

# 上海 PM2.5 减排的经济政策

2013 年 12 月

复旦大学上海 PM2.5 课题组<sup>1</sup>

## 内容摘要

本报告提出，上海应该争取在十五年内<sup>2</sup>将年均 PM2.5 从目前的 60 左右降低到 25 微克 / 立方米（世界卫生组织建议的第二阶段安全标准）。这个目标比环保部提出的争取全国所有城市在 2030 年将 PM2.5 降低到 35 的要求更为激进，但我们认为上海完全有必要也有条件领先于全国。一方面是因为上海的人均收入和服务业发展水平明显超过全国平均，有条件率先达标；另一方面，按规划上海将在 2020 年成为国际金融中心，而世界上其他国际金融中心的平均值仅为 20。空气质量不达标，上海将难以吸引流动性非常高的国际金融人才。

我们建立了一个量化的 PM2.5 治理模型，并用此模型模拟评估了各种政策组合的减排效果。研究发现，即使实行了目前已经提出和规划中的一系列环保政策（包括煤炭消费负增长、提高汽车排放标准和油品标准、治理黄标车、加大脱硫脱硝力度、控制挥发性有机物和全方位扬尘治理等），同时考虑到周边地区减排对上海的帮助，上海的 PM2.5 在十五年内也只能降低到 42 微克 / 立方米，是无法达到世界卫生组织建议的第二阶段标准的。

我们的研究发现，要彻底治理上海的 PM2.5，必须从更加宏观的视野，充分认识到影响上海大气污染的经济结构、交通运输结构、能源结构等根本性的、远超出环保部门监管范围的问题。只有解决这些结构性问题，上海的空气质量才可能在 15 年内达标。这些问题包括：1) 上海的重工业占经济的比重过高；2) 即使上海已经率先引入了汽车牌照拍卖制度，上海每年汽车保有量的增长速度仍然超过 8%，远高于同样采用汽车牌照拍卖制度的新加坡的 0.5%；3) 地铁在上海中心城区居民出行比例中只占 25%左右，远低于其它国际大城市的 60-80%；4)

---

<sup>1</sup> 本文是博源基金会、能源基金会支持的《PM<sub>2.5</sub> 减排的经济政策》研究项目的上海子课题报告。上海子课题的负责人包括李治国（复旦大学产业经济系副教授）、马骏（德意志银行大中华区首席经济学家、复旦大学管理学院兼职教授）、张艳（复旦大学环境系讲师）。参加课题的还有复旦大学喻坤、肖懿、全祺玮、李翔宇、杨雨昆和爱森哲咨询公司肖明智。作者感谢香港中文大学商学院徐宁、上海交通运输处和港口管理局叶兴、能源基金会赵立建、中国清洁空气联盟解洪兴、德意志银行施娱、洪天丰以及其他环境、经济和行业专家的意见和建议。

<sup>2</sup> 指 2013-2027 年，包括 2013 年。

上海清洁能源占全部能源消费的比重只有 15%，远低于欧洲国家的 40-60%；5) 船舶航运排放的大气污染物占上海 PM2.5 的 10%，且仍有上升的趋势。

我们建议，除了已经规划的减排措施之外，上海市应该由最高决策层牵头，以民意要求改善空气质量为动力，以更大经济改革力度来达到如下结构大调整的目标：

- 一、在 15 年内将重工业占 GDP 的比重从目前的 25%降低到 10%以下，包括采用将多数钢铁和石化等污染性生产设施搬出上海等措施。
- 二、改进汽车牌照拍卖制度和（或）开征拥堵费，将未来 15 年的年均汽车保有量的增长率控制在 2%，明显降低公路交通流量的增长率。将牌照拍卖收入和拥堵费收入用于支持地铁建设和支持新能源汽车。
- 三、在 15 年内将上海轨道交通的总里程提高 1.5 倍，改善运输效率，将轨道交通占中心城区居民出行的比例从目前的 25%左右提高到 2027 年的 60%。
- 四、大力发展以天然气为主的清洁能源，将清洁能源占上海全部一次能源消费的比重从目前的 15%左右提高到 2027 年的 45%。
- 五、通过改善航运结构，全面推广低硫油、岸电技术和清洁燃料等多项措施，在 15 年内将船舶航运业的大气污染排放降低 50%。

根据我们的估算，在上海实现 PM2.5 总体目标所需减排的 35 微克/立方米中（即十五年内从 60 降到 25），现有及已规划环保政策和周边地区减排可以帮助实现减排 18 微克/立方米，而我们所建议的各项“结构大调整”政策将减排另外的 17 微克/立方米。

各项结构调整政策所实现的具体减排效果如下：

1. 产业结构调整，将帮助减排 5.9 微克/立方米；
2. 公路与轨道交通结构调整，将帮助减排 4.5 微克/立方米；
3. 能源结构调整，将帮助减排 2.6 微克/立方米；
4. 船运污染治理与结构调整，将帮助减排 2.0 微克/立方米；

具体减排分解如表 1 所示：

**表 1 “结构大调整”政策下的 PM2.5 减排来源分解**

	减排幅度	减排的贡献率
<b>十年内减排的总幅度</b>	<b>35</b>	<b>100%</b>
其中：		
<b>现有政策的减排效果</b>	<b>15</b>	<b>43%</b>
<b>结构调整的减排效果</b>	<b>15</b>	<b>43%</b>
<b>1) 产业结构调整</b>	<b>5.9</b>	<b>16.9%</b>
<b>2) 公路与轨道交通结构调整</b>	<b>4.5</b>	<b>12.9%</b>
<b>3) 能源结构调整</b>	<b>2.6</b>	<b>7.4%</b>
<b>4) 船运污染治理与结构调整</b>	<b>2.0</b>	<b>5.7%</b>

周边区域的减排效果	5=3+2	14%
-----------	-------	-----

资料来源：课题组根据模型估计

为了达到上述结构调整的目标，必须采取一系列具体措施。我们提出了 12 条具体建议。这些建议包括：

1. 将钢铁、石化企业的高污染设施搬迁出城。
2. 推动发展高端服务业。
3. 制定中长期汽车保有量控制目标，将汽车保有量的年度增长率降到 2%。
4. 考虑限制汽车牌照的使用年限和（或）推出拥堵费制度，以达到限制汽车保有量和公路交通流量增长的目的。
5. 在 15 年内上海应该将轨道交通总长度提高至 1200 公里。
6. 提高地铁列车节数和改善线路轨道规划，以明显提高承载效率。
7. 除使用汽车牌照拍卖和拥堵费收入之外，通过引入社会资金、独立发行市政债等方式来解决公共交通基础设施建设资金短缺的问题。
8. 通过税费政策提高常规煤炭消费的成本。
9. 大幅提高对清洁能源的补贴，包括补贴 IGCC。
10. 研究采用新能源凭证交易制度。
11. 改善船运货物结构，提高货物中转比例。
12. 大力推行船舶靠港换油政策，建立排放控制区，全面推广船舶泊岸供电和码头油改气、油改电、LNG 混合动力船只。

## 第一节 上海应该争取在十五年内将 PM2.5 降到 25

### 一、2030 年全国所有城市 PM2.5 应降至 35 或以下

2013 年 1 月 24 日，环保部部长宣布，力争在 2030 年前全国所有城市达到空气质量二级标准，而二级标准的主要内容之一就是 PM2.5 的年均值降至 35 微克 / 立方米或以下。

我们认为，上述官方承诺意味着 2030 年全国城市的平均 PM2.5 至少要降到 30。这是因为，“所有（即每个）城市的 PM2.5 达标”与“全国城市的平均 PM2.5 达标”是两个不同的概念。由于各城市的污染程度明显不同，即使全国城市的平均值达标，也会有将近一半的城市继续超标。换句话说，“每个城市达标”的要求明显高于“城市平均值达标”的要求。我们根据 2013 年 1 季度的 71 个城市间 PM2.5 的离散系数（0.42），并假设该系数在今后下降一半，发现要使 90% 的城市的 PM2.5 都降到 35 或以下，这些城市的平均 PM2.5 必须下降到 30。

### 二、上海应该争取在十五年内将 PM2.5 降至 25

鉴于全国城市平均的 PM2.5 水平应该在 2030 年降低到 30，上海作为经济最发达的直辖市，有必要也有条件领先于全国目标。我们认为，上海应该争取在十五年内（指 2013- 2027 年，包括 2013 年）将年均 PM2.5 从目前的 60 左右降低到 25（世界卫生组织建议的第二阶段安全标准）。我们的建议基于三个理由：

第一，上海人均收入将在十五年内达到目前 OECD 国家水平，而 OECD 国家的 PM2.5 平均仅为 17。上海以常住人口计算的 2012 年人均 GDP 已超过 13000 美元，十五年以后上海的人均 GDP 将达到 40000 美元，超过 OECD 国家的目前平均水平。目前所有 OECD 国家的 PM2.5 水平都在 30 以下，其中的绝大多数国家不超过 25，算术平均值为 17。如果上海在 2027 年不将 PM2.5 降至 25，上海的空气质量就与其所处的发展水平和健康城市的诉求不相吻合，上海环境质量就会成为其城市发展中的一个明显败笔。

第二，上海将在十五年内成为服务业为主的经济体，有条件大幅降低 PM2.5。上海 2012 年服务业增加值占 GDP 之比重超过

60%，而全球主要发达国家服务业占比平均约为 80%，许多国际大都市达到或超过 90%。上海将有条件在十五年之后将其服务业的比重提高到 75%。由于制造业，尤其重工业，是上海的空气污染的重要来源之一，今后十五年制造业比重的降低将在很大程度上帮助上海降低 PM2.5。经济结构的变化远远超出了环保部门所能规划和管辖的范围，但将为 PM2.5 减排提供重要的、新的空间。

**第三，如果 PM2.5 过高，上海将很难在十五年内成为具备可持续竞争力的国际金融中心。**按照国家规划，上海在 2020 年将成为国际金融中心，而世界主要国际金融中心的 PM2.5 平均仅为 20，纽约和伦敦更仅为 13。上海目前的 PM2.5 水平为 60，比世界国际金融中心的平均值要高出 200%！金融行业是人才流动性最高的行业，在资本项目开放、互连网络金融日益发达的未来，上海成为国际金融中心的一个必要条件就是让全球的高端金融人才及其家属愿意居住在上海。到 2027 年，如果上海的 PM2.5 比香港和新加坡（估计届时这两个地区的 PM2.5 已降至 15-20）高出 15 微克/立方米，上海就很难与它们竞争最优秀的金融人才。

### 三、国际经验支持“上海在十五年内将 PM2.5 降至 25”

为验证“上海在十五年内将 PM2.5 降至 25”（即降低 60%左右）这一目标的可行性，我们对伦敦、洛杉矶和东京治理空气污染的历史经验进行分析。根据大气中主要污染物的浓度变化以及“大雾天气”和一级污染警报的天数减少情况，可以得出三个城市空气质量发生明显改善所经历的时间，我们发现，国际大都市的空气污染治理可以经过 15-20 年而取得明显效果。

根据大气中烟尘和二氧化硫年均浓度以及“大雾天气”减少情况，伦敦的空气质量在 1956 年至 1975 年间显著改善，二氧化硫年均浓度下降 70%，烟雾浓度下降 80%，整体改善程度超过 70%，所经历的时间为 19 年。根据一级污染警报的天数变化和主要污染物（NO<sub>x</sub>）年均浓度，洛杉矶的空气质量在 1977 年至 1992 年显著改善，改善程度约 60%，所经历的时间为 15 年。东京采取针对主要污染物治理的方法，1968 年至 1970 年代末针对硫化物重点治理，硫氧化物的实际排放总量下降约 80%，所经历的时间约 12 年；1992 年开始重点治理 NO<sub>x</sub> 和可悬浮颗粒物（SPM），到 2008 年东京都所有环境站和路边站全部实现 SPM 达标，所经历的时间约 16 年。

## 第二节 量化政策效果的 PM2.5“治理模型”

我们建立了上海的“PM2.5 治理模型”，通过该模型将一系列环保政策和行业目标对 PM2.5 的影响进行量化。本模型的原形为马骏、施娱等（2013）所建立的用于量化全国 PM2.5 减排政策效果的一个模型<sup>3</sup>。我们在此基础上增加了经济结构的模块，并根据上海具体情况作了大量系数方面的调整。

基于该模型，我们首先可以量化分析已经规划的环保政策对 PM2.5 在今后十五年的减排效果，评估其是否能够达到我们所提出的减排目标（在 2027 年将 PM2.5 降到 25 微克/立方米）。在得出已经规划的政策无法达到减排目标的结论之后，我们再进一步模拟和提出为了达标必需采取的一系列结构调整和改革措施。该模型的主要假设和利用该模型来推演政策目标的具体步骤如下：

### 步骤一：确定 PM2.5 治理目标、经济增长目标以及各类弹性系数

1. **PM2.5 治理目标**：将上海 PM2.5 平均浓度水平从目前的 60 微克/立方米在十五年内（2027 年前）降至 25 微克/立方米。
2. **GDP 增速**：我们假设，随着经济增长潜力的变化，上海实际 GDP 增速会由 2013 年的 7.5% 逐渐放缓至 2027 年的 5.0%。
3. **能源弹性系数、交通弹性系数、工业/建筑业增长弹性系数**：根据历史数据，上海的平均能源弹性系数为 0.5，交通弹性系数为 0.8，工业/建筑业增长弹性系数为 0.9。在“当前与已规划政策”情景模拟中，我们假设这些弹性系数不变。随着产业结构调整 and 重工业比重下降，能源弹性系数会下降，交通弹性系数也会下降，工业/建筑业增长弹性系数也会因产业结构升级而有所下降，在“结构大调整”政策模拟中，我们考虑了能源弹性系数的变化。

### 步骤二：根据上述假设得出能源消费量增速和交通运输量增速

基于上述假设，在不考虑产业结构和交通结构变化的情况下，能源消费量在 2013 年至 2027 年间年均增速应达到 3.0%，交通运输量年均增速应达到 4.9%。

### 步骤三：估算上海 PM2.5 的来源

---

<sup>3</sup> 全文见马骏、施娱、佟江桥：“政策要大变，才能将 PM2.5 降到 30”，博源基金会《中国经济观察》，2013 年 4 月 16 日；简要版见马骏、施娱、佟江桥：“减排 PM2.5 的政策组合”，《财经》杂志 2013 年 6 月 10 日。

根据上海市环境监测中心的数据，并参考相关学术研究，我们估计，上海PM2.5污染来自以下方面：约22%来自于周边省市的影响，约19%来自于燃煤以及次生的硫化物和氮氧化物污染，约31%来自于交通运输排放，约19%来自工业和建筑业非燃煤排放（包括VOCs、工业烟尘、建筑扬尘等），另外约9%来自于其他方面（秸秆燃烧、化肥、农药、抽烟、烹饪、森林、海洋等方面）。这些比例将作为我们模拟未来治理政策效果的重要依据。

#### **步骤四：估算排放标准提高和环保科技应用将带来的减排效果**

我们测算了上海已经规划的一系列排放控制措施和环保科技应用能够带来的减排潜力，内容包括脱硫、脱硝、提高油品质量和汽车排放标准、淘汰黄标车等等。例如，我们预计单位煤耗的污染排放量可以通过清洁能源技术削减55%；通过油品质量、燃油效率和汽车排放标准的提高以及三元催化器的定期更换等措施可以实现单位汽车每公里平均减排69%。

#### **步骤五：测算经济结构、能源结构与交通模式所需变化**

我们发现，即使通过提高排放标准和运用环保科技等一系列末端治理措施达到了上述（步骤四所述）的减排效果，PM2.5仍然无法在2027年达标。要实现PM2.5减排目标，经济结构必须发生重大变化（即降低重工业占GDP的比重，以降低能源弹性系数、交通弹性系数以及建筑业/工业增长弹性系数），能源结构必须发生显著变化（即降低煤炭比重，增加清洁能源比重），交通模式也必须大幅改变（即增加轨道交通比重，降低公路交通比重）。当然，实现这些结构性变化有多种路径和政策组合。我们选择的路径和政策组合考虑了重工业搬迁的可能性、自然资源的可获得性（如天然气、水电和风能）、技术可行性、社会承受力（如对汽车牌照拍卖制度的改革）和国际经验（如轨道交通密度和能源结构）等多种因素。

#### **步骤六：测算各类能源、汽车、铁路和地铁等行业的增长**

在上述新的能源结构的基础上，我们计算了煤炭、石油和各类清洁能源消费量的未来增长率。我们还根据交通运输结构的改变，分别计算出地铁和公路运输量的增长率，并由此推算出地铁总长度以及汽车保有量在未来的变化。我们在测算过程中，考虑了汽车使用率的下降、地铁运输效率的提高以及其他交通方式运输量的增长（如航空）等因素。

在下文中，我们将具体运用这个“治理模型”来模拟规划中的环保政策的效果，并详细讨论我们提出的一系列“结构性调整”治理措施的效果。

### 第三节 规划中的环保政策无法使 PM2.5 达标

#### 一、上海市已经提出的环保政策

上海市于 2013 年 10 月 18 日发布《上海市清洁空气行动计划(2013-2017)》，我们认为，新的五年行动计划在空气污染治理的指导思想上取得明显突破。五年的具体行动目标：“到 2017 年，重污染天气大幅减少，空气质量明显改善，细颗粒物 (PM2.5) 年均浓度比 2012 年下降 20%左右。”基于上海市 2012 年的 PM2.5 水平和未来五年下降 20%左右的行动目标，我们估计，上海市 2017 年的 PM2.5 年均浓度应降至 45 微克/立方米左右。

根据我们对五年的“清洁空气行动计划”和过去五个“环境保护和建设三年行动计划”的分析和了解，上海市现有及规划的针对大气污染的环保政策可以归纳为以下几个主要方面：

1、煤炭污染与工业燃烧控制：上海市计划降低煤炭消费量，到 2017 年，实现全市煤炭消费总量负增长。

2、能源结构优化与清洁能源替代：上海计划严格控制能源消费总量，推进能源结构优化，加快清洁能源替代。

3、工业挥发性有机物 (VOC) 治理：上海已开始并将加快挥发性有机物治理，到 2017 年，现役工业源挥发性有机物在 2012 年基础上减排 30%以上。

4、机动车排放治理：上海市计划提前实施更严格的新车排放标准和油品标准，轻型汽油车在 2013 年底前实施国 V 排放标准，柴油车和重型汽油车在 2015 年前实施新车国 V 标准。加快淘汰黄标车和老旧车辆，大力推广新能源汽车。

5、公共交通体系：到 2015 年，轨道交通运营线路总长达到 600 公里左右；中心城公共交通出行比重达到 50%以上，全市达到 36%以上。

6、航运船舶排放治理：优化港口及货物集输运体系，提高集装箱水水中转和水铁联运比重，推进港区船舶使用低硫油，积极推动船舶使用“岸电”等。

7、全方位的扬尘治理：全面加强工业、建筑工地、码头、堆场、道路等各地的扬尘污染控制。

#### 二、评估当前和已规划政策的效果

我们在大量相关参数的基础上，估计上述已提出的环保政策对我们“治理模型”中的主要变量的影响：如煤炭消费增长率的变化、单位煤耗排放的变化、单位车公里排放的变化、年均汽车保有量的增长率的变化、对能源和交通结构的影

响等。我们假设在今后四年内上海会按《上海市清洁空气行动计划（2013-2017）》执行政策，2017年后的10年的政策会继续沿袭该行动计划的整体思路，包括继续保持煤炭消费负增长、进一步提高新车排放标准和油品标准、治理黄标车、加大脱硫脱硝力度、控制挥发性有机物和全方位扬尘治理等。

我们的估算结果是，现有与已规划政策在15年内可以产生如下效果：

- （1）煤炭在一次能源消费中的比重从当前50%降至30%；
- （2）交通运输结构中道路运输比例维持在75%左右；
- （3）清洁煤炭技术可以将单位煤耗的污染排放量降低55%；
- （4）每辆汽车单位公里排放降低69%；
- （5）工业/建筑业非燃煤排放强度（单位产出排放）降低60%；
- （6）船舶航运污染降低15%。

获得上述估计结果的具体分析过程可参见关于本课题组的详细报告<sup>4</sup>。

### 三、这些政策只能将 PM2.5 降到 42

根据我们的PM2.5“治理模型”计算发现，现有及已规划的本地环保政策只能将上海的PM2.5在目前60的基础上降低15微克/立方米。即便考虑了周边区域减排对上海PM2.5的正面影响<sup>5</sup>，到2027年上海的PM2.5也只能降低到约42，仍然远高于我们建议的25的目标（世界卫生组织建议的第二阶段安全标准）。

模型结果还进一步显示，在《上海市清洁空气行动计划（2013-2017）》相应措施的推动下，上海的PM2.5在2017年降至45左右。但是，随着单位煤耗排放、单位车公里排放等减排空间的释放，其后十年间（2018-2027年）的下降速度将明显放缓。

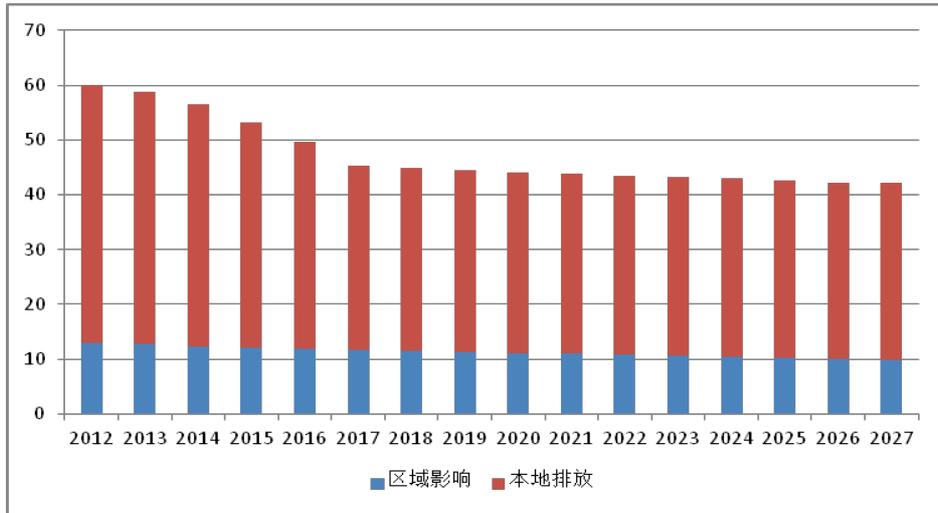
现有政策下的PM2.5减排路径如图1所示。

---

<sup>4</sup>复旦大学上海PM2.5课题组：“上海PM2.5减排的经济政策”，博源基金会《中国经济观察》，2013年12月30日

<sup>5</sup>考虑到经济结构变化速度的差异，我们假设周边区域PM2.5的减排速度为上海减排速度的80%。

图 1 现有及已规划环保政策作用下的 PM2.5 减排路径



资料来源：课题组模型估计

我们对各项现有及已规划环保政策的减排效果进行了进一步分解。表 2 结果显示，在 PM2.5 总体减排的 15 微克/立方米中：

- 1、已有的煤炭相关的减排政策能够帮助 PM2.5 降低 6.5 微克/立方米，其中能源结构调整可以帮助降低 2.7 微克/立方米，清洁煤炭技术的使用可以降低 3.8 微克/立方米；
- 2、交通运输相关减排政策能够帮助降低 4.3 微克/立方米，其中，降低单车排放的政策帮助减排 4.2 微克/立方米，改善交通运输结构的政策只帮助降低 0.1 微克/立方米；
- 3、建筑业和工业减排政策帮助降低 1.2 微克/立方米；
- 4、航运船舶减排政策帮助降低 0.9 微克/立方米；
- 5、其他方面的减排政策帮助降低 2.1 微克/立方米；

表 2 现有及已规划环保政策作用下的减排效果

	削减幅度	减排的贡献率
<b>本地环保政策的总减排</b>	<b>15</b>	<b>83%</b>
其中：		
<b>煤炭相关政策减排</b>	<b>6.5</b>	<b>36%</b>
能源消费结构变化	2.7	15%
清洁煤炭技术提升	3.8	21%
<b>交通运输相关政策减排</b>	<b>4.3</b>	<b>24%</b>
交通运输结构改善	0.1	1%
单车排放效率提升	4.2	23%
<b>工业建筑业政策减排</b>	<b>1.2</b>	<b>7%</b>
<b>航运船舶政策减排</b>	<b>0.9</b>	<b>5%</b>
<b>其他方面政策减排</b>	<b>2.1</b>	<b>12%</b>
<b>周边区域影响的减排</b>	<b>3</b>	<b>17%</b>

资料来源：课题组估计

## 第四节 结构性问题是上海空气难以达标的要因

我们认为，结构性问题是上海空气质量难以达标的主要因素。这些结构性因素包括重工业占比过高、汽车保有量增长太快、地铁占居民出行比例太低、清洁能源占全部能源消费的比重增长太慢。此外，船舶航运结构粗放和排放太高也是重要挑战。

### 一、上海的重工业比重过高

目前上海的经济和产业整体结构中，工业尤其是重工业的比重仍然较高。世界其他主要国际金融中心都倚重服务业，制造业占比均很低。新加坡制造业占 GDP 比重为 18% 左右，伦敦的制造业比重在 3% 以下，东京为 10%，纽约在 5% 左右，香港约为 3%。根据 2011 年的经济统计数据，上海市工业在 GDP 中的比重约为 37.6%，其中重工业占 GDP 的比重约为 25%，这一比例远远高于全球其他国际金融中心和国际大都市。

工业制造业，尤其是重工业是上海城市能源消耗和空气污染的重要源头。根据上海市能源消费的行业分布，2011 年，全市工业（非电力）的燃煤占煤炭消费总量比例约为 40%，工业消费石油量超过石油消费总量的 34%。而从废气排放情况来看，全市烟尘排放总量中约 30%，二氧化硫排放总量中约 35% 来自于工业（非电力）排放。其中重工业贡献了工业的大部分能源消耗和空气污染。

### 二、汽车保有量的增长速度过快

为了在 15 年内达到将 PM2.5 水平降低到 25 的目标，必须限制汽车保有量的增长速度。能够快速和有效实现汽车保有量控制的调节政策是以车牌拍卖为主的车辆配额制度。尽管已经推行了车牌拍卖制度，上海的汽车保有量增长速度目前仍然保持在年均 8% 左右，远远超过了空气污染减排所要求的增长率。

在采取拥车证拍卖制度的新加坡，其汽车保有量的增长率被控制在每年 0.5%。目前，新加坡的机动车为 100 万辆，其中私家车约 50 万辆。上海的机动车与私家车的渗透率迅速增加，在 2012 年已几乎与新加坡持平。如果今后以每年 6.5% 的速度增长，上海十五年后的渗透率将超过新加坡的一倍，上海的私家车总量（沪牌与长期在沪外牌）将在未来十五年内增长 160%，从目前的 190 万辆上升到 500 万辆。在 15 年内，即使通过提高油品质量、汽车排放标准和燃油效率等方面的最大努力，使单位公里汽车排放降低约 70%，但如果汽车保有量增加 160%，汽车尾气排放的 PM2.5 也只会明显上升而不会下降。

### 三、地铁占居民出行比例太低

就每单位人公里的运输量而言,地铁产生的PM2.5排放仅为公路运输的1/10。我们估计,目前上海中心城区的地铁使用只占居民出行比例的25%,然而世界上其他主要国际金融中心的这一比例平均达到70-80%,上海明显偏低。

### 四、清洁能源占能源消费的比重太低且增长太慢

根据课题组估算,上海市当前的清洁能源消费<sup>6</sup>占一次能源消费的比重约为15%左右。与全球主要国家相比,欧洲国家多数在40-60%,美国为40%,日本也超过35%。上海当前的清洁能源消费比重均明显偏低。

另外,根据目前已经公布的上海市“十二五”规划,清洁能源的比重将在2015年提高到21%。但是,即使今后继续按这个速度提高清洁能源的比重,同时采取目前已经规划的各项减排政策,也无法达到我们建议的2027年PM2.5目标。

### 五、船舶货运结构粗放,吞吐量增速较快,污染强度高

无论集装箱吞吐量还是港口货物吞吐量,上海均居于世界第一位。根据中国航运数据库数据,2008年至2012年,上海港货物吞吐量累积增长达40%,而国际上其它港口的增长约4%-5%。国际航运中心和自贸区建设将进一步提升国际贸易尤其是转口贸易的总量,预计到2020年,上海的港口吞吐量会远超过4000万标准箱(TEU)。

上海船舶货运的结构性问题包括:1)干散货吞吐量占比较高,而干散货相对集装箱来说污染更为严重;2)集装箱货运也存在附加价值低的问题,导致TEU和相应的航运能源消耗与污染的增长;3)水水转运可以减少污染,但上海港运量中的转口比例太低;4)上海港利用铁路分流水运运量的比例太低,而公路分流与铁路相比,污染要严重得多。

在末端治理方面,对船舶使用的油品质量和船舶发动机排放控制、对干散货污染的排放控制、对港口及运输车辆的尾气排放控制、对散乱分布的码头堆场的扬尘控制等方面还有很大的改善空间。

---

<sup>6</sup> 这里的清洁能源为广义概念,包括了外来的清洁能源发电。

## 第五节 PM2.5 达标所需的结构大调整

为了使上海在十五年内将 PM2.5 降至 25 微克/立方米，除了实施已经由环保部门牵头出台和规划中的各项减排措施，还必须该通过更大力度的经济改革，在十五年内推动一系列结构调整。我们的具体建议是，要采取一系列措施，在 15 年之内将重工业占 GDP 的比重降低到 10% 以下，将轨道交通占中心城区居民出行比例提高到 60%，将清洁能源占一次能源的比重提高到 45%，并将港口污染排放降低 50%。

### 一、将重工业占 GDP 比重降低到 10% 以下，将大部分钢铁石化等污染设施迁出上海

要完成 PM2.5 的减排目标所需要的结构性调整之一是降低重工业在 GDP 中的比重，相应提高服务业的比重。在根据 PM2.5 模型提出的政策组合中，我们的具体建议是，在 15 年内，将上海的重工业占 GDP 的比重从当前的 25% 降低至 10% 或以下。这可以显著降低上海的能源消费弹性，有助于改善能源结构和控制煤炭消费总量，同时有助于降低交通运输弹性和工业/建筑业增加值弹性。

如果实现上述目标，我们估计，上海的能源消费弹性系数将降低 40% 左右，即从 0.5 降低到 0.3；交通运输弹性将下降 25% 左右，即从 0.8 降至 0.7；工业和建筑业增加值增长弹性系数将下降 2/3，即从 0.9 降至 0.3。并且由于轻工业的污染排放强度比重工业低，工业/建筑业污染排放强度会进一步降低 20% 左右。另外，重工业占比的下降还将帮助降低煤炭占一次能源的比重（我们将此因素称为对能源结构的“间接”调整）。与基准情形（即产业结构不变情形）相比，**重工业占比下降将能通过降低排放强度在 15 年内帮助 PM2.5 降低 5.9 微克/立方米。**

要提高服务业的比重，降低重工业的比重，需要采取一系列经济、财税、金融政策。在提高服务业的比重方面，上海应充分借助自由贸易区的平台和机遇，通过对私营部门和外资的准入放宽，金融市场化改革，以及税收、融资、人才引进等方面的改革来推动金融、医疗、电子商务、第三方物流、IT、咨询等高端服务业的发展，带动服务业的不断升级。

在降低重工业比重方面，可考虑的政策包括大幅提高污染排放的收费，限制对重工业项目的融资，限期淘汰重工业高污染产能之后不再本地开工新的重化工

业项目，采用财税金融手段鼓励重工业企业（包括宝钢、金山石化、高桥石化等）的主要生产设施搬迁到人口密度较低、环境容量远远大于上海的地区，或转移到其他低收入的国家。

上海市的重工业企业主要包括宝钢、金山石化、高桥石化等。而根据上海市环境监测中心提供的数据显示，在上海所排放的 PM2.5 中，以钢铁企业为主的工业锅炉和炉窑排放占比为 10.2%，以石化行业、工业喷漆等为主的工业工艺过程排放占比为 15.4%。基于此，我们建议重点考虑将宝钢、金山石化、高桥石化等企业的主要高污染生产环节和设施迁至其他地区。

我们对宝钢的搬迁进行了初步分析，提出了宝钢在 15 年后的产能分布的初步预测，要点包括：（1）宝钢可以将部分产能迁往其他沿海地区，如广东韶关与湛江港；（2）宝钢可以大幅提升集团下新疆八一钢铁产能；（3）宝钢还可以将部分产能搬迁至其他西部地区，如宁夏、甘肃等地；（4）国际化也应是宝钢未来的一个重要战略方向；（5）在部分污染性生产设施搬迁的同时，宝钢在上海的产能同样需要产业升级，以降低污染。

## 二、降低汽车保有量增长率，提高地铁出行比例

达到 2027 年的减排目标所要求的另外一组结构性改革是明显降低公路交通的增长率、大幅提高轨道交通的增长率。这是因为，在各种交通模式中，使用轨道交通运送单位旅客的能源效率是最高的，因此 PM2.5 排放也是最低的。给定同样的运量，铁路和地铁的能源效率约为私家车的十倍，相应地由于能耗导致的污染排放则为私家车的 1/10。

我们提出的政策组合要求将公路交通运输量基本维持现在的水平，即保持 15 年内的零增长。考虑到每辆汽车的实际使用率长期下降的国际趋势（我们假设上海的汽车使用率在 15 年内下降 20%），我们建议上海将汽车保有量的年均增长率控制在 2% 左右。同时，公路交通零增长也意味着为了满足年均 4.6% 的交通运输总量增长的需求，轨道（地铁与轻轨）交通运输量的增长必须达到年均 10.8%。

以上政策组合可以使 15 年内上海中心城区的轨道交通占居民出行比例从目前的 25% 提升至 60%，同时，由于道路交通拥堵状况会有明显改善，缩短单位里程的实际行程时间（和耗能），估计能使单车单公里污染排放进一步降低约 20%。与基准情况（轨道交通占出行比例保持在 25% 不变）相比，公路与轨道交通结构的调整能够在 15 年内帮助 PM2.5 降低 4.5 微克/立方米。

在以下两节中我们分别讨论控制汽车保有量增长和提高轨道运输量增长的政策选择。

### 2.1 改进牌照拍卖制度和（或）开征拥堵费，将汽车保有量的年增长率降到 2%

上海目前主要采取汽车牌照拍卖来控制汽车保有量的快速增长。为了汽车保有量（车牌）的增长率从目前的年均 8% 下降到 2%，我们建议，上海应该分别在汽车保有环节与使用环节采取更为严格控制措施。在保有环节主要是改革汽车牌照拍卖制度，在使用环节应该尝试征收拥堵费。

### 2.1.1 改革牌照拍卖制度

目前，上海牌照的私家车数量约为 140 万辆，机动车总量约为 260 万辆，外地牌照长期在上海行驶车辆约 50 万辆<sup>7</sup>。近年来，根据月度私家车牌照拍卖的公开数据测算，上海牌照车辆每年新增约 10 万辆。根据上海户籍人士新购外牌车辆的情况，长期行驶外牌车辆每年新增约 5 万辆。

通过改善牌照拍卖制度，对增长率的控制是可行的。实行拥车证制度（一种牌照拍卖制度）的新加坡，其年均私家车增长率在 1990 年至 2008 年间一直严格控制在 3% 左右。在 2008 年后，这一增长率又被进一步控制，目前已经下降到 0.5%（年均 5 千张车牌的额度），而新加坡多数民众对此一直保持支持态度，并没有出现国内城市领导普遍担心的矛盾激化。当然新加坡能够顺利实施该制度的其他原因包括政府有很高的公信力和执行力，高度廉洁，并为公众提供了便利、高效的地铁交通网路。

关于针对上海的具体措施，我们建议首先要限制牌照的有效年限，即采用循环制度。应该借鉴新加坡的做法，将新牌照的有效期限定为 10 年，到期之后必须重新竞拍。这个体制的好处在于每年会有相当数量的牌照到期，因此，在给定汽车保有量增长率每年 2% 的前提下，能有更多的新的牌照可以拍出，将大大缓解供不应求的压力。

但是，对于一些老牌照持有者而言，当时拍得牌照时的假设为“永久有效”，现在政府突然修改政策，难免会有抵触。因此，如何实现新老政策之间的顺利转轨是一大难题。

我们设想了如下两种方案：

**方案一：**新牌照的有效期限为 10 年，可以转让；老牌照永久有效，但不可转让和继承。

**方案二：**新牌照的有效期限为 10 年，可以转让；老牌照改为有效期限，允许转让，同时适当延长使用时间（使之略超过 10 年），作为给老牌照持有者的一定补偿。

两种方案各有优劣。第一种方案不损害原牌照持有者的利益，但会使新牌照的发放额度会大大减少，价格可能飙升几倍。第二种方案可以避免新牌照拍卖价格的飙升，但老牌照持有者会有不满。

我们建议考虑第二种方案。从社会公平的角度来说，不能让理应由全部市民负责的、过去十几年累计起来的问题（交通拥挤和由此导致的空气污染）的成本让一小部分新牌照购买者来承担。根据“谁污染谁付费”的公共财政原则，大部分人都应该为自己过去所导致的污染“买单”。另外，从社会稳定角度来看，虽

---

<sup>7</sup>上海商报官方网站，2012 年 8 月 4 日报道，<http://www.shbiz.com.cn/Item/182725.aspx>

然第二种方案下受损群体（二百多万老牌照持有者）的规模比第一种方案中的潜在受损群体（一年十几万人）要大得多，但是第二种方案中受损者的人均成本远小于第一种方案中的受损者的人均成本。第一种方案下新牌照持有者突然面对价格飙升，其中的激进者更有可能出现不理性行为。而第二种方案下，由于成本分摊比较均衡，出现社会不稳定的概率较低。

我们为第二种方案提出了如下一些示意性的参数，供有关部门参考：

1) 从改革之日(如 2016 年 1 月 1 日)起，所有新拍卖的牌照只有 10 年的使用期，十年后作废。

2) 对 2016 年以前拍卖出的牌照，为了缓解对持有者的财务压力和最近几年拍卖价格上升较快的因素，建议采用两步法计算持有牌照的剩余年份：

第一步，计算牌照的理论剩余年份，公式为  $10 + \text{拍得年份} - 2015$ 。比如，2010 年底拍得牌照的理论剩余年份为 5 年（ $10 + 2010 - 2015$ ）。

第二步，根据“补贴公式”对剩余年份进行调整，调整后的剩余年份 =  $(2 + 1.2 * \text{理论剩余年份})$ 。比如，2010 年底的牌照，其调整后的剩余年份为 8 年，比理论剩余年份多出 3 年（称为补贴年份）。

综上所述，以上办法可达到如下效果：

1) 所有开车的人都承担部分改革的成本，既可以达到减少拥堵和污染的目的，又遵循了“所有污染者均付费”的公平原则；

2) 所有过去拍出的牌照都获得至少 2 年的补贴年份，为这些消费者所面临的成本上升提供了一个缓冲期；

3) 考虑到近年的牌照价格较高，公式设计中给予近年拍得牌照的补贴年份较多，进一步体现公平性；

4) 维持牌照价格相对平稳。逐渐回收的老牌照进入到新牌照的拍卖额度中，能避免造成牌照拍卖量的大幅度减少和价格的大幅飙升。

### 2.1.2 开征拥堵费

解决拥堵和控制汽车污染的另一政策选项是采用拥堵费制度。我们建议考虑在市区拥堵路段征收“市区”拥堵费。除公共汽车、救护车、消防车、警车等社会车辆外，进入划定路段行驶的机动车辆需交纳拥堵费。

具体拥堵费标准的制定上，应参考国际上实行拥堵费的伦敦、新加坡等地的经验。我们建议，以需求弹性法为核心，结合减排目标，测算合适的拥堵费标准。

参考国际的拥堵费设置，其基本思想是根据价格弹性，在有交通压力与环境压力的区域向汽车使用者征收一定费用，引导那些非必要的汽车使用者转向公共交通。以伦敦为例，2003 年开始，伦敦对进入市中心区域的车辆征收 5 英镑拥堵费，确实将交通量下降了 12%，与政府根据价格弹性所做的预测相符。随着居民购买力指数与通货膨胀的影响，这一费用又逐渐上升到目前的 10 英镑。

价格弹性的测量是政策的关键。伦敦市交通部门采取的测量方式是通过在试验路段定价 2.5 英镑，5 英镑，10 英镑的实验价格，测试实际减少通行量。最终测定 5 英镑能达到交通量下降 10%至 15%的目标。我们建议上海市有关部门着

手实验，试验以不同价格下的交通弹性，作为未来确定拥堵费的主要依据。参照伦敦的拥堵费与地铁成本之比，我们估计上海的小排量汽车的单日拥堵费可能要设在 20 元左右，大排量汽车的拥堵费应该更高。

拥堵费的设置区域选择应该是在人流量和车流量都很大的拥堵区域，同时该区域应当提供其他公共交通选择。另外，征收拥堵费需要一些配套措施，如相应的电子监控系统。同时需要相应的费用支付系统。国外采用电话支付与刷卡支付结合的方式，方便车主进行付费。未支付费用的人将被处罚。以伦敦为例，一旦被查出没有按时支付拥堵费，则需要支付相当于原费用十倍的罚款。

在成本核算上，伦敦在 03 年设置 5 英镑拥堵费后，实际的收入约为 6800 万英镑。这一数值相对于预期较低，因而在核算包括交通意外事故降低率，减排收益等各方面因素之后，拥堵费的收益都是明显的。就上海而言，若以拥堵费实施后，平均 140 万私家车的五分之一（28 万辆车）经过收费区域，每日单车平均缴费额 25 元计算，年均收费约为 25 亿。

### 2.1.3 几种政策组合

改革汽车牌照拍卖制度和开征拥堵费，是上海的两个选项，既可以二选一，也可以采用两者的组合。如果牌照拍卖制度的改革有足够力度，已能够将汽车保有量控制的年增速控制在 2%，则就没有必要再开征拥堵费。如果政府考虑到社会阻力太大，下不了决心将老牌照变为有限期牌照以大幅降低牌照的净增长率，则阻力相对较小的选项就是开征拥堵费。如果不改革拍卖制度，而选择开征拥堵费，其效果主要是降低每辆汽车的使用率（增加闲置率）。

当然也可以考虑采用有限力度的牌照拍卖制度改革（如不改老牌照的期限，只将新牌照改为有限期，同时保持较高的如 5% 的牌照年增长率），同时开征每辆车每天 10 元的拥堵费，以期通过降低汽车使用率来达到交通量减速的目标。

## 2.2 将轨道交通占中心城区居民出行的比例提高到 60%

在发达国家的大都市中，居民出行选择轨道交通的占 60-80%。上海要达到 60% 的目标，需要大幅度提高地铁里程数和提高使用效率。具体而言，在 15 年内，1) 轨道交通总长度应该由 2012 年末的 468 公里上升到 1200 公里；2) 通过提高地铁列出节数和改善线路规划使轨道交通承载能力提高 40%。

### 2.2.1 在 15 年内上海应该将轨道交通总长度提高至 1200 公里

尽管上海的地铁总里程数（包括磁悬浮线路）已经位居世界前二，但是人均里程数和单位面积里程数与其他国际都市还有差距。考虑到上海的人口可能进一步增长与城市本身拓展速度较快，进一步提高地铁里程数势在必行。

从上海市政府的轨道交通规划来看，2022 年前，希望建成 22 条线路，800 公里的地铁线，假设之后 5 年年均建设相同的铁路长度，2027 年应达到 970 公里，每万人的地铁里程数将仅为 0.33 公里，每平方公里的地铁里程数仅为 0.184 公里。考虑预算约束与建设进度，我们建议到 2027 年将总里程数提高到 1200 公里，以使上海市每万人地铁里程数达到 0.4 公里，每平方公里的地铁里程数达

到 0.226 公里，达到国际大都市的平均水平。

我们提出将 2027 年的预期里程从 970 公里提高到 1200 公里，主要是考虑到明显需要增加而仍未在规划中的线路。比如，在新增的 230 公里中，可以包括轨道交通 1、2 号线的副线（缓解 1、2 号线的高峰时期客运压力），以及市中心内的小环线（连接几个市中心区域，减少换乘）。

### **2.2.2 通过提高地铁列车节数和改善线路轨道规划，将整体承载能力提高 40%**

在东京，高峰时段的地铁运载人数达到 600 万人，而在上海仅为 300 万人。但在地铁里程数上，上海已经超过了东京。在未来 15 年内，上海应通过增长地铁列车节数与改善线路轨道规划建设提高整体的承载能力（单位里程运载人数）。

在国际大都市的地铁线路中，繁忙线路的地铁列车长度一般在 10 节以上。如起到东京交通枢纽联通作用的山手线，每列车采取 11 节编组。而纽约地铁的典型编组也可达 8 到 11 节。并且，这些交通枢纽的站台极大、轨道较多，可以实现并轨行驶与快慢车道分驶，沿线的车站也能承载相同长度的列车行驶。

上海的部分地铁线路由于站台偏小的限制，导致列车长度偏短。目前，最繁忙的 1、2、3 号线编组为 8 节，其余线路的编组一般为 6 节，低于其他国际大都市。将繁忙线路列车长度提升至 11 节到 12 节，可以明显提高地铁线路的承载能力。要达到这一目标，不仅需要增长列车，同时应当对车站进行配套升级，增加站台长度以满足列车增长后的乘车需求；相应的运营与调度措施也需要跟进提高，保障不延长列车停站与行驶时间。另外，通过改善轨道线路规划，在核心区域积极采取快慢车道分驶，快速线路等优化措施，也能进一步提高运能。

我们估计，这些措施将能使地铁线路的承载能力提高约 40%。

### **2.2.3 利用牌照拍卖与拥堵费收入、社会资金和市政债来支持地铁建设**

要提高总里程，以每公里 6 亿元计算，在这 15 年间，新增规划约 230 公里轨道交通，平均每年需要额外投资 92 亿元（不考虑通货膨胀）。而考虑每年地铁列车长度的升级与站台的改造，估计每年还需要额外投入约 30 亿元资金。

目前，上海地铁建设资金主要来自财政拨款与银行贷款。我们认为，提升总里程和改善整体线路效率的资金，以及部分现已规划的地铁建设所需要资金可由牌照拍卖费与拥堵费、社会资金与市政债三种方式获得。

上海市的牌照拍卖制度每年能够为政府提供约 60—70 亿人民币的收入。若依照我们的政策建议改革牌照拍卖制度，建立新的拥堵费制度，每年的财政净收入或可达到 100 亿，其中的相当部分可以用于支持地铁建设。

同时，从国际经验来看，若只依赖政府，由于财政预算约束轨道交通建设很可能陷于停滞不前。我们认为，轨道交通建设出资方式需要改革，尤其是要引入社会资本。这样既有助于加快地铁的建设，同时也能引入竞争，提高地铁的运营

服务与效率。

一个典型的引入民营资本的案例是香港模式，即地铁土地使用权与建设权绑定出售。对于政府来说，将规划出售的土地与地铁建设权一同出售，可以直接利用土地的价格来做出补贴，无需过多的财政补贴，同时也可以避免居民区建设与地铁建设脱节所导致的问题。对于房地产公司来说，引入公共交通的建设获得政府补贴的同时，一旦地铁建设完善，房产价格也会相应上升。

另外，还应该通过独立发行市政债来为轨道交通投资融资。上海应争取率先独立发行市政债，通过透明的债券市场融资为轨道交通项目提供长期资金（如十至三十年期的融资）。上海的财务状况在全国属于最好的一类，国家也有发展市政债的意图，上海如果能率先改革，公布资产负债表，提高财政透明度，获得第一个市政债评级，发出第一个真正意义上的市政债，则不但能为基础设施提供资金，还能为中国的地方债市场发展做出开拓性的贡献。上述两个方法可以填补地铁建设所需要的剩余费用。

只要有充足的资金，加以高效的建设和运行效率改革，上海就有条件在 15 年内将中心城区轨道交通占居民出行的比例提升到 60%。

### 三、将清洁能源占比提高到 45%

我们提出的政策组合的另一项内容是，除了推动产业结构变化之外，要通过在发电、交通运输等领域更大力度地推广使用清洁能源（即“主动”调整能源结构），在 15 年内将清洁能源占全部一次能源消费的比重从 15% 提升至 45%。其中，应争取将天然气占比提升至约 20%，可再生能源占比提升至约 20%，整体煤气化联合循环发电（IGCC）占比提升至约 5%。以上结构调整意味着煤炭占一次能源消费比重可从目前的 50% 降低至 15%。

根据模型测算，与基准情形（目前规划政策下，仅假设产业结构变化带来的能源结构的“间接”调整）相比，能源结构的主动调整能够在 15 年内帮助 PM2.5 降低 2.6 微克/立方米。

#### 3.1 将天然气占比提高到 20%

从上海天然气供给角度来看，随着 2012 年西气二线上海支干线的竣工以及进口液化天然气（LNG）二期工程的推进，上海将形成进口 LNG、西气东输一、二线、川气和东海气等多气源供应格局，预计 2015 年新建成的西气二线可以为上海每年提供 20 亿立方米的天然气供给，达到全市天然气总供给的 20%。同时，LNG 二期工程将新建 3 座 16.5 万立方米储罐以及第二条海底管线，进口能力将进一步增大，会使上海天然气气源约束得到很大缓解。因此，从供给角度来讲，上海有条件利用天然气对煤炭、石油等燃料进行大范围替代。

当前上海市一次能源消费中，天然气比重约为 8% 左右。但是，在船舶航运、

公共交通等方面，天然气的应用才刚刚进入起步阶段，而目前北方很多城市的公用交通、重型卡车等已经全面完成了天然气改造。根据上海统计局公布的数据估计，交通运输领域的能源消费占全市一次能源总消费量的 20%左右，公交车、出租车、载货卡车总数为 36 万辆左右，这些车辆的能源消费占交通运输领域的总能源消费约 40%，如果政府通过适当补贴，将这些车辆全部改造成天然气动力，那么天然气在一次能源消费中的比例将会提升 8%。

目前，上海市的天然气发电仍然处于起步阶段，2010 年天然气发电装机容量占全市电力装机容量的 13%左右。而根据 IEA 的数据，2010 年 OECD 国家用于发电的能源中，平均天然气占比达到 30%，全球平均为 22%。我们认为，未来 15 年内，如果天然气在上海发电能源中的比重达到 25%，那么在全部一次能源消费中的比重将提升 7%。

天然气单位发电成本高于煤炭发电，是阻碍天然气发电发展的主要原因。因此，只要政府通过适当地补贴电价，就可以不断提升社会对天然气发电项目的投资。然而，目前政府制定的天然气发电上网价格不足以弥补发电成本。考虑到天然气发电对于环保减排的重要意义，我们建议应该进一步加大天然气发电补贴力度，提升天然气发电比重。

基于上述分析，我们认为，天然气在一次能源消费中的比例在 2027 年达到 20%是可行的。此外，从国际经验来看，英国在 20 世纪 60 年代发现新的天然气气源后，开始大面积推进使用天然气替代煤炭、石油等高污染能源，天然气在一次能源消费中的比例从 1968 年的 1%增长到 1978 年 19%，截至 2008 年，这一比例超过了 40%。

### 3.2 将可再生能源占比提高到 20%

上海市“十二五”规划要求 2015 年可再生能源在一次能源消费中的占比达到 12%。同时根据我国对外界承诺的 RPS（可再生能源比例标准）要求，2020 年可再生能源占一次能源消费比重应该达到 15%。我们认为，经过努力，上海在 2027 年达到 20%是有可行性的。具体分析如下：

（1）外来新能源发电预期达到一次能源消费的 15%。

目前上海市外来电中，新能源发电主要包括水电和核电，当前外来电新能源消费占全市一次能源消费的比重超过 6%，上海“十二五”规划预期 2015 年这一比例达到 11%。相信随着全国 RPS 目标的实现，2027 年上海外来新能源发电占一次能源消费比例可以达到 15%左右。

（2）风能比例达到 4%

2010 年末，上海市风电装机达到 21 万千瓦，“十二五”规划装机量达到 100 万千瓦。上海市地处沿海，具有丰富的海上风能资源，据估计，上海沿海风能蕴藏量超过 3300 万千瓦，并且是国家扶持的优先发展风电技术区域，随着风电技术的不断成熟，风能的开发利用逐渐提高。我们认为，即便风能的投资成本和发电成本都比较高，但通过政府大力补贴，2027 年上海风电装机量应该可以达

到 1000 万千瓦左右，届时，以 2800 小时/年计算，风电年发电量将达到 280 亿千瓦时，从而风能在全部能源消费中的比例达到 4%左右。

### 3) 太阳能占比提高至 1%

目前光伏发电在上海市的应用仍然有限，“十一五”期末光伏发电总装机容量仅为 2 万千瓦。从德国的经验来看，政府的扶持和补贴是推动光伏发电的关键。德国政府通过提供长期低息贷款促进光伏系统建设和光伏发电研发，同时通过设定较高的电价上网补贴，刺激私人投资光伏发电项目，目前，德国光伏发电占其发电总量的 5%。我国目前对光伏发电上网电价的单位补贴额度也仅为德国的一半左右，我们建议进一步加大对光伏发电的研发和应用的财政补贴，到 2027 年，上海的光伏发电总装机容量估计可以达到 200 万千瓦，年均增长 33%。基于此，我们预计太阳能在总能源消费中的比重会接近 1%。

## 3.3 将 IGCC 发电占一次能源比例提升至 5%

IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle)，即整体煤气化联合循环发电系统，是一种有发展前景的洁净煤发电技术。其优点在于发电效率高（目前国产水平已经达到 45%以上），且进一步提高的空间大。与经一般脱硫脱硝技术处理的燃煤电厂相比，IGCC 吨煤污染物的排放量仅为前者的 10%，其中：1) 脱硫效率可达 99%以上，二氧化硫排放相当于常规电站最优情况的 5-10%，2) 氮氧化物排放只有常规电站的 15%~20%；3) 颗粒物排放占常规电站 10%<sup>8</sup>。

发展 IGCC 的最主要障碍是缺乏其他新能源所享受的电价补贴。据估计，与近年上海火电上网价格（约 0.5 元 / 度）相比，使用已有的较成熟技术的 IGCC 发电每度电需要补贴约 0.3 元。随着技术的进一步成熟，所需补贴会继续下降。

目前上海准备在“十二五”期间启动漕泾 IGCC 示范项目，项目计划 IGCC 发电装机容量 80 万千瓦<sup>9</sup>，这一项目如果启动，则意味着上海 IGCC 年发电量将达到 50 亿千瓦时左右（以 6500 小时/年计算），约为 2012 年上海市发电总量的 5%。我们建议加大对 IGCC 发电的补贴力度，在尽快推进 IGCC 示范项目的基础上进一步推广 IGCC 的应用。我们预计，如果有足够力度的扶持政策，今后十几年内上海 IGCC 发电有望快速发展，其占一次能源消费的比重可以达到 5%。

## 3.4 具体措施

推动实现上述目标的具体政策应该包括：

1) 通过税费政策提高常规煤炭消费的成本。支持中央尽快出台提高煤炭资源税的政策，同时上海可以率先大幅提高对 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放的收费标准。

2) 大幅提高对清洁能源的补贴。目前全国对新能源的补贴占 GDP 比重约为 0.2%，上海市政府的额外补贴占 GDP 比重约为 0.05%。而这个数字在美国和德

<sup>8</sup> 许世森，华能集团清洁能源技术研究院，2013 年。

<sup>9</sup> 《上海漕泾 IGCC 示范项目初可报告》，2009 年。

国分别为 0.4%和 0.7%。为了大幅提高未来清洁能源的比重，政府需要大幅提高对清洁能源的补贴力度，如可以将对污染收费的部分收入用于补贴清洁能源。建议上海市提高本地补贴，主要用于清洁能源汽车、清洁能源的设备投资和维护以及提高新能源电价补贴等方面。建议上海市率先利用部分对污染的收费定向补贴 IGCC 发电，并推动中央政府对该清洁能源技术的出台支持政策。

3) 应研究采用新能源凭证交易制度。超额完成新能源发电目标的电力企业可以出售凭证，未完成目标的电力企业需要购买凭证，事实上形成不达标企业补贴超额达标企业的机制。

## 四、调整船舶运输结构，将污染排放降低 50%

我们建议，应该采取一系列结构调整和污染治理措施，在十五年内将上海与船舶运输相关（港口、船舶及码头堆场等）的大气污染排放降低 50%。根据我们的模型估算，如果这一目标得以实现，与基准情形（航运船舶排放下降 15%）相比，对船舶运输的结构调整和排放治理可以在 15 年内帮助上海 PM2.5 降低 2.0 微克/立方米。

### 4.1 改善航运货物结构，提高货物中转比例

相对于伦敦、香港、新加坡等传统航运中心，上海港的中转货物量、集装箱运输比例以及高端航运服务业的发展程度相比要低很多。这些结构性问题加大了污染排放。上海港应有条件借助自贸区改革的动力，重点提高高端航运服务业的比重，明显提高货物中转量比例。具体可考虑的措施包括：

1. 上海应主动退出部分低端运输业，尤其是高污染的散装货运输，减少散货运输的比例，不再把提高港口货运吞吐量（吨数）作为主要目标，避免与周边地区的港口进行低端物流的恶性竞争，将眼光更多地关注于物流服务附加价值的提高。
2. 借鉴伦敦、香港、新加坡等自由港体制的经验，上海应该通过全方位改革来提升其中转港地位，争取成为东北亚的中转中心。这些改革至少应该包括简化提货和交易程序，采用积极灵活的定价策略，提供开放资本项下的航运融资和海上保险服务，提供国际认可的海事仲裁，建立吸引从事高端物流、法律、金融、保险的人才环境，吸引跨国公司在自贸区内设立国际配送中心。
3. 借鉴新加坡的经验，上海应充分发挥在船舶修造、船舶装备、海洋支持与服务方面的实力，重视新技术开发在航运中的应用。引入投资者和风险资金来推动海运、近海和海洋工程建设。在政策方面，大力吸引高端制造业落户上海自贸区，推动上海整体进出口贸易向高端延伸。

4. 上海在规划物流基础设施的过程中，应重视将铁路运输延伸至主要深水港，以大幅提高水路向铁路运输分流的比例。根据国际经验，上海以铁路分流水运物流的比例至少可以提高十倍，甚至几十倍。铁路替代公路分流，将大幅降低运输过程中产生的污染。

降低散货比例、提高物流的附加价值、提高水水中转运比例等结构调整必然能明显降低航运船舶的污染排放强度。

## 4.2 大力推行船舶靠港换油，建立排放控制区，推广船舶泊岸供电和码头油改气、油改电、LNG 混合动力船只

### 4.2.1 借鉴香港的《乘风约章》，借助自贸区优势鼓励作业停靠船只签署换油协议，快速和大幅度推广低硫油

由船只排放造成的 PM2.5 占航运船舶 PM2.5 整体移动源排放量的 90% 以上。造成船只 PM2.5 排放量高的最主要原因是所使用的油品较差。其中远洋船只吨位较高，排量大，所排放的 PM2.5 的量最多。而沿海内贸船只以及内河船只的突出问题是油品品质参差不齐，大部分船只使用的油品质量较差，基本上在 IMO（国际海事组织）的规定的限值附近。虽然内河船只大气污染物排放较小，但因为靠近市区，所以内河船只的污染排放对市区的影响也很大。

香港在 2011 年 1 月实施的《乘风约章》对上海在推行低硫油方面有重要的借鉴意义。上海应借助自贸区的比较优势，尽快提出类似于《乘风约章》中的燃油协议，鼓励在上海作业停靠的船只所在的航运公司自愿签署换油协议，在进港的时候改换含硫量不高于 0.5% 的燃油，在出港的时候再换回普通燃油。

香港在施行换油协议以后，二氧化硫的排放降低了 80%，PM2.5 的排放也显著降低。自愿签署香港燃油协议的公司和不签署的公司要承担不同的运营成本。香港对于自愿签署的公司可以获得 60% 的港内设施费用以及灯标费用的减免，但是航运公司必须自己承担换油成本。根据船只的运级、船种、排量的不同，将承担换油成本的 50%-80%。我们建议，上海应借鉴香港的经验，推行燃油更换协议，可以初步设定有效期为两年。

国际海事组织（IMO）在一些重要的港口城市或者地区将建立排放控制区（ECA），协调不同地区对船舶排放的控制。香港已经出台的《乘风约章 2013》，在保持 0.5% 低硫油泊岸换油政策的基础上，加大了与珠三角地区的合作，确保在 2013 年底推出一致的强制性排放法规。我们建议，上海在实施燃油更换计划的基础上，应推动在长三角地区建立减排统一控制区，将长三角地区的港口航运燃料含硫量统一控制。

目前亚洲地区还没有一个地区被划定为污染排放控制区（ECA）<sup>10</sup>，上海应当协同长三角地区的其它港口先于珠三角地区建设亚洲第一个 ECA。按照 IMO

<sup>10</sup> ECA 是 Emission Control Area 的简称，具体分为硫控制区和氮控制区，由国际海事组织提出并首次在 MARPOL 附则 IV 中作出规定。

附则规定，ECA 燃油含硫量不高于 0.1%。在上海港区，因 SO<sub>2</sub> 形成的 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 进入 PM<sub>2.5</sub> 的颗粒物内，所占的质量比重大约为 14%。因此，在低硫油措施中，将硫含量限值从目前 3.5% 降到 0.1%，可将航运船舶排放降低 10% 以上。

#### 4.2.2 推行使用清洁燃料船只的更新升级

国家交通部已经开始推行使用清洁燃料的船只的更新升级，使用 LNG 作为船用能源的步伐正在加快。混合动力船只可以用 LNG 替代柴油达到 50-80%，并且运行稳定，我国已经拥有了自主知识产权的 LNG/柴油混合动力船舶发动机技术。由于船舶发动机的新技术不断取得突破，我们估计，在 2020 年前有望完成 30% 内河船只的发动机改造，在 2027 年前完成 70% 的发动机改造。估计到 2027 年，内河船只的发动机改造和清洁燃料升级可帮助降低航运船舶排放近 10%。

上海应积极推进中国籍内贸船只和远洋船只的发动机升级改造，实现双燃料驱动。但是，上海港停靠的远洋船只中只有 4.2% 的中国籍的。我们建议，借鉴欧洲、北美等地区设立国际海事组织的污染排放控制区，应在长三角地区尽快成立污染减排控制区，在 2027 年前使进出上海港的远洋船只的 90% 完成发动机升级改造。上海还应鼓励国际远洋船只使用混合动力和清洁油品，在泊岸换油政策的基础上，将液化天然气占比提高到 40%。估计到 2027 年，国际远洋船只的发动机改造和双燃料驱动可以帮助航运船舶减排 15% 以上。

#### 4.2.3 在 LNG 集卡试点的基础上，进一步推动港区油改气、油改电的应用

港区集装箱运输卡车是污染排放的一个重要来源。落实港口 LNG 集卡政策，可以减少港口的污染排放。宁波港已经尝试更换 LNG 集卡，不仅可以降低污染排放，还有不可忽视的经济效益。使用 LNG 集卡，单一车辆每年可以节约成本 10 万元<sup>11</sup>。我们建议，在 2015 年前完成港区内 500 辆 LNG 集卡试点。对于每台 LNG 集装箱车辆一次性给予补助 2 万元，对于每台槽罐运输车辆给予 3 万元补助。在 2017 年完成港区内 50% 集卡的更换，在 2025 年完成全部的集卡更换。

港区的机械作业设备也是污染排放的来源之一，占港口污染总排放的 3.5% 以上。将港口的机械作业设备，更换为 LNG 发电供应运行，可以缓解 PM<sub>2.5</sub> 的排放。鉴于深圳港已确定在 2013 年底前推行换油政策，并且完成港区内所有油改气、油改电设备的转换，上海也应当加速在 LNG 集卡以及码头作业设备转换的速度。估计到 2027 年，港区机械作业的油改气、油改电措施可以帮助航运船舶 PM<sub>2.5</sub> 减排约 3%。

#### 4.2.4 全面实施岸电

根据船只的工况（巡航、进出港、停泊、装卸）来看，在船只停靠和装卸货时所产生的 PM<sub>2.5</sub> 的排放占船只 PM<sub>2.5</sub> 总排放量约 10%。目前上海港船舶在停泊和装卸货时，主要靠辅机和蒸汽锅炉来维持作业和提供基础供电。推广使用岸电将明显降低船只在港口的污染物排放。

在 2015 年完成洋山港和吴淞国际油轮码头岸基供电建设基础上，上海港应该全面完成所辖港区内的岸电设施建设和改造，为全面推广岸电技术做充足准

<sup>11</sup>陈一民，宁波市交通局，2011 年 [http://www.zgjtb.com/content/2011-06/09/content\\_189914.htm](http://www.zgjtb.com/content/2011-06/09/content_189914.htm)

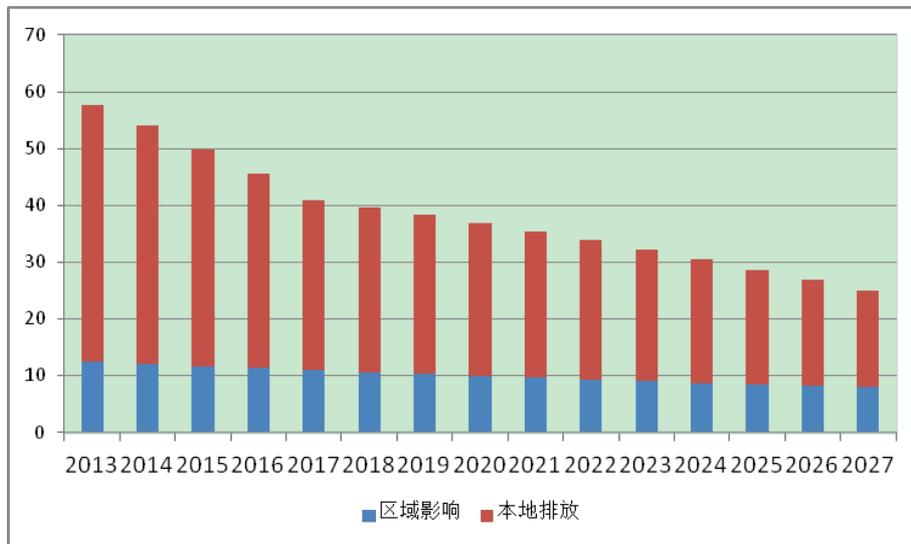
备。建设岸电设施，要考虑不同船种的特殊性，要满足不同船只不同用电负载的要求，完善电缆管理系统。要使用 LNG 供电，最大程度降低污染。考虑到港口吞吐量快速增长的因素，到 2027 年之前，估计全面推广岸电技术可以帮助航运船舶减排 5% 以上。

在航运与港口吞吐量增长不超过 30% 的情况下，只要上海从全局上对船舶航运结构进行调整，并对相关污染排放采取一系列行之有效的控制措施，上海在未来 15 年内完全有条件将航运船舶污染排放降低 50%。

## 五、小结：结构调整对 PM2.5 减排的贡献

我们的模型估算表明，如果实行了已规划的环保政策，同时通过大力改革实现上述各项结构调整目标，上海就能够在十五年内将 PM2.5 降至 25。在“结构大调整”政策情景之下，我们模拟的 PM2.5 的减排路径参见图 2。

图 2 “结构大调整”政策下的 PM2.5 减排路径图



资料来源：课题组模型估计

在上海实现 PM2.5 总体目标所需减排的 35 微克/立方米中（十五年内从 60 降到 25），已规划的环保政策和其他地区减排可以帮助实现减排 18 微克/立方米，而我们所建议的各项结构性政策将减排另外的 17 微克/立方米。

各项结构调整政策所实现的具体减排效果如下：

1. 产业结构调整，将帮助减排 5.9 微克/立方米；
2. 公路与轨道交通结构调整，将帮助减排 4.5 微克/立方米；
3. 能源结构调整，将帮助减排 2.6 微克/立方米；
4. 船运污染治理与结构调整，将帮助减排 2.0 微克/立方米；

具体减排分解如表 3 所示：

**表 3 “结构大调整”政策下的 PM2.5 减排来源分解**

	减排幅度	减排的贡献率
十年内减排的总幅度	<b>35</b>	<b>100%</b>
其中：		
<b>现有政策的减排效果</b>	<b>15</b>	<b>43%</b>
<b>结构调整的减排效果</b>	<b>15</b>	<b>43%</b>
1) 产业结构调整	<b>5.9</b>	<b>16.9%</b>
2) 公路与轨道交通结构调整	<b>4.5</b>	<b>12.9%</b>
3) 能源结构调整	<b>2.6</b>	<b>7.4%</b>
4) 船运污染治理与结构调整	<b>2.0</b>	<b>5.7%</b>
周边区域的减排效果	<b>5=3+2</b>	<b>14%</b>

资料来源：课题组根据模型估计

## 第六节 十二项具体建议

### 一、 大幅降低重工业比重，加速发展高端服务业

1. **将钢铁、石化企业的高污染设施搬迁出城。**在今后十年左右的时间，宝钢可以通过扩大其新疆的钢铁产能逐步实现产能转移，同时也可以将部分冶炼与加工环节迁移到如宁夏等西部地区、广东湛江港以及国外。为了推动搬迁，上海一方面应该通过提高行业排放标准和排污费等方式增加本地高污染企业的成本，另一方面可以通过建立碳交易机制等方式来鼓励企业削减污染产能。
2. **推动发展高端服务业。**目前，上海的服务业占 GDP 比重约为 60%，高端服务业仅占 GDP 的 35%左右，而在多数国际化大都市高端服务业的比例已经达到 60%。上海应充分借助自由贸易区的平台和机遇，通过对私营部门和外资的准入放宽，金融市场化改革，以及税收、融资、人才引进等方面的改革来推动金融、医疗、电子商务、第三方物流、I T、咨询等高端服务业的发展，带动服务业的不断升级。

### 二、 控制汽车保有量

3. **制定中长期汽车保有量控制目标，将汽车保有量的年度增长率降至 2%。**应该根据 PM2.5 减排目标和交通道路增长目标制定汽车保有量的增长规划。我们建议将今后 15 年的汽车保有量年均增长率控制在 2%。制定规划后应予以公示。
4. **考虑限制汽车牌照的使用年限和（或）推出拥堵费制度，以达到限制汽车保有量和公路交通流量增长的目的。**
  - a. 借鉴新加坡的经验，将新牌照的使用年限设定为 10 年，形成循环拍卖制度。对以前拍出的老牌照，改为有限牌照，使用年限为 10 年加上根据公式计算的补贴年限。
  - b. 应考虑对在市区拥堵路段行驶的机动车辆（公共汽车、救护车、消防车、警车除外）征收拥堵费。车辆一旦进入，需按天缴纳税费。
  - c. 将汽车拍照拍卖和拥堵费收入用于支持轨道交通建设和新能源汽车。

### 三、 改变出行模式

5. **在 15 年内上海应该将轨道交通总长度提高至 1200 公里。**该建议参考了主要国际大都市的轨道交通发展情况和预算约束。达到这个目标，将使 2027 年上海市每万人地铁里程数提高到 0.4 公里，接近国际大都市的平均水平。在比预期新增的 230 公里中，建议包括轨道交通 1、2 号线的副线以及市中心城区的小环线。
6. **提高地铁列车节数和改善线路轨道规划，以明显提高承载效率。**加快车站升级，将繁忙区域列车长度提高到 11 节或 12 节，在核心区域建设新线路与附属线路实现快慢车道分驶，规划快速线路（如浦东机场直达上海火车站和虹桥机场）运营。
7. **除使用汽车牌照拍卖和拥堵费收入外，通过引入社会资金、独立发行市政债等方式来解决公共交通基础设施建设资金短缺的问题。**

#### 四、改善能源结构

8. **通过税费政策提高常规煤炭消费的成本。**支持中央尽快出台提高煤炭资源税的政策，同时上海可以率先大幅提高对 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放的收费标准。
9. **大幅提高对清洁能源的补贴，包括补贴 IGCC。**目前全国对新能源的补贴占 GDP 比重约为 0.2%，上海市政府的额外补贴占 GDP 比重约为 0.05%。而这个数字在美国和德国分别为 0.4% 和 0.7%。政府应大幅提高对清洁能源的补贴力度，可以将对污染收费的部分收入用于补贴清洁能源。建议上海市提高本地补贴，主要用于清洁能源汽车、清洁能源的设备投资和维护以及提高新能源电价补贴等方面。建议上海市率先利用部分对污染的收费定向补贴 IGCC 发电，并推动中央政府对该清洁能源技术的出台支持政策。
10. **研究采用新能源凭证交易制度。**超额完成新能源发电目标的电力企业可以出售凭证，未完成目标的电力企业需要购买凭证，事实上形成不达标企业补贴超额达标企业的机制。

#### 五、控制航运污染

11. **改善船运货物结构，提高货物中转比例。**充分借鉴香港和新加坡自由港的体制和国际航运中心建设的经验，通过全方位改革来创造提升其中转港地位。应该避免与周边港口进行低端物流的恶性竞争，不再以追求吞吐量为主要目标，主动退出部分低端航运服务。通过内河航道改造、江海直达船只标准化等措施促进内贸货物水水中转，通过一站式船舶报验服务、特定集装箱货物关税减免、鼓励开辟新航线等措施促进外贸货物水水中转。应重视将铁

路运输延伸至主要深水港，以大幅提高水路向铁路运输分流的比例。

- 12. 大力推行船舶靠港换油政策，建立排放控制区，全面推广船舶泊岸供电和码头油改气、油改电、LNG 混合动力船只。**制定靠港换油协议，让船运公司自愿加入。建立排放控制区，将所换燃油含硫量控制在 0.1% 以内，将混合动力燃油中的液化天然气含量提高到 40% 以上。通过简化运输途径和使用进口的液化天然气，建设专门的码头提供 LNG 供电。