarkers of oxidative stress in children before and during the Beijing Olympics. *American Journal of Epidemiology* 181, 575–583 (2015).
- 5 Su, C. et al. Assessing responses of cardiovascular mortality to particulate matter air pollution for pre-, during- and post-2008 Olympics periods. *Environmental Research* 142, 112–122 (2015).
- 6 He, G. et al. The effect of air pollution on mortality in China: Evidence from the 2008 Beijing Olympic Games. *Journal of Environmental Economics and Management* 79, 18–39 (2016).
- 7 Li, Y. et al. Air quality and outpatient visits for asthma in adults during the 2008 Summer Olympic Games in Beijing. *Science of the Total Environment* 408, 1226–1227 (2010).
- 8 Rich, D. Q. et al. Differences in birth weight associated with the 2008 Beijing Olympics air pollution reduction: results from a natural experiment. *Environmental Health Perspectives* 123, 880–887 (2015).
- 9 Friedman, M. S. et al. Impact of changes in transportation and commuting behaviors during the 1996 Summer Olympic Games in Atlanta on air quality and childhood asthma. *Jama* 285, 897–905 (2001).
- 10 Lee, J.-T. et al. Benefits of mitigated ambient air quality due to transportation control on childhood asthma hospitalization during the 2002 summer Asian games in Busan, Korea. *Journal of the Air & Waste Management Association* 57, 968–973 (2007).
- 11 Yao, Y. et al. The effect of China's Clean Air Act on cognitive function in older adults: a population-based, quasi-experimental study. *The Lancet Healthy Longevity* 3, e98–e108 (2022).
- 12 Xue, T. et al. Association between a rapid reduction in air particle pollution and improved lung function in adults. *Annals of the American Thoracic Society* 18, 247–256 (2021).
- 13 Li, J. et al. Association of long-term exposure to PM_{2.5} with blood lipids in the Chinese population: findings from a longitudinal quasi-experiment. *Environment International* 151, 106454 (2021).

- 14 Han, Y. et al. Association of PM_{2.5} Reduction with Improved Kidney Function: A Nationwide Quasiexperiment among Chinese Adults. *Health Data Science* (2022).
- 15 Xue, T. et al. Long-term PM_{2.5} exposure and depressive symptoms in China: a quasi-experimental study. *The Lancet Regional Health Western Pacific* 6 (2021).
- 16 Wang, H. et al. Association between ambient fine particulate matter and physical functioning in middle-aged and older Chinese adults: a nationwide longitudinal study. *The Journals of Gerontology: Series A* 77, 986–993 (2022).
- 17 Xue, T. et al. Clean air actions in China, PM_{2.5} exposure, and household medical expenditures: A quasi-experimental study. *PLoS Medicine* 18, e1003480 (2021).
- 18 Mudway, I. S. et al. Impact of London's low emission zone on air quality and children's respiratory health: a sequential annual cross-sectional study. *The Lancet Public Health* 4, e28–e40 (2019).
- 19 Parker, J. D. et al. Preterm birth after the Utah Valley Steel Mill closure: a natural experiment. *Epidemiology* 19, 820–823 (2008).
- 20 Clancy, L. et al. Effect of air-pollution control on death rates in Dublin, Ireland: an intervention study. *The Lancet* 360, 1210–1214 (2002).
- 21 Luechinger, S. Air pollution and infant mortality: A natural experiment from power plant desulfurization. *Journal of Health Economics* 37, 219–231 (2014).
- 22 Gauderman, W. J. et al. Association of improved air quality with lung development in children. *New England Journal of Medicine* 372, 905–913 (2015).
- 23 Gilliland, F. et al. The Effects of Policy-Driven Air Quality Improvements on Children's Respiratory Health.
- 24 Weinberger, K. R. et al. Effectiveness of National Weather Service heat alerts in preventing mortality in 20 US cities. *Environment International* 116, 30–38 (2018).
- 25 Benmarhnia, T. et al. A Difference-in-Differences Approach to Assess the Effect of a Heat Action Plan on Heat-Related Mortality, and Differences in Effectiveness According to Sex, Age, and Socioeconomic Status (Montreal, Quebec). *Environmental Health Perspectives* 124, 1694–1699 (2016).
- 26 Benmarhnia, T. et al. Quantifying the impact of changing the threshold of New York City heat emergency plan in reducing heat-related illnesses. *Environmental Research Letters* 14, 114006 (2019).
- 27 Williams, L. et al. Evaluation of the heatwave plan for England. *Policy Innovation and Evaluation Research Unit: London, UK* (2019).
- 28 Ye, X., et al. The impact of a health forecasting service on the visits and costs in outpatient and emergency departments for COPD Patients—Shanghai Municipality, China, October 2019 April 2020. *China CDC Weekly*, 3 (23), p.495.29 (2021).
- 29 Shi Q, Zheng B, Zheng Y, et al., Co-benefits of CO₂ emission reduction from China's clean air actions between 2013–2020. *Nature Communications*, 13 (1): 5061 (2022).
- 30 Tian, X. et al. Toward the 2-degree target: Evaluating co-benefits of road transportation in China. *Journal of Transport & Health* 15, 100674 (2019).

- 31 Xing J, Lu X, Wang S, et al., The quest for improved air quality may push China to continue its CO₂ reduction beyond the Paris Commitment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117 (47): 29535–29542 (2020).
- 32 Tang R, Zhao J, Liu Y, et al., Air quality and health Co-benefits of China's carbon dioxide emissions peaking before 2030. *Nature Communications*, 13 (1): 1008 (2022).
- 33 Wang H, Lu X, Deng Y, et al., China's CO₂ peak before 2030 implied from characteristics and growth of cities. *Nature Sustainability*, 2 (8): 748–754 (2019).
- 34 Li N, Chen W, Rafaj P, et al., Air Quality Improvement Co-benefits of Low-Carbon Pathways toward Well Below the 2 °C Climate Target in China. *Environmental Science & Technology*, 53 (10): 5576–5584 (2019).
- 35 Xie Y, Dai H, Xu X, et al., Co-benefits of climate mitigation on air quality and human health in Asian Countries. *Environment International*, 119: 309–318 (2018).
- 36 Cheng J, Tong D, Zhang Q, et al., Pathways of China's PM_{2.5} air quality 2015–2060 in the context of carbon Neutrality. *National Science Review*, 8 (12): nwab078 (2021).
- 37 Zhang Shihui, An K, Li J, et al., Incorporating health Co-benefits into technology pathways to achieve China's 2060 carbon neutrality goal: A modelling Study. *The Lancet Planetary Health*, 5 (11): e808–e817 (2021).
- 38 Tong D, Geng G, Zhang Q, et al., Health Co-benefits of climate change mitigation depend on strategic power plant retirements and pollution Controls. *Nature Climate Change*, 11 (12): 1077–1083 (2021).
- 39 Li J, Cai W, Li H, et al., Incorporating Health Cobenefits in Decision-Making for the Decommissioning of Coal-Fired Power Plants in China. *Environmental Science & Technology*, 54 (21): 13935–13943 (2020).
- 40 Yuan, R. et al. Coordinated effects of energy transition on air pollution mitigation and CO₂ emission control in China. *Science of the Total Environment* 841, 156482 (2022).
- 41 Zhang, S. et al. Co-benefits of deep carbon reduction on air quality and health improvement in Sichuan Province of China. *Environmental Research Letters* 16, 095011 (2021).
- 42 Wang, Y. et al. Ozone-related co-benefits of China's climate mitigation policy. *Resources, Conservation and Recycling* 182, 106288 (2022).
- 43 Xie, Y. et al. Health and economic benefit of China's greenhouse gas mitigation by 2050. *Environmental Research Letters* 15, 104042 (2020).
- 44 Li, H., Zhang, L., Chen, T. & Liao, H. Environmental and health impacts of heating fuel transition: Evidence from Northern China. *Energy and Buildings* 276, 112483 (2022).
- 45 Fenech, S. et al. Future air pollution related health burdens associated with RCP emission changes in the UK. *Science of The Total Environment* 773, 145635 (2021).
- 46 Pottier, A., Fleurbaey, M., Méjean, A. & Zuber, S. Climate change and population: An assessment of mortality due to health impacts. *Ecological Economics* 183, 106967 (2021).
- 47 Wang, Y. et al. Health Burden and economic impacts attributed to PM_{2.5} and O₃ in China from 2010 to 2050 under different representative concentration pathway scenarios. *Resources, Conservation and Recycling* 173, 105731 (2021).

- 48 Zhang, S. et al. Incorporating health co-benefits into technology pathways to achieve China's 2060 carbon neutrality goal: A modelling study. *The Lancet Planetary Health* 5, 808–817 (2021).
- 49 Peng, W., Yang, J., Lu, X. & Mauzerall, D. L. Potential co-benefits of electrification for air quality, health, and CO₂ mitigation in 2030 China. *Applied Energy* 218, 511–519 (2018).
- 50 Ma, T., et al., Costs and health benefits of the rural energy transition to carbon neutrality in China. *Nature Communications*, 14 (1): p. 6101 (2023).
- 51 Xie, Y., et al., Large-scale renewable energy brings regionally disproportional air quality and health co-benefits in China. *Science*, 26 (8): p. 107459 (2023).
- 52 Kim, S. E. et al. Air quality co-benefits from climate mitigation for human health in South Korea. *Environment International* 136, 105507 (2020).
- 53 Zhang, J., Liu, M. & Bi, J. Urban greenhouse gas emission peaking paths and embedded health co-benefits: A multicases comparison study in China. *Applied Energy* 311, 118740 (2022).
- 54 Xiang, S. et al. Substantial short- and long-term health effect due to PM_{2.5} and the constituents even under future emission reductions in China. *Science of the Total Environment* 874, 162433 (2023).

The background of the page is a composite image. On the left, a hand is shown holding a bright sun, creating a lens flare effect. The sun is positioned over a landscape of rolling hills and fields. In the sky, several hot air balloons are visible, floating against a clear blue sky. The overall color palette is dominated by greens and blues, with a warm orange glow from the sun.

结论与展望

前四章针对空气污染，气候变化和健康效应间的关系和交互作用的科学研究证据进行了总结；第五章针对空气污染和气候变化协同治理的可行性以及协同治理下的健康效益进行了系统梳理。本章在前五章的基础上总结了现阶段人们对空气-气候-健康领域的科学认知，展望了未来亟需开展的科学研究议题，并提出以健康驱动空气污染和气候变化的协同治理构想。

06

6.1.1 空气污染是威胁人体健康的首要环境风险因素

据世界卫生组织（WHO）于2021年颁布的全球空气质量指导值和空气质量监测数据报告，全球99%的人口都暴露在超出指导值浓度水平的空气污染中。尽管我国在过去十年空气质量改善显著，但仍是全球大气细颗粒物（PM_{2.5}）浓度水平较高的国家之一。2022年，全国339个地级及以上城市的监测站点PM_{2.5}年平均浓度为29μg/m³，是WHO PM_{2.5}年均浓度指导值（5μg/m³）的近6倍。

据估算，2019年全球因室内外空气污染暴露导致667万的过早死亡，在导致过早死亡的众多因素中排在第四位，也是首要的环境风险因素。其中，PM_{2.5}是对健康危害最大的大气污染物，使得全球人口平均预期寿命降低近1年，大气O₃暴露使得全球人口平均预期寿命降低0.07年。近年来，我国也开展了多项空气污染的健康影响评估研究，有研究结果显示，PM_{2.5}浓度每增加10μg/m³，全因死亡率增加8–11%，暖季臭氧每升高10μg/m³，相关的心血管疾病、缺血性心脏病和中风死亡风险分别增加9%、18%和6%。

中国和全球诸多面临空气污染挑战的国家一样，迫切需要加强深度治理，降低公共健康风险。在我国推动实现碳中和与持续改善空气质量的双重目标下，WHO修订的全球空气质量指导值为我国空气质量管理提供了新的参考。适时地启动空气质量标准修订从而加强标准的引领和驱动作用，将有助于持续改善空气质量与公众健康。

暴露在PM_{2.5}、O₃等大气污染物中会引发人体炎性反应和氧化应激，进而诱导产生多种不良

健康效应，如免疫失衡、自噬、脂质代谢紊乱、内皮功能损伤、铁稳态失衡、肠道菌群失调等。我国现阶段PM_{2.5}的长期暴露健康损伤仍然是主要的疾病负担来源，臭氧峰季短期暴露的健康风险逐渐加重。空气污染的短期和长期暴露会产生不同危害，未来制定相关政策标准时，应以PM_{2.5}与O₃长期与短期健康效应的研究证据为参考，同时考虑短期和长期指标，例如加严PM_{2.5}的年均限值，增设O₃峰值季浓度限值等。

越来越多的研究表明老年人、女性、儿童、患心肺系统疾病等有既往基础疾病的人群对于空气污染暴露引起的不良健康结局（如疾病死亡风险、住院风险等）更加易感。其中，老年人群易感的研究结论最为明确，这可能与其患慢性疾病风险较高、免疫力较弱等因素有关。在未来空气污染治理和健康风险管理中，应进一步考虑对易感人群的保护，如设定针对易感人群的空气质量标准等。在重污染预报预警中，应着重提醒易感人群减少外出及户外运动，如确需外出应佩戴配有呼吸阀的防护口罩，以更大程度保护脆弱人群健康。

6.1.2 气候变化通过多种途径影响和加剧健康风险

全球气候变化背景下，全球气温升高速度正在加快，而我国地表年平均气温增速更是超过全球平均水平，高温暴露产生的人群健康风险也将显著升高。此外，我国是世界上主要的“气候脆弱区”之一，未来气象灾害的发生也会越来越频繁，将成为世界上自然灾害最为严重的国家之一。因此，需要实施气候减缓和适应相关政策。

气候变化影响公共健康的主要方式包括热浪、寒潮、洪涝、干旱和台风等极端气象事件的发生带来的直接影响，以及改变传染病媒介生物的分

布、粮食减产、空气质量恶化等间接影响，未来可通过对上述中介因素的干预来降低气候相关人群健康风险。

在气候变化的直接影响中，非适宜温度暴露带来的健康风险不容忽视，其在 2019 年造成全球男性疾病负担的风险因素中排名第 10 位，在女性风险因素中排名第 11 位。建立气候变化健康风险的早期预警系统，提前发布不同等级预警信号，提醒公众和相关部门采取措施，以减轻非适宜温度对健康造成的危害，是应对气候变化健康影响的重要措施。

在我国，气候变化对不同地区和人群的影响存在异质性。如高温对北方居民造成的健康风险较高，而低温对南方居民造成的健康风险较高。气候因素对农村地区居民造成的健康风险普遍较高，老年人、儿童、孕产妇、贫困人群以及慢性病患者等受气候变化的影响一般较大，这与他们的适应能力密切相关。未来应加强对气候脆弱人群健康的关注，更加精准地识别对气象因素敏感的人群，探究特定敏感人群气象因素与疾病发病和死亡的暴露反应关系。针对敏感性人群实施精准有效的干预措施，如给老龄化严重的地区增加空调专项的补贴，提高空调普及和使用比例等措施。

未来气候变化将使得传染病发病率增加、传染病分布范围扩大、人群对疾病易感性增强，同时还会增加跨物种病毒传播风险。未来气温升高会造成循环系统、呼吸系统等非传染性疾病负担显著升高，并使得意外伤害和意外死亡事件等风险升高。随着气温升高，极端天气事件频发，传染性疾病预防率已有抬头趋势，需要更加明确气象因素与各类传染性疾病发病在全国和地域水平的关联，同时应加强传统传染性疾病的防控，并注意新型传染性疾病的监测和控制。

6.1.3 空气污染与气候变化交互影响人体健康

空气污染与气候变化之间存在复杂的关

联。一方面，气候变化可以通过改变气象条件（如温度，湿度，风速等）影响空气污染的形成和分布。反过来，空气污染（特别是气溶胶和臭氧）也可以影响气候，例如气溶胶可以影响云的形成和辐射平衡。从二者的健康效应来看，空气污染和气候变化均可独立产生不良健康效应，同时二者之间又具有互相修饰作用，可能经由氧化应激、炎症反应和细胞凋亡等共同的病理生理机制产生协同健康效应。多项研究表明，空气污染可能加剧非适宜温度暴露的健康危害。

全球气候变化引起的气象条件改变会进一步影响空气污染，包括污染发生频次、理化成分和污染程度等，进而直接或间接地影响人群健康。由于具有相似的气象驱动因素，空气污染事件与极端天气事件容易形成更具有健康威胁的复合事件，产生非线性的负面健康影响。例如，夏季高温热浪与臭氧污染事件往往同时发生，我国华北平原地区超过一半的臭氧污染事件都伴随着高温；此外，冬季不适低温与高浓度颗粒物污染复合暴露的所造成的健康影响也不容忽视。空气污染与气候变化的协同健康效应揭示了未来在制定气象因素危害阈值或开发高温热浪预警系统的同时需考虑空气污染的影响。

治理空气污染和应对气候变化的措施都将直接或间接带来一定的健康收益。化石燃料燃烧是大气污染物和温室气体的共同来源。因此，实施针对化石燃料消费控制的根本治理措施，既可应对气候变化、也可治理空气污染，进一步带来巨大协同健康收益。从治理的策略和路径来看，不同排放源的控制、不同措施组合以及在不同区域来实施，可能会带来不同维度和不同程度的健康效益。因此，建议中国为实现“双碳”目标的过程中，需进行科学考量，基于不同策略和路径的健康收益，综合考虑空气质量改善和碳减排的最优路径。

6.2.1 跨领域合作加深理解空气污染与气候变化的复杂交互机制

空气污染与气候变化存在复杂的交互作用，目前对相关机制的认知仍存在不足。在大气成分的气候影响方面，气溶胶的混合态是影响直接辐射强迫的关键因素，目前对硫酸盐、黑碳等气溶胶成分的散射和吸收作用已有认识，但对复杂组分颗粒物的理化性质、混合态、物理化学老化过程对气候影响的了解仍然有限；并且气溶胶颗粒作为云凝结核引起云辐射强迫变化，从而造成气溶胶的间接辐射强迫，仍是气候评估中不确定性最大的来源。未来应进一步加强气溶胶混合态影响辐射强迫的机制研究，开展更多针对云的实际观测，结合卫星遥感、地基遥感和模型模拟等多种手段，增强对气溶胶-云相互作用的科学认识。另一方面，气候变化和空气污染的交互影响涉及在时空上复杂变化的多圈层与多过程的交互作用，现有地球系统与大气化学模式往往较难实现全面的描述和模拟。尤其是在气候变化背景下，干旱、沙尘暴、野火和热浪等极端事件变得越发强烈和频繁，而极端气象条件，也增加了极端空气污染的风险。然而，现有模式通常也无法捕捉和再现极端天气与污染事件，这与模型中对气象与化学的复杂反馈过程的表征不足或缺失有关。这些过程涉及地球多圈层的交互作用，需要大气、化学、环境、生态学等多方向的跨领域交流合作，加强观测、模拟与实验等多种研究方法的集成，

推动完善气候变化与空气污染耦合模型，深入探究人为与天然排放、大气化学和气候变化等多过程的交互作用。在此基础上，建立多过程耦合、多目标研究的分析决策平台，将自然科学研究方法与风险评价、成本效益分析等环境管理政策研究手段相结合，系统评估不同气候与污染治理政策的实施效果与潜在环境与社会影响，为预防应对气候变化与空气污染的健康危害和潜在社会影响提供科学支撑。

6.2.2 加强空气污染的人群健康影响机制与适应性研究

从长远来看，我国的碳达峰与碳中和目标会对未来空气质量的持续改善提供巨大驱动力，然而如何科学准确地定量其对人群健康带来的潜在影响，还有若干科学问题需要研究。具体包括：1) 低浓度空气污染暴露的健康效应：世界卫生组织于2021年制定了新的《全球空气质量指南》，对PM_{2.5}等污染物的指导值进行了下调。随着我国自2013年以来的空气质量持续改善，现行标准对大部分已达标城市不再具有强有力的引领作用。如何明确低浓度污染与人群死亡的暴露反应关系并缩小现实可行的空气质量标准与新版指南之间的差距，需要进一步开展低浓度空气污染人群健康影响机制与健康风险的本土化研究，为我国空气质量标准修订提供科学证据。2) 空气污染与多种健康结局的因果关系：由于O₃短期暴

露与呼吸道疾病、PM_{2.5}短期暴露与心脑血管疾病和全因死亡之间因果关系较为明确，PM_{2.5}长期暴露与心脑血管疾病和全因死亡之间具有因果关系，其它因果证据不充分，未来需要针对除呼吸和心脑血管疾病以外的健康结局开展更加系统的研究。3) 基于精细化空气污染组分和生命组学的健康影响研究：尽管我国空气质量总体改善，但不同污染组分的变化趋势可能存在差异。目前针对大气超细颗粒物、黑碳、挥发性有机物等污染组分对人体健康危害机制的研究尚不充分，未来需要加强卫星遥感、小型传感器等新技术在暴露监测方面的应用，充分评估其短期和长期暴露与人群死亡、疾病的反应关系，同时利用多组学技术（基因组、蛋白组和代谢组学等）深入揭示健康效应的机制，为制定科学合理的空气污染质量标准 and 组分标准提供依据。4) 我国不同区域人群的健康风险差异评估：不同区域（如城市乡村）居民的生产生活、日常行为方式差异导致室内和室外空气污染排放和人群暴露存在不同，需要利用先进的观测技术结合污染物来源解析和大气化学模型开展研究，识别不同地区和不同季节的主要污染物及来源，明确双碳目标对不同地区污染暴露特征的影响差异，为针对性的人群健康适应性评估提供基础。

6.2.3 加快开展针对气象暴露的流行病学与医学研究

气候变化可通过多种复杂路径直接或间接对人群健康产生诸多不利影响。但由于涉及路径众多，机制复杂，现有研究仍存在较多不足，需要进一步从广度和深度上加大研究力度，具体有如下议题需要加强：1) 气候变化对传染性疾病的影响：目前研究气象因素对传染性疾病影响的研究大多限于区域性研究，未来需要进一步从全国尺度范围研究气候变化对传染性疾病传播模式变化、蚊传疾病扩散、病原体变异等的影响；此外，

气候变化可能通过影响人群的生活方式、贫困和医疗服务，进而影响传染性疾病的发生和传播，因此在预测未来气候变化影响时，需要考虑社会经济因素的影响。2) 气候变化对全病因谱的健康影响：目前探究气象因素对人群死亡和发病的影响大多局限于总死亡、心血管或呼吸系统疾病死亡，仍缺乏气象因素对全病因谱死亡和发病的研究，并且针对特定疾病相关风险的修饰因素和脆弱人群探索也较少。因此未来亟需进行全人群、全病因的气候变化流行病学研究，识别气候敏感性疾病；在此基础上，还需结合生物医学研究，深入探究气象因素对人体生理和心理的影响机制。3) 人群适应性研究：在预测未来气象因素相关的疾病负担研究中，人群适应性并未考虑在内。如何定义健康适应性，不同时间尺度下人群对气候适应性的变化，影响适应性的相关因素，以及气候适应性的生物学机制等问题都亟待解决。因此未来需进一步研究脆弱人群的适应性、地区差异对人群适应性的影响以及长期气象因素对人群适应性的持续影响等问题。4) 气温的精确暴露评估及健康研究：目前研究大多仅关注室外气温对人群健康所造成的影响，未考虑人群在室内和室外的暴露时间比例。在健康效应探索过程中，缺少针对个体的多时段精确暴露监测，仅使用室外气温开展研究存在暴露误差。此外，也没有考虑室外气温和室内气温对健康影响的差异。5) 多个气象要素的复合暴露研究：目前的研究多聚焦于单个气象要素如高低温或单一极端气象事件，未来需要关注如高温高湿暴露、低温干燥暴露、热浪洪水暴露等“气象-气象”复合暴露，以及高温臭氧暴露、低温颗粒物暴露等“气象-大气污染物”复合暴露的健康效应。

6.2.4 基于空气与气象的综合监测系统开展健康集成研究

在空气污染与气候变化的协同健康效应方面，

空气污染暴露可能加剧非适宜温度暴露的健康危害，高温或低温条件亦可能增加空气污染暴露相关的人群死亡和患病风险。然而目前至少有以下三方面科学问题亟待解决：1) 尚未建立针对空气气候复合暴露健康效应的研究范式，尚不清楚是否存在更加科学合理的复合暴露指标。2) 空气气候协同健康效应的潜在机制需进一步明晰，不清楚是否存在特异性的生物标志物与健康效应机制。3) 缺乏评估空气与气候长期暴露协同健康效应的研究证据。未来，亟需基于空气与气象的综合环境监测系统开展健康集成研究，特别是针对高温热浪与臭氧、不适低温与颗粒物污染等暴露情景构建复合暴露指标体系，分析空气污染事件与极端天气事件复合暴露对人群健康的影响，探究多重风险因素长短期暴露的健康效应机制，明确其敏感性疾病、脆弱地区与脆弱人群等特征，支撑精准预防策略的制定。

6.2.5 以健康驱动空气污染与气候变化协同治理研究

将健康效应作为政策抓手，可以在空气污染和应对气候变化的协同治理中发挥引领作用（图6-1）。目前针对中长期空气污染控制与气候变

化减缓政策的健康效应进行预评估的相关研究技术储备充足，但尚未形成从研究到协同治理决策支撑的机制；有关短期政策或适应措施的健康效应研究当中，针对空气污染治理的研究较多，但对于气候变化应对措施的健康效应缺少研究，尤其缺少针对气候变化和空气污染协同治理或适应措施的有效性评估。针对这些研究不足，应在如下方面进一步加强：1) 建立和完善重大环境政策健康效益预评估机制，为进一步提升空气质量、持续应对气候变化、包括推动“双碳”战略的实施提供动力和激励。2) 在能源系统方面：由于空气污染与温室气体排在能源系统中同根同源，应聚焦不同部门之间的互馈作用，加强总体疾病负担影响、经济成本收益分析以及不确定性分析，识别能源系统低碳转型最优路径。此外，应筹划一些前瞻性研究，研判深度脱碳相关新技术、新材料所带来的健康风险；研判气候变化背景下社区韧性对能源需求、能源供给的影响。3) 针对影响适应性的相关因素，包括年龄、职业、基础疾病、社会经济特征与城市化、季节节律、气候波动，基于因果推断方法，完善健康效应实证研究，加强多因素之间交互作用的实证研究，筹划一些与社区气候韧性措施相关的准实验研究。

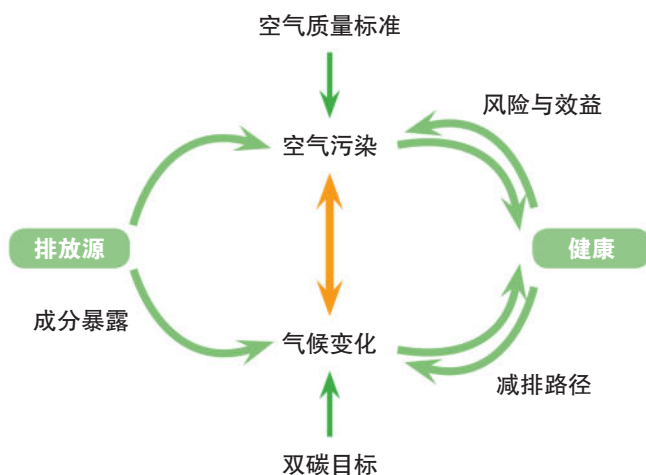


图 6-1 以健康驱动空气污染与气候变化协同治理

免责声明

本报告是能源基金会支持空气 – 气候 – 健康集成研究计划与交流平台（ARCH）组织完成，由 ARCH 所有，对外公开发布，使用者不得出于商业目的销售、传播或制作相关衍生作品。ARCH 对于本报告保有最终解释权。

ARCH 报告编辑和支持团队

艾思奇 北京大学环境科学与工程学院博士后
曹靖原 北京大学环境科学与工程学院博士后
李芳洲 北京大学环境科学与工程学院博士后
徐一凡 北京大学环境科学与工程学院博士后
孟雪玲 北京大学环境科学与工程学院科研助理
邹 霞 北京大学环境科学与工程学院科研助理

空气-气候-健康

集成研究计划与交流平台旗舰报告

以健康驱动空气污染与气候变化协同治理
——科学研究证据