

中国城市空气质量改善和 温室气体协同减排方法指南





关于亚洲清洁空气中心

亚洲清洁空气中心（Clean Air Asia，简称 CAA）是一家国际非营利性组织，致力于改善亚洲区域空气质量，打造健康宜居的城市。CAA 成立于 2001 年，是联合国认可的合作伙伴机构。CAA 总部位于菲律宾马尼拉，在中国北京和印度德里设有办公室。

CAA 自 2002 年起在中国开展工作，专注于空气质量管理 and 绿色交通两个领域。2018 年 3 月 12 日，CAA 获得北京市公安局颁发的《境外非政府组织代表机构登记证书》，在北京设立亚洲清洁空气中心（菲律宾）北京代表处。CAA 接受公安部及业务主管单位生态环境部的指导，在全国范围内开展大气治理领域的能力建设、研究和宣传教育工作。



关于报告

在亚洲清洁空气中心的支持下，清华大学贺克斌院士和张强教授团队编制了《中国城市空气质量改善和温室气体协同减排方法指南》，旨在为城市层面实现空气质量改善和温室气体协同减排提供系统性方法参考，包括统一的排放清单编制方法，基于城市经济结构、资源禀赋和主要污染源的城市归类方法。本报告根据不同类别城市的减排难度和潜力提出城市从规划层面实现协同治理和效益的相应措施，可为不同类型的城市从规划层面实现协调效益提供参考。



作者团队

贺克斌 教授 / 院士，清华大学 / 中国工程院

张 强 教授，清华大学

郑 博 博士，清华大学

施沁人 博士研究生，清华大学

闫 柳 博士研究生，清华大学

目录

CONTENTS

背景介绍	2
1.1 城市空气质量水平距达标仍有差距	2
1.2 中国实现 2030 年碳排放达峰面临挑战	3
1.3 大气污染物与温室气体存在协同减排路径	5
1.4 城市尺度协同减排路径的已有基础和不足	7
1.5 城市尺度协同减排路径方法指南	8
城市尺度统一排放清单编制方法	9
2.1 统一的源分类体系	9
2.2 清单编制方法和数据获取规范	10
2.3 重点部门编制方法介绍	11
2.4 本指南中使用的全国工业点源数据库与城市排放清单	14
基于产业特征的城市分类系统	15
3.1 城市支柱产业识别与分类	17
3.2 城市特征分析	18
各部门重点协同减排政策	21
4.1 工业部门协同减排政策	21
4.2 民用部门协同减排政策	26
4.3 交通部门协同减排政策	28
不同类型城市协同减排路径	30
5.1 能源生产型城市	32
5.2 重工业型城市	33
5.3 轻工业型城市	33
5.4 高新技术型城市	34
5.5 服务型城市	35
5.6 农业型城市	36
5.7 前工业化型城市	37
城市案例分析	38
大同市 – 能源型城市	38
唐山市 – 重工业城市	40
泉州市 – 轻工业城市	43
潮州市 – 高新技术型城市	45
北京市 – 服务型城市	47
结论和建议	49
附录	50
参考资料	52

背景介绍

1.1 城市空气质量水平距达标仍有差距

当前,我国大气污染形势严峻,以细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)为特征污染物的区域性大气环境问题突出,有损于公众健康和社会福祉。为此,我国在大气污染防治方面作出了不懈努力,防治进程由排放总量控制转为关注排放总量与环境质量改善相协调,由单一污染物控制转向多污染物协同控制,由控制工业点源为主转向多污染源协同控制,由属地管理转向区域联防联控管理。我国空气质量标准经过多次完善、修正,逐步与国际接轨。环境保护部与国家质量监督检验检疫总局于2012年2月29日发布了《环境空气质量标准》(GB 3095—2012),在改善环境空气质量、保护生态环境、保障人体健康等方面发挥了重要作用,引领了我国环境管理的转型。新标准中污染物项目限值的设置综合考虑了WHO关于大气污染物环境风险防控的研究成果和我国当前实际形势,增加了 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的8h浓度限值监测指标。2013年以来,《大气污染防治行动计划》的实施推动我国城市空气质量管理进入新阶段,大气污染防治工作取得阶段性成果,重点区域空气质量明显好转。2017年,全国重点城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降35%,京津冀、长三角和珠三角等重点地区分别下降39.6%、34.3%和27.7%;北京市2017年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度达到58微克/立方米,全面实现了大气十条的预定目标。

Annual Average Concentrations of Six Primary Pollutants in 74 Chinese Cities (2013-2017)

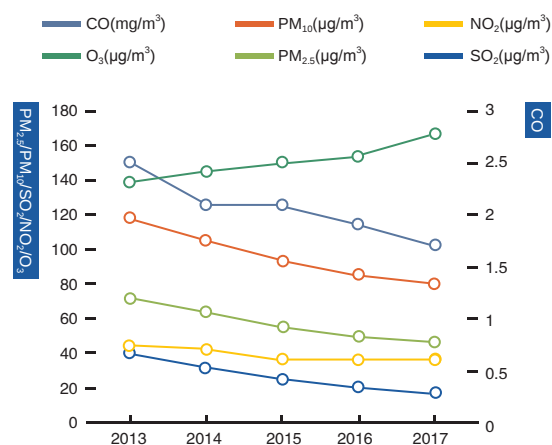


图1 2013–2017年间中国74个城市六种主要大气污染物的年均浓度变化情况

来源:《突破:中国清洁空气之路》,亚洲清洁空气中心

然而,我国城市空气质量依然面临严峻挑战。造成城市大气污染有几点主要原因:一是产业结构不合理,一些城市的结构偏重、布局偏乱,粗放型、高能耗工业聚集,例如河北邯郸市“城中有钢”,石家庄市“煤电围城”;二是相关能源转换和用能装备技术能效仍然偏低;三是能源结构中煤炭占比高,能源效率较低,直接进入终端燃烧的原煤产生了大量污染物;四是运输结构不合理。2018年全国338个城市空气质量达标率仅为35.8%,20.7%的城市空气质量级别仍未达到良,全国城市空气质量状况距 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$

的国家二级标准要求还有很大差距；同时，臭氧、硝酸盐、铵盐和黑碳污染总体上有加重的趋势。2013–2017 年间，全国 74 城市大气臭氧浓度明显升高，珠三角和长三角臭氧超标率分别在 2015 年和 2017 年超过了 $PM_{2.5}$ ，诸多城市群空气质量管理进入 $PM_{2.5}$ 和臭氧协同防治的深水区。为持续改善空气质量，2016 年“十三五”生态环境保护规划中提出了确保到 2020 年全国 338 个地级城市空气质量优良天数比率达到 80% 以上，未达标城市 $PM_{2.5}$ 的浓度比 2015 年平均下降 18% 的约束性目标。2018 年国务院发布《打赢蓝天保卫战三年行动计划》，提出经过三年努力，大幅减少主要大气污染物排放总量，协同减少温室气体排放，进一步明显降低 $PM_{2.5}$ 浓度，明显减少重污染天数，明显改善环境空气质量，明显增强人民的蓝天幸福感，同时为实现 2035 年生态环境根本好转、全国城市空气质量全面达标的目标打好基础。按照《大气污染防治法》要求，空气质量未达标城市应当依法编制大气环境质量限期达标规划，采取措施控制或逐步削减大气污染物排放量，按照国务院或省级人民政府规定的期限达标。

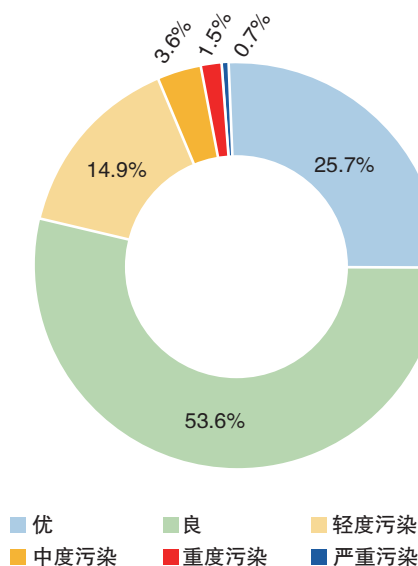


图 2 2018 年 338 个城市
环境空气质量各级别天数比例

数据来源：2018 中国生态环境状况公报

综上所述，我国未来空气质量改善任务仍然艰巨，以城市为单元的大气污染防治行动将持续推进与升级。随着末端控制措施减排空间逐渐压缩，未来空气质量改善需要从以下几个方面进行努力：调整优化产业结构，推进产业绿色发展；加快调整能源结构，构建清洁低碳高效能源体系；积极调整运输结构，发展绿色交通体系；优化调整用地结构，推进面源污染治理；实施重大专项行动，大幅降低污染排放；强化区域联防联控，有效应对重污染天气。未来通过转变发展方式、调整四大结构，在改善空气质量的同时也能协同减少温室气体。

1.2 中国实现 2030 年碳排放达峰面临挑战

IPCC 第五次报告指出，有证据显示 1750 年至今的总人为辐射强迫相比 2005 年报告中的数值提高了 43%，人类活动很可能是造成气候变暖的原因。为避免全球气候变化威胁到人类和生态系统的生存发展，2015 年召开的巴黎气候变化大会提出本世纪末之前要将把全球平均气温较工业化前水平升高控制在 2°C 之内，并为把升温控制在 1.5°C 内而努力。随着经济的快速发展，中国已经成为世界上最大的能源消耗国和碳排放国。作为负责任的大国，2015 年《巴黎协定》中我国“国家自主决定贡献”提出我国二氧化碳排放将于 2030 年左右达到峰值并争取尽早达峰、单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 60%–65%。

2013–2016 年，我国碳排放量平稳下降。研究显示，2013–2016 年间，经济增长、人口增长和天然气使用比例的上升使我国碳排放增加 19.9%，而工业产业结构调整、煤炭在能源消费中占比的下降和能源强度的下降则分别使得我国碳排放下降了 10.0%，7.8% 和 5.1% (Guan et al., 2018)。在经济增速换挡、资源环境约束趋紧的新常态下，我国能源结构调整进入了油气替代煤炭、非化石能源替代化石能源的更替期。2017 年我国煤炭占一次能源消费总量的比重下降到

了 60.4%，而天然气和非化石能源的占比分别上升到了 7.3% 和 13.8%（图 3）。空气质量政策在压减煤炭消费量方面起到了重要作用。《大气污染防治行动计划》首次明确提出要制定煤炭消费总量的中长期控制目标，并对京津冀鲁、长三角、珠三角三大重点防控区域提出了煤炭负增长的要求。据报告估算，煤炭总量控制措施涉及的九个省市区在 2017 年能实现削减 4.26 亿吨燃煤并带来 6.05 亿吨 CO₂ 减排效益（中国清洁空气联盟，2014）。生态环境部发布的《中国空气质量改善报告（2013–2018 年）》中指出，2018 年中国单位 GDP 的二氧化碳（CO₂）排放较 2005 年降低 45.8%，提前达到并超过了 2020 年单位 GDP 的 CO₂ 排放降低 40% ~ 45% 的目标，为实现中国 2030 年左右碳排放达峰并争取尽早达峰奠定了坚实基础。

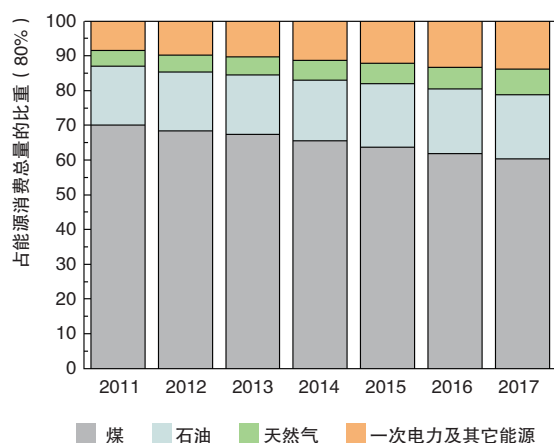


图 3 中国 2011–2017 年能源消费构成

来源：中国能源统计年鉴

2017–2018 年，受到经济上行等因素的影响，我国能源消费呈现出回暖态势，煤炭消费转为正增长。根据研究估计，2017–2018 年中国碳排放未能延续 2013–2016 年的下降态势，出现反弹（Peters et al., 2017; Liu et al., Submitted）。许多研究进行了中国未来能源和碳排放预测，如图 4 展示了基准情景和“重塑能源”情景下中国能源消费的情况（Zhou et al., 2019）。该研究认为基准情景下中国无法实现 2030 年碳达峰目标，而“重塑能源”情景下中国碳排放将于 2025 年达峰。

“重塑能源”情景下，中国的煤炭消费量将于 2020 年达峰，约 28.8 亿吨标准煤，到 2050 年将降至 10.2 亿吨标准煤。非化石能源占一次能源消耗的比例在 2030 年达到 28%，2050 年达到 55%，实现巴黎协定中关于非化石能源占比的目标。图 5 是 2015–2050 年的碳排放情况，重塑能源情景下中国碳排放将于 2025 年达峰，排放量为 95.9 亿吨。工业部门首先达峰，然后依次是建筑和交通部门。该研究指出实现“重塑能源”情景面对两方面的压力：一是我国仍处于快速城市化进程中，2030 年前我国能源消费总量还将持续增长；二是由于非化石能源的准备周期和建设周期长、投入高，能源系统向非化石资源转型面临的阻力较大。综合来看，中国实现 2030 年达峰目标仍然面临着挑战。

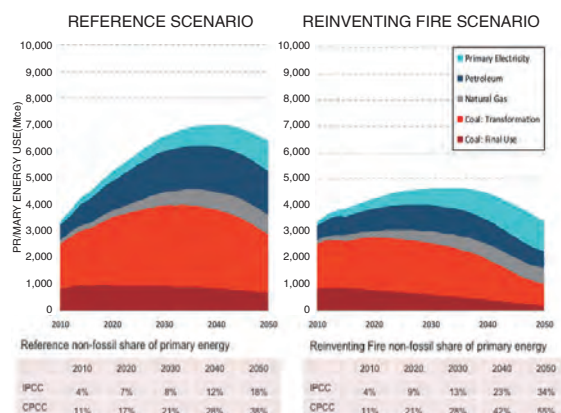


图 4 基准情景（左）与“重塑能源”情景（右）下我国未来能源消耗情况（Zhou et al., 2019）

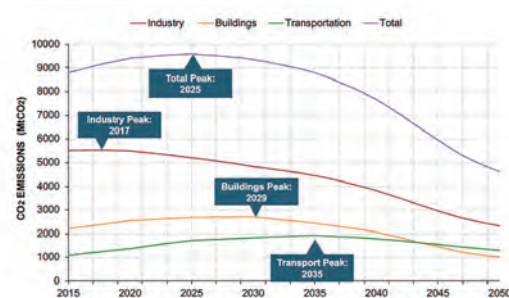


图 5 “重塑能源”情景下我国碳排放情况（Zhou et al., 2019）

1.3 大气污染物与温室气体存在协同减排路径

1.3.1 空气污染和气候变化之间的相互作用

气候变化与空气污染之间具有复杂的相互作用。许多传统污染物能够通过直接效应和间接效应影响气候，气候变化也能作用于污染物转化的方向及速率。

在应对全球气候变化方面，IPCC AR5 指出温室气体的升温效应是造成全球气候变暖的最主要原因，而其他人为源强迫（包括气溶胶辐射强迫、土地利用变化等）总体具有降温效益（图 6）。CO₂ 寿命长、排放量大，是最重要的温室气体，也是应对气候变化进程中需要进行排放削减的主要对象。甲烷（CH₄）、氧化亚氮（N₂O）、氢氟碳化物（HFCs）、全氟碳化物（PFCs）及六氟化硫（SF₆）几种温室气体的全球升温潜势（GWP）虽然一般远大于二氧化碳，但由于它们在空气中含量少，重要性不及二氧化碳。黑碳气溶胶对可见光到红外光波段的太阳辐射具有强烈的吸收，升温效益与甲烷相当，仅次于 CO₂，同时它还是一种空气污染物。由于其寿命较短，近期的减排能快速降

低辐射强迫同时产生健康效益。以硫酸盐为代表的其他气溶胶一般具有负的辐射强迫，能够产生制冷效应，抵消一部分温室气体导致的全球升温潜势，因此减排 SO₂ 等污染物使得硫酸盐浓度下降可能会对应对气候变化造成更大的压力。但是，有研究表明气溶胶直接效应带来的空气污染健康损失大于气溶胶制冷效应下降导致的健康损失，从健康角度来看削减气溶胶浓度仍然可带来额外的健康效益 (Xing et al., 2016)。

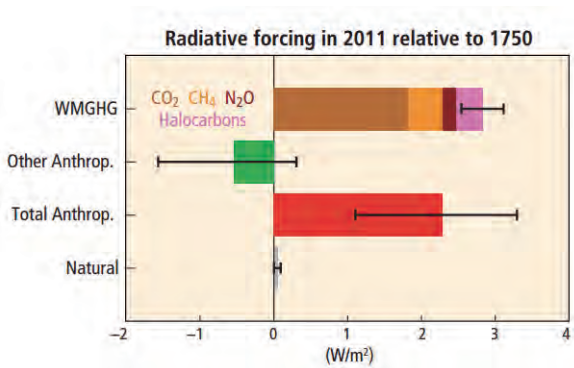


图 6 2011 年相对 1750 年的辐射强迫

来源：IPCC 第五次评估报告

表 1 不同物种的气候效应和健康效应

物种	气候效应	健康效应
二氧化碳（CO ₂ ）	升温效应。最重要的温室气体。	—
甲烷（CH ₄ ）、氧化亚氮（N ₂ O）、氢氟碳化物（HFCs）、全氟碳化物（PFCs）及六氟化硫（SF ₆ ）	升温效应。这些温室气体的全球升温潜势（GWP）一般远大于二氧化碳，但由于它们在空气中含量少，重要性不及二氧化碳。	—
黑碳气溶胶（BC）	升温效应。升温效应与甲烷相当，仅次于 CO ₂ ；寿命较短，因此减排黑碳可以在短期内快速产生响应。	对人体健康有不利影响；可导致逆温、降低边界层高度，使得扩散条件恶化，加剧雾霾污染。
硫酸盐及有机气溶胶	降温效应。能抵消一部分温室气体导致的全球升温潜势。	对人体健康有不利影响。
臭氧	升温效应。同时可以通过损害植物的生产力而间接导致全球 CO ₂ 浓度上升。	对人体健康有不利影响。

气候变化也能作用于污染物转化的方向及速率。现有的研究表明，在全球升温背景下，气候对大气环流的影响可导致气溶胶浓度上升，有研究表明在气候变化背景下未来北京市的雾霾天气将出现得更加频繁 (Cai et al., 2017)；污染地区，尤其是在城市区域以及重污染时段，臭氧浓度会进一步上升 (Stowell et

al., 2017)。此外，热浪等极端天气事件与空气污染叠加的发生频率可能会增加，放大对人类的负面健康效应 (Silva et al., 2017)。

根据以上描述的空气污染和气候变化之间的相互关系，总体来看应对空气污染和气候变化问题是相辅相成的，未来应当坚持两者的协同控制。

1.3.2 大气污染物和温室气体的协同减排

在 1.3.1 节中已经提到二氧化碳是最重要的一种温室气体，后文中主要讨论大气污染物与二氧化碳排放的协同减排。我国以化石燃料为主的一次能源结构决定了我国二氧化碳和大气污染物排放具有高度同源性。大气污染物与碳排放的控制策略可分为末端控制和协同减排两大类。末端控制措施一般只对某一方面

有益，例如使用脱硝脱硫除尘装置和碳捕集技术（CCS）可以分别减少大气污染物和二氧化碳的排放，但不具有协同效应；末端控制装置还会引起额外的能耗及相应的碳排放。协同减排则从控制化石燃料尤其是煤的使用量出发，通过降低能源强度、清洁能源替代等方式实现污染物和二氧化碳的减排。表 2 给出了目前常见的控制策略。

表 2 大气污染物与二氧化碳的控制策略

部门	领域	具体政策	是否具有协同效益
电力	末端控制	电厂超低排放改造	仅空气质量效益
		CCS 技术	仅碳减排效益
	总量控制	新建项目禁止配套建设自备燃煤电站 除热电联产外，禁止审批新建燃煤发电项目	√
	提高能效	“上大压小”，淘汰落后产能 减少输电损失	√
	能源结构调整	大力发展可再生电力资源	√
供热	末端控制	强化供热锅炉末端控制措施 燃煤锅炉超低排放改造	仅空气质量效益
	提高能效	改造老旧集中供热管网，推进锅炉节能改造	√
	能源结构调整	供热锅炉煤改气 推广热电联产、工业余热、可再生热源等供热技术	√
工业	末端控制	工业提标改造，对于重点行业推动实施超低排放改造 挥发性有机物综合治理	仅空气质量效益
	错峰生产	重点排污单位在冬季调整生产经营活动，减少或者暂停排放大气污染物的生产、作业	仅空气质量效益
	提高能效	工业技术升级和清洁生产 淘汰燃煤小锅炉，推进工业锅炉节能改造	√
	能源结构调整	淘汰燃煤小锅炉，燃煤锅炉清洁能源替代	√
	产业结构调整	对于水泥、钢铁等重点行业，压减过剩产能、淘汰落后产能，整治“散乱污”企业 发展低能耗、高附加值的高新技术工业，限制能源密集行业投资	√
民用	需求控制	提倡低碳生活方式	√
	提高能效	推广新型清洁高效燃煤炉具，分期分批更换传统炉灶，提升热效率 鼓励北方农村地区建设洁净煤配送中心，使用低灰、低硫的洁净煤和型煤，减少高挥发分的低变质烟煤使用 全面执行绿色建筑标准，实施住宅节能改造，提高房屋保温性能	√
	能源结构调整	生活和冬季取暖散煤清洁化替代，“煤改电”、“煤改气”或改为集中供热	√
交通	需求控制	控制机动车保有量	√
	末端控制	加严机动车排放标准，淘汰老旧车辆	√
		油品升级	仅空气质量效益
	提高能效	提高燃油经济性	√
	能源结构调整	推广新能源和清洁能源车辆、作业机械和船舶	√
土地利用	运输结构调整	提倡公共交通出行，优化调整货物运输结构	√
	用地结构调整	扬尘综合治理 禁止秸秆焚烧 农业源氨排放治理	仅空气质量效益

我国城市空气质量管理已经基本形成了从科学理论到技术、管理、考核问责及督察的完整体系。例如，生态环境部会同其他有关部门和地方成立跟踪研究工作组，深入京津冀及周边地区“2+26”城市和汾渭平原的11个城市进行长期驻点跟踪研究、提供技术指导，建立大气污染源排放清单、进行污染来源解析，根据城市污染特征和工业结构提出“一市一策”的综合解决方案。生态环境部完善了目标责任制，对大气污染治理情况和约束性指标进行年度考核，对空气质量恶化、大气污染防治措施不落实的地区及责任人进行问责以确保完成既定目标。我国碳排放目标则仍然停留在宏观层面，缺乏城市尺度的具体目标以及相应的监测体系与考核办法。城市碳排放清单建立和二氧化碳浓度监测等工作仍然处于起步阶段，滞后于低碳发展的实际要求。

总体看来，目前我国处于“蓝天推动低碳”的阶段，由空气质量政策倒逼能源结构调整和产业结构转型升级，在此过程中同时产生碳减排效益。可以预见，直至2030–2035年，我国城市减排路径都将以空气质量目标为主导。大气污染物的末端控制措施在大气十条执行期间在火电和工业部门得到了大面积推广，成效显著。然而有研究报告指出，仅依靠加强末端控制政策，中国在2030年仍有三成左右的城市无法达到国家空气质量标准对PM_{2.5}的要求（年均值35微克/立方米）；只有在深化能源产业结构调整的情景下，全部74个重点城市的空气质量才能在2030年实现全面达标（清华大学、能源基金会，2017）。因此，在现有末端治理的基础上持续优化四大结构，加强空气污染物与温室气体的协同减排将是未来主要的减排策略。

中国于2018年完成了新一轮机构改革，空气质量改善与温室气体减排均归属生态环境部管理，如何实现温室气体和大气污染物协同治理、获得减缓气候变化和空气质量改善的协同效益，是管理部门面临的新课题，也是推动我国发展方式转变的重要机遇。探

索城市尺度的协同减排路径对于将宏观目标转化为政策落地实施至关重要，同时也对推进城市可持续发展具有重要意义。

1.4 城市尺度协同减排路径的已有基础和不足

1.4.1 已有基础

城市是现代经济和社会活动的重要载体，也是能源消费和大气污染物及碳排放的主要单元。我国城市尺度协同减排已经具有了以下几方面基础：

● 管理制度基础

“大气十条”发布之初，国务院与地方政府签订目标责任书，开展实施情况年度考核；各省（区、市）结合实际制定“大气十条”实施方案，将目标任务层层分解落实至城市，再到区县。有关部门分工负责、密切配合、统一行动，出台了“大气十条”实施必备的20余项配套政策，包括超低排放电价等价格补贴政策，提高排污费征收标准、征收VOCs排污费等税费政策，成品油升级、强化煤炭质量管理等能源政策。蓝天保卫战三年行动计划开始实施后，各地进行了污染防治攻坚战决策部署并出台了相关方案和考核办法。对没有完成任务的地区必将进行问责，包括公开约谈、区域限批等措施。

碳减排方面，中国《“十三五”控制温室气体排放方案》明确指出鼓励“中国达峰城市联盟”城市和其他具备条件的城市加大减排力度，完善政策措施，力争提前完成碳达峰目标。

● 数据基础

目前，中国一些科研机构已经在部分试点城市完成了或正在进行以单个或若干工程项目、企业或者城市为对象的研究，积累了针对中国城市特点的研究成果。

空气质量方面，在各类科研项目支持下，我国研究人员在区域大气污染物排放清单领域已经开展了大量的工作，构建了既符合中国国情又与国际接轨的区

域大气污染源排放清单共性技术体系，将排放系数的本土化率由 20% 提高到 70% 以上，发展了多层嵌套高分辨率区域排放清单编制技术和方法学。城市大气污染物排放清单的编制首先在 2+26 区域开展，目前正在逐步推广到更多城市。经济发达地区的部分城市基于自身空气质量管理的需求，已经初步建立了相对完整的大气污染物排放清单，少数城市还实现了清单的动态更新。

碳减排方面，发改委推动了城市尺度温室气体的排放清单编制工作。近年来已有研究尝试基于污染源普查、环境统计等数据库中的点源信息建立了覆盖全国城市的碳排放清单。2013 年以来我国碳排放交易权在深圳、北京、上海、重庆等城市开展试点，为中国统一碳交易市场启动提供了宝贵经验。截至 2017 年年底，我国已确定了 29 个省区 81 个城市进行低碳试点，随着低碳试点城市工作逐渐深入，北京、深圳、武汉等城市提出了碳达峰目标。

● 方法基础

方法学方面，科研团队发布了一系列指南和手册，例如《城市大气污染物排放清单编制技术手册》、《城市达峰指导手册》等。一些科研团队开发的模型和平台已经较为成熟，通过网络共享，为相关研究和管理工作提供了宝贵的数据资料。空气污染物方面，清华大学建立了包括 10 种污染物、700 多种排放源的中国多尺度大气污染物排放清单（MEIC）。碳排放方面，中国碳排放数据库（CEAD）包括了能源清单、碳排放清单、工业过程碳排放清单、排放因子及投入产出表等数据库，中国高分辨率排放数据库（CHRED）包

括了点排放源，网格化排放数据（空间分辨率分别为 1 km 和 10 km）和补充的社会经济数据。这些模型、数据库和平台可对中国在城市尺度上的协同减排和可持续发展提供支持。

1.4.2 存在不足

城市大气污染物排放清单基于点源信息建立，分辨率较高，但总体而言多集中在重点区域和重点行业层面。传统的碳排放清单建立多依托能源平衡表开展，除了少数大型城市外许多城市缺少能源平衡信息，因而城市碳排放往往只能通过社会经济参数从省级数据降尺度估算，引入了很大的不确定性。城市尺度温室气体和大气污染物排放清单在源分类、活动水平获取方法等方面不统一，两者缺乏可比性，尚难以支撑城市尺度协同减排分析研究。全国城市尺度协同减排路径的方法学和实证研究仍然很少。

1.5 城市尺度协同减排路径方法指南

现阶段开发城市层级如何同时规划空气质量达标和温室气体减排的方法学，对于指导和帮助城市下一阶段的协同效益工作具有重要意义。在 CAA 的支持下清华大学编制了这一指南。本指南给出了城市尺度统一的排放清单编制方法，综合考虑城市经济结构、资源禀赋和主要污染源对中国地级及以上城市进行归类，再根据不同类别城市的减排难度和潜力提出城市从规划层面实现协同治理和效益的相应措施，可指导不同类型的城市从规划层面实现协调效益。

城市尺度统一排放清单编制方法

建立统一的城市尺度温室气体和大气污染物排放清单是探索城市协同减排路径的基础。以往城市尺度温室气体和大气污染物排放清单编制工作分开进行，存在数据核算边界不同、口径不一、部门分类不同等问题，不利于识别重点减排领域以及计算协同减排潜力。因此，编制城市尺度温室气体和大气污染物排放清单时应当基于统一的源分类体系与源排放表征技术方法。

本指南中介绍的城市尺度温室气体和大气污染物排放清单涵盖了城市管辖的地理范围内的所有排放源，包含 SO_2 、 NO_x 、VOC、CO、 NH_3 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、BC、OC 等气态和颗粒态污染物，以及最重要的温室气体 CO_2 。为使得核算边界一致，只考虑城市边界内一次能源消费和工业过程产生的排放，不考虑二次能源如电力、热力消耗以及产品上游产生的排放。大气污染物排放量采用下式计算：

$$E_i = \sum_j \sum_k \sum_m \sum_n A_{i,j,k} X_{i,j,k,m} \text{EF}_{\text{RAW},i,j,k,m} C_{i,j,k,m,n} (1 - \eta_n)$$

其中， i 代表城市； j 代表排放部门 / 行业； k 代表燃料 / 产品； m 代表燃烧 / 工艺技术； n 代表末端控制技术； A 代表活动水平，如燃料消耗量或产品产量； X 代表某项燃烧 / 工艺活动水平占总活动水平比例； EF_{RAW} 代表未经末端控制技术处理的排放系数； C 代表某项末端控制技术渗透率； η 代表某项末端控制技术对污染物的去除效率。

二氧化碳排放量的计算公式较为类似，但由于碳

捕集技术等末端控制措施还未普及，一般可不考虑，采用下式计算：

$$E_i = \sum_j \sum_k \sum_m \sum_n A_{i,j,k} X_{i,j,k,m} \text{EF}_{i,j,k,m}$$

参数意义同上。

从以上计算公式可以看出，建立城市尺度温室气体和大气污染物排放清单首先应当明确城市排放源的构成，然后通过调查收集活动水平、排放系数、技术分布和末端控制等相关数据信息，最终计算得到排放量。以下进行具体介绍。

2.1 统一的源分类体系

准确识别排放源是清单编制的首要环节，也是确定排放量计算方法、收集活动水平和排放系数的根本依据。本指南中的源分类参照《城市大气污染物排放清单编制技术手册》，将我国人为大气污染源分为化石燃料固定燃烧源、工艺过程源、移动源、溶剂使用源、农业源、扬尘源、生物质燃烧源、储存运输、废弃物处理源和其它排放源十大类。编制城市大气污染物和温室气体排放清单应首先针对清单编制区域内排放源进行摸底调查，根据当地行业和燃料 / 产品特点在源分类分级体系中选取合适的第一、二级排放源类型，确定活动水平数据调查和收集对象。在数据调查和收集阶段应当涵盖排放源第三、四级分类涉及的所有燃

烧/工艺技术和污染物末端控制技术，在数据整理过程中根据当地排放源特点确定源清单覆盖的第三、四级分类。根据本地排放源体系和数据调查情况，基于第一级排放源分类确定合适的清单编制方法和流程，根据第二到四级排放源分类确定计算参数获取途径和来源。

针对污染物产生机理和排放特征的差异，按照部门/行业、燃料/产品、燃烧/工艺技术以及末端控制技术可将每类排放源分为四级，自第一级至第四级逐级建立完整的排放源分类分级体系。第三级排放源重点识别排放量大、受燃烧/工艺技术影响显著的重点排放源。对于排放量受燃烧/工艺技术影响不大的燃料和产品，第三级层面不再细分，在第二级下直接建立第四级分类。

以固定燃烧源为例，四级结构示意图如图7所示，其中第四级为除尘技术。

针对火电、钢铁、水泥、玻璃等高耗能、高污染的重点工业行业，可基于设备和工序建立排放表征模型。对于其它工业行业，针对化石燃料固定燃烧源、

工艺过程源和溶剂使用源排放特征差异，分别建立基于设备和技术的排放表征方法。图8以水泥行业为例展示了本研究建立的基于产品-生产工艺-控制技术的动态排放表征模型。我国现有的水泥生产工艺技术包含立窑、回转窑、新型干法窑，不同的生产工艺体现了不同的排放水平，水泥行业主要产生的污染物为颗粒物和氮氧化物，因此污染物控制技术包含除尘措施和脱硝措施两类，除尘措施包含旋风除尘、湿法除尘、静电除尘及布袋除尘等，脱硝措施包含低氮燃烧器、SNCR及SCR等，不同的控制技术反映了不同的去除效率。

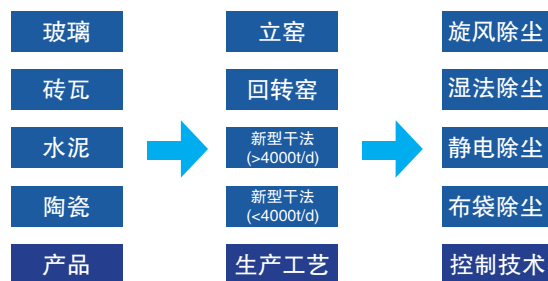


图8 动态排放表征模型（以水泥行业为例）

2.2 清单编制方法和数据获取规范

确定城市本地排放源构成后即可开始收集活动水平、排放系数、技术分布和末端控制等相关数据信息。收集活动水平数据时，针对第四级排放源逐一制订活动水平调查方案，建立活动水平调查清单，确定调查流程，明确数据获取途径。数据调查收集过程可与现有数据统计体系结合，从环境统计、污染源普查和排污申报等数据库中获取相关信息。活动水平调查时尽可能收集与基准年份对应的数据。基准年份数据缺失的，可采用相邻年份数据，并根据社会经济发展状况进行调整。如果城市有完整的能源平衡表和工业产品产量则应作为对应年份城市排放源活动水平的总约束，对于存在差异的排放源应分析核对并进行适当调整。

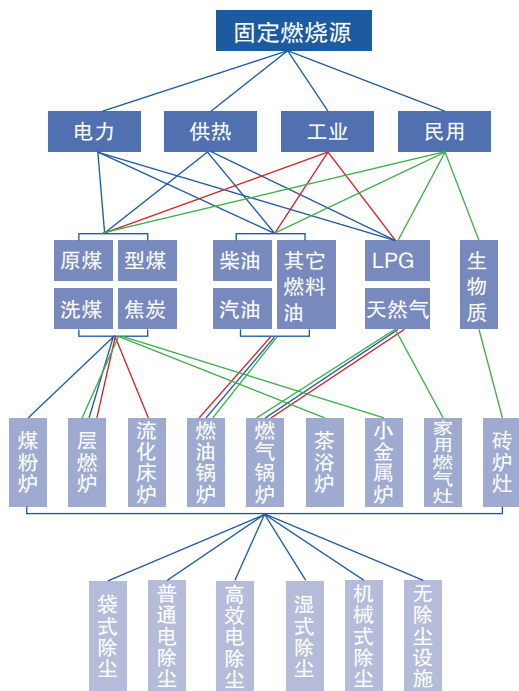


图7 固定燃烧源四级结构示意图

污染物的排放系数获取方法一般包括实测法、物料衡算法和文献调研法。应优先采用实测法，如条件不允许可选用物料衡算法和文献调研法，各城市可根据自身实际工作基础选用合适的排放系数获取方法。实测法是指对污染源开展测试，获取实际工况条件下的排放系数，有条件的城市可针对当地重点排放源开展实际测试，国控重点源可根据在线监测浓度计算排放系数。物料衡算法是指通过对输入和输出物质详细分析确定产生系数，再结合污染控制设备或措施的去除效率获取排放系数，大型和中型燃煤设备的二氧化硫和颗粒物排放系数可采取物料衡算法估算。文献调研法是指通过从科技文献、排放系数数据库等资料中收集整理相近燃料/产品、工艺技术、污染控制技术的排放测试结果，获取对应排放系数的方法。

CO₂ 的排放系数获取主要来自研究测试、企业生产检测以及国际或国家推荐数据。一般可采用国家推荐数据（如《中国温室气体清单研究》、《2005 年中国温室气体清单研究》、《省级温室气体编制指南》、《中国城市温室气体清单编制指南》等），如果城市的生产工艺、生产技术水平或者燃料类别和国家平均水平显著不同，则应自行开展排放系数研究，根据实测的燃料含碳量、低位发热值和氧化率计算排放系数。

2.3 重点部门编制方法介绍

2.3.1 火电部门

火电行业主要生产和排污设备为火力发电机组，污染物产生自化石燃料在发电机组内的燃烧过程。按照前文介绍的源分类方法，火电行业第一级源为化石燃料固定燃烧源，第二级源按发电和供热燃料分为电力生产和工业/民用热力生产和供应，第三级源为煤炭、石油、天然气等化石燃料，第四级源为煤粉炉、流化床炉、自动炉排层燃炉、燃油锅炉、燃气锅炉等各种发电设备。由第一至第四级排放源建立完整火电

行业排放源，分别计算发电和供热排放，排放计算方法如下：

$$E=A \times EF \times (1-\eta)$$

其中，A 为逐个排污设备燃料消耗量；EF 为污染物产生系数； η 为污染控制措施对污染物的去除效率，除非是安装了 CCS 的火电厂，否则对于 CO₂ 该参数一般取 0。

电力部门以机组为单位获取活动水平数据，应获取的活动水平还需包括机组容量、发电机组运行时间、脱硫设施运行时间和在线监测浓度数据。燃煤硫分和灰分以分批次入炉煤质数据为准，通过加权方法计算平均硫分灰分。对于热电联产企业，应按照电厂生产报表数据分别获取其用于发电和供热的燃料消耗量，用于计算电力和供热部分排放。活动水平数据调查收集应与环境数据统计体系结合，从总量核查、环境统计和污染源普查等数据库获取有关信息，并开展实地调查补充。机组装机容量、投产时间、燃料消耗量、硫分、灰分、锅炉类型、燃烧方式、脱硫脱硝设施类型及综合去除效率等可直接从总量核查数据获取；排污设备生产运行时间、除尘设施类型等可从污染源普查数据和环境统计数据获取。在此基础上，电力、热力生产和供应部门应补充开展实地调查完善活动水平数据，重点获取污染控制措施运行时间、在线监测浓度数据、企业生产报表和分批次煤质数据等。

排放系数优先采用实测法获取，也可收集污染源在线监测数据（燃料组分、烟气中污染物浓度和氧含量等）计算排放系数。难以开展排放源实测和收集监测数据的地区，可通过物料衡算法和检索排放系数数据库获取第四级源排放系数。

电力部门综合脱硫（硝）效率可根据脱硫（硝）设施投运率与脱硫（硝）效率相乘获得。其中，脱硫（硝）设施投运率为脱硫（硝）设施运行时间占发电机组运行时间比例，脱硫（硝）效率可查询排放清单技术手册附录提供的排放系数数据库。对于其它污染物产生系数及污染控制设施去除效率，可通过排放源所属第

四级排放源分类查询排放清单技术手册附录提供的排放系数数据库获取相应数据。

2.3.2 工业部门

工业部门排放涉及化石燃料固定燃烧源、工艺过程源、溶剂使用源等多个源。此处主要介绍化石燃料固定燃烧源和工艺过程源。

1. 化石燃料固定燃烧源：采矿业和制造业

对于第四级排放源，排放量由下式计算：

$$E=A \times EF \times (1-\eta)$$

其中，A 为第四级排放源燃料消耗量，对于点源为排污设备活动水平，对于面源为清单中最小行政区单元活动水平；EF 为污染物或 CO₂ 产生系数； η 为污染控制设施对污染物的去除效率，对 CO₂ 该参数一般取 0。

活动水平数据调查范围包括采矿业和制造业所属各类行业，按照点源和面源分别处理。每小时 35 蒸吨及以上工业锅炉应按照点源处理，每小时 10 蒸吨及以下工业锅炉按照面源处理，介于 10 蒸吨和 35 蒸吨的工业锅炉可根据当地实际情况酌情按照点源或面源计算。

点源应逐个排污设施调查收集活动水平信息。需获取的数据包括排污设施经纬度、燃料类型、锅炉类型、燃料消耗量、污染控制设施类型、生产负荷时间变化曲线等，对于燃煤锅炉需获取燃煤灰分和硫分。根据每个排污设施的燃料类型、锅炉类型和污染控制设施类型确定所属第四级源分类。对于安装了烟气排放连续监测系统的排污设施，还需获取每个烟道监测断面的污染物小时平均排放浓度、小时平均烟气排放量和总生产小时数。

面源应按照清单最小行政区单元收集活动水平信息。首先获取第二级排放源活动水平，包括行政区名称、区划代码和分行业燃料消耗量等。通过实地调研、类比调查等途径获取第三、四级排放源技术分布比例，计算得到第四级排放源活动水平。

活动水平数据调查收集应与环境数据统计体系结

合，从环境统计和污染源普查等数据库获取相关企业信息，并开展实地调查完善和补充。点源活动水平中燃料消耗量、硫分、灰分、锅炉类型、燃烧方式和除尘设施类型等可直接从污染源普查数据获取，对于排污设备经纬度和其它污染物控制设施信息根据调查补充。面源活动水平中各县分行业燃料消耗量、各类锅炉和除尘设施比例可从污染源普查数据库统计获取。对于面源，应在清单编制区域内有针对性开展中小锅炉活动水平数据调查，补充环境统计数据缺失和遗漏。

排放系数优先使用实测法获取，也可收集污染源在线监测数据（燃料组分、烟气中污染物浓度和氧含量等）计算排放系数。难以开展排放源实测和收集监测数据的地区，可通过物料衡算法和检索排放系数数据库获取第四级源排放系数。

2. 工艺过程源：以水泥行业为例

此处以水泥行业进行举例。水泥行业第四级排放源污染物排放量由下式计算：

$$E=A \times EF \times (1-\eta)$$

其中，A 为第四级排放源活动水平，如熟料产量或水泥产量。对于点源，A 为逐条生产线活动水平；对于面源，A 为清单中最小行政区单元活动水平。EF 为各污染物和 CO₂ 的产生系数，此处的碳排放是指水泥生产中由于原料高温分解等过程产生的 CO₂，不包括已经在燃料固定燃烧源中计算的碳排放。 η 为污染控制技术对各污染物的去除效率，对 CO₂ 该参数一般取 0。

水泥行业活动水平数据调查范围应包括清单编制区域内从事水泥熟料和/或水泥生产的全部工业企业，对排放源按照点源处理。

应逐个排污设施调查收集活动水平信息，需获取数据包括：排污设施经纬度、生产设施类型、生产规模、熟料产量、水泥产量、各排放节点的污染控制措施、污染物去除效率、生产负荷时间变化曲线等。根据每个排污设施工艺类型和污染控制设施类型确定所属第四级源分类。对于安装了烟气排放连续监测系统的排

污设施，还需获取每个烟道监测断面的污染物小时平均排放浓度、小时平均烟气排放量和总生产小时数。

活动水平数据调查收集应与总量核查核算体系全口径水泥企业信息对接，同时结合污染源普查和环境统计等数据库相关信息，开展实地调查完善和补充。点源活动水平中，水泥熟料生产设施类型、生产规模、产品产量、脱硝设施类型和脱硝效率等可直接从总量核查核算数据获取；水泥粉磨的生产规模、产品产量可同时结合总量核查、污染源普查以及环境统计综合对接获取；水泥企业的部分除尘设施类型可从污染源普查数据库获取；对于排污设备经纬度和其它不能直接获取的信息应开展调查补充。

尽可能收集与清单目标年份对应的活动水平数据。目标年份数据缺失的，采用相邻年份数据并根据社会经济发展状况适当调整。

污染物产生系数优先采用实测法获取，也可收集污染源在线监测数据（燃料组分、烟气中污染物浓度和氧含量等）计算排放系数。难以开展排放源实测和收集监测数据的地区，可通过物料衡算法和检索排放系数数据库获取第四级源排放系数。 CO_2 产生系数可直接从国家或省级温室气体清单编制指南中获取，有条件也可以进行实测。

2.3.3 交通部门

此处的交通部门主要指移动源下的道路移动源。

道路移动源按照面源处理，基于第四级排放源计算排放量，公式如下：

$$E = P \times EF \times VKT$$

其中， P 为机动车保有量； EF 为基于行驶里程排放系数； VKT 为年均行驶里程。

道路移动源需获取的活动水平数据包括各类机动车车型、所属地、保有量、注册年代以及排放控制水平等。机动车分车型保有量和注册年代数据可从交管部门获取，不同排放控制阶段车辆数据可从环保部门机动车环保检测管理系统数据库获取。不具备车辆环

保检测数据时，可参考当地机动车排放标准实施进度，根据车辆登记注册年代判定排放控制阶段。根据机动车燃料、车型及排放控制水平可确定道路移动源所属第四级排放源分类。年均行驶里程应通过实际调查获取。基于当地机动车年检数据，分车型统计累积行驶里程和车辆使用年限，计算年均行驶里程。不具备该数据时，可通过随机抽样走访大型停车场，实际调查分车型年均行驶里程数据；未开展实地调查的地区可查询使用排放清单技术手册附录提供的全国平均数据。

机动车尾气排放系数由基准排放系数结合实际情况修正获得，计算公式如下：

$$EF = BEF \times \phi \times \gamma \times \lambda \times \theta$$

其中， BEF 为基准排放系数； ϕ 为环境修正因子； γ 为平均速度修正因子； λ 为劣化修正因子； θ 为车辆其它使用条件（如负载系数、油品质量等）修正因子。

基准排放系数指在平均行驶工况、油品质量和环境条件下的车辆排放水平。各车型基准排放系数对应的条件为典型城市工况（30 km/h）；2014年全国平均劣化状况；温度15℃、相对湿度50%、低海拔；汽油无乙醇掺混且含硫量50 ppm、柴油含硫量350 ppm；柴油车载重系数50%。排放清单技术手册附录提供了道路移动源各车型基准排放系数。

环境修正因子指为反映环境因素（温度、湿度、海拔）对车辆排放状况影响引入的修正系数，由温度修正因子、湿度修正因子和海拔修正因子计算得到。计算公式如下：

$$\phi = \phi_{\text{Temp}} \times \phi_{\text{RH}} \times \phi_{\text{Height}}$$

式中， ϕ_{Temp} 为温度修正因子； ϕ_{RH} 为湿度修正因子； ϕ_{Height} 为海拔修正因子。本手册附录F提供了温度、湿度和海拔修正因子，可根据当地实际条件选用。排放水平受环境因素影响不大的车型和污染物未列出，环境修正因子取1。

平均速度修正因子指为反映行驶速度对车辆排放状况影响引入的修正系数。本手册附录F分<20、20–

30、30-40、40-80 和 >80 km/h 四个速度区间提供了平均速度修正因子，应根据本地实际道路工况选用。

劣化修正因子指为反映随行驶里程增加车辆排放状况劣化、排放系数升高而引入的修正系数。排放清单技术手册附录提供了以 2014 年为基准，2015 至 2018 年各车型劣化修正因子，2014 年前各车型劣化修正因子取 1。清单编制时应基于目标年份选用。

其它使用条件修正因子指为反映油品含硫量、乙醇掺混度和柴油车载重对车辆排放状况影响而引入的修正系数。可根据当地实际情况通过查询排放清单技术手册附录 F 确定。

为得到各项修正因子，需获取的数据包括城市温度、湿度、海拔、道路平均车速、油品含硫量、乙醇掺混度和柴油车载重系数。温度、湿度和海拔数据可查询当地环境统计年鉴获取；道路平均车速可通过交管部门获取；油品质量数据可调研油品销售主管部门获取；柴油车载重数据可调研道路收费站获取。

清单编制过程应根据实际情况查询排放清单技术手册附录表格计算各项修正因子。如实际情况与表中参数不符，可按线性插值确定相应条件修正因子。

2.3.4 民用部门

对于民用源第四级排放源，排放量由下式计算：

$$E=A \times EF \times (1-\eta)$$

其中，A 为第四级排放源燃料消耗量；EF 为污染物产生系数； η 为污染控制设施对污染物的去除效率。

民用源一般按面源处理，应调查收集排放清单中最小行政区单元活动水平，从当地能源统计获取民用部门分能源品种能源消费量。当地不具备该数据时，可通过全市能源消费总量扣除电力、工业能源消费量获取，或采用上一级行政区民用源活动水平数据基于人口密度等参数权重分配到清单编制行政区单元。获

取的数据一般为第二级排放源活动水平，通过实地抽样调研、类比调查等途径获得第三、四级排放源技术比例，如分散供暖锅炉、民用炉灶比例等，进而确定第四级排放源活动水平。

民用源活动水平获取应统计调研和实地调查并重。在宏观统计数据约束下，通过实地调研补充缺失的活动水平数据。民用承压锅炉信息可从当地质监部门获取，常压锅炉数据需在分散供暖区域开展实地调研获得。民用源活动水平调查应重点关注民用散煤，在统计部门、发改委、农业部门等调研获取相应燃料使用量；针对统计基础薄弱的农村地区，应适当开展实地调查。

民用锅炉排放系数参考采矿业和制造业等工业锅炉排放系数处理方式获取。工作基础较好的城市应对当地典型民用燃料和炉灶类型开展实际排放系数测试；未开展实测的城市可选取排放清单技术手册附录提供的排放系数数据。城市应根据活动水平数据调查情况，选用适合本地排放源分类分级体系的排放系数。

2.4 本指南中使用的全国工业点源数据库与城市排放清单

清华大学融合了环境统计数据、原环境保护部统计年鉴等多个数据库建立了 2016 年全国火电和工业点源信息数据库，并在已有的全国碳排放计算工作 (Zheng et al., 2018) 的基础上基于前文介绍的统一源分类体系建立了 2016 年中国城市气体污染物和二氧化碳排放清单。该工业点源数据库中包含了详细的工厂级信息，如电力装机容量、开业时间、燃料消耗量、燃烧技术、末端去除效率、工业产值等。后文中的城市分类、排放特征分析和减排路径探究都基于 2016 年工业点源数据库和城市排放清单展开。

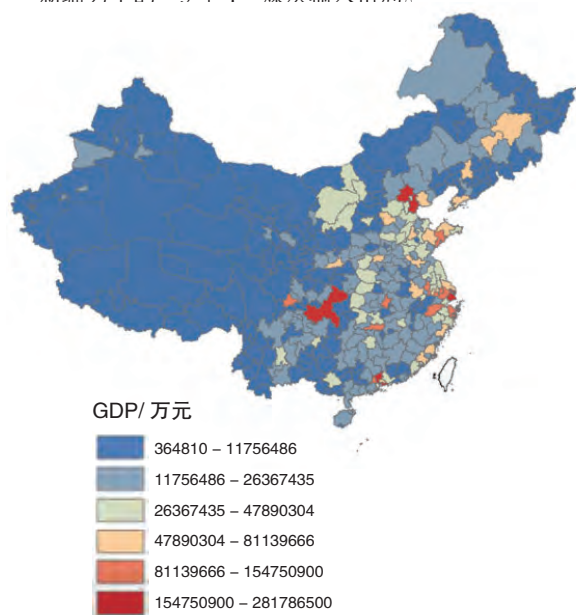
基于产业特征的城市分类系统

受资源禀赋、产业基础、区位特征等多方面因素的影响，我国城市处于不同发展阶段，产业结构和排放特征有较大差异。

从经济水平来看，北京、上海、深圳、广州、重庆等城市经济较为发达，它们多为东部沿海城市或省会城市；而中西部地区的经济发展水平较低，2016 年一些城市的人均 GDP 仅有几千美元的水平（图 9）。从产业结构来看，东部发达地区城市和一些省会城市已进入后工业化阶段，低排放、高附加值的高新技术产业及第三产业成为增长主体，例如北京市的第三产业占比在 2016 年已经高达 80%；中西部地区还有许多资源型、工业型城市，能源强度相对较高。还有一些城市和地区自然条件恶劣，或处于开发保护区，这些地区的城镇化率往往较低、经济水平也较为落后，显示出前工业化的特征。

城市能源结构与当地的资源禀赋、支柱产业以及经济发展水平都有关系，不同城市之间的差异十分显著。处于东部沿海发达地区、进入后工业化阶段的城市使用的能源相对更为清洁，使用的电力多来自于天然气、核电等清洁能源。例如，北京市 2016 年煤炭消费仅占能源消费总量的 9.8%，油品、天然气消费和净调入电力分别占 32.9%，31.7% 和 23.2%。深圳市 2015 年煤炭消耗占比仅为 6.4%，并计划到 2020 年降至 4.6%；核电和风电等清洁能源供电量占全市用电量的比例为

90.5%。处于煤炭资源地区、以能源工业和重工业为支柱产业的城市或是周边其他类型的城市，由于煤炭可得性高、具有价格优势，能源结构往往以煤炭为主。例如，唐山市是国内焦煤和钢铁的重要产地，2016 年能源消费中煤炭占比超过 60%。重庆市的一次能源资源主要是煤炭、天然气和水电，2016 年能源结构中煤炭占比高达 54%。在去产能导致煤源缺乏的背景下，重庆市将构建近期以陕西、贵州、甘肃为主，远期以新疆为主的“3 + 1”煤炭输入格局。



数据来源：中国城市统计年鉴

图 9 2016 年全国地级以上城市地区生产总值

图 10 展示了 2016 年全国城市排放总量和排放强度（单位 GDP 排放的二氧化碳或大气污染物）情况。城市间的排放强度差距可跨越两个以上的数量级。碳排放和污染物排放具有一定的协同性。深圳市是沿海发达城市的典型，具有全国最低的碳排放强度（0.24 吨 / 万元）， NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 排放强度也处于全国最低的五位。深圳市制造业和能源生产部门占比很低，而第三产业占比接近 60%。北京市、上海市等经济发展水平较高的服务业型城市的排放总量分居全国第 3 位和第 9 位，但碳排放强度仅分别为 0.44 吨 / 万元和 0.62 吨 / 万元，污染物排放强度也较低。以能源生产或重工业为支柱产业、经济水平相对较低的城市的排放强度则相对较高，例如嘉峪关（17.6 吨 / 万元）、和田地区（12.7 吨 / 万元）、喀什地区（11.2 吨 / 万元）和鹤岗（6.3 吨 / 万元），同时它们的污染物排放也往往较高，和田地区和喀什地区的 SO_2 及 $\text{PM}_{2.5}$ 排放强度都居于全国前五位。

综上所述，不同城市的产业、能源结构和排放特征差异明显，未来的发展战略和减排路径也将显著不同。为此，本研究根据城市产业结构和经济发展水平建立了城市分类系统，识别城市支柱产业，为减排路径提供初步的指导；具体的减排方案则需要进一步结合城市自身定位和发展需求确定。

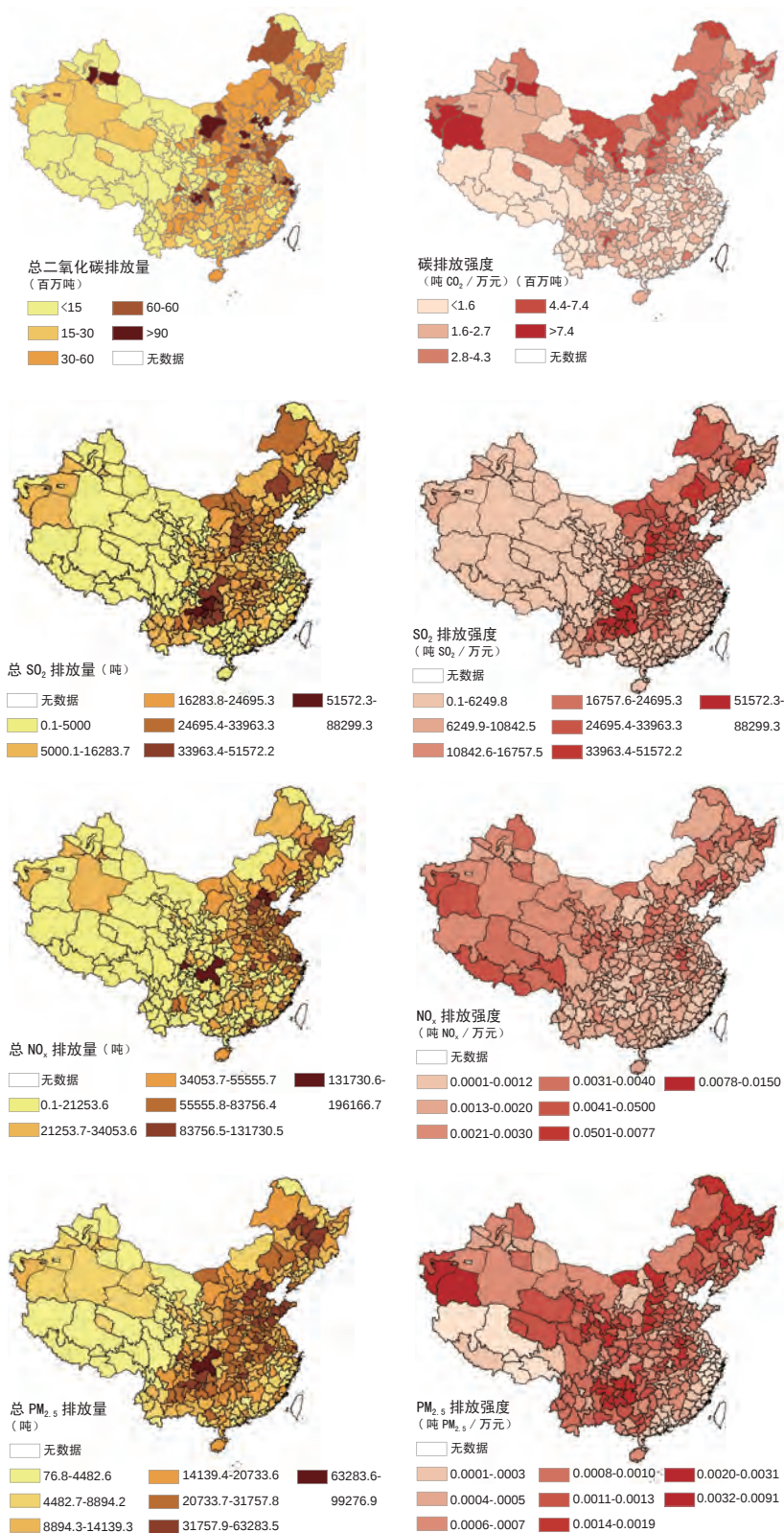


图 10 2016 年全国地级以上城市二氧化碳和主要污染物排放量和排放强度

3.1 城市支柱产业识别与分类

本指南基于城市应用聚类分析法，把城市分为高新技术型、轻工业型、重工业型、能源生产型、服务业型、农业型和前工业化型。

聚类分析被广泛应用于经济和其他交叉领域学科，可以在分类时综合考虑多个因素。本研究基于从中国城市统计年鉴中获取的产业结构和经济数据以及2016年清华大学建立的工业点源数据库（见2.4节）中工业产值的数据，参考Shan等人的方法（Shan et al., 2018），使用K-means聚类方法进行城市支柱产业识别和类型划分。首先，参考塞尔奎因和钱纳里对于城市工业阶段的划分标准，将第一产业占比>20%的城市划分为农业型城市。人均GDP小于782美元（1982年价格，折合2016年人民币约20864元）的城市属于初级产品生产阶段，被划分到前工业化型。此外，城镇化率很低的西藏地区，以及丽江、黄山等工业化程度低，以旅游业为最重要的支柱产业的城市也被划分到这一类地区。

对于除以上两类以外的城市进入工业化阶段的城市，按照国民经济行业分类将工业部门聚合为四大类：能源生产工业、重工业、轻工业和高新技术工业，

分类目录见附表。前文建立的数据库中包括了各城市工业行业分类和各企业工业产值的信息，因此可计算出四类工业的工业总产值以及其占各城市工业总产值的比值。进一步进行排名和归一化后，最终可得到每个城市每一类工业占比在全国的百分位。本研究使用SPSS软件对前述步骤获得的各城市不同工业类占比百分位进行K-means聚类，将进入工业化阶段的城市分成了4个类别：

高新技术型，轻工业型，重工业型和能源生产型。然后，结合各城市地区生产总值、人均生产总值以及三大产业结构进一步进行区分和调整，将高新技术型城市中服务业占比超过全国平均水平一个标准差的城市划分为“服务型城市”；将高新技术型城市中人均生产总值未达到工业化高级阶段标准（2016年人民币约41692元）的城市根据工业产值占比调整至轻工业型或重工业型城市。

完成以上分类步骤后，本研究根据粮食产量、城镇化率等其他信息对少数处于分类边界上的城市分类做了调整。最终，全国337个地级以上城市（2019年行政区划）被划分为高新技术型（33个），轻工业型（70个），重工业型（83个）、能源生产型（52个）、服务业型（22个）、农业型（53个）和前工业化型（24个）。

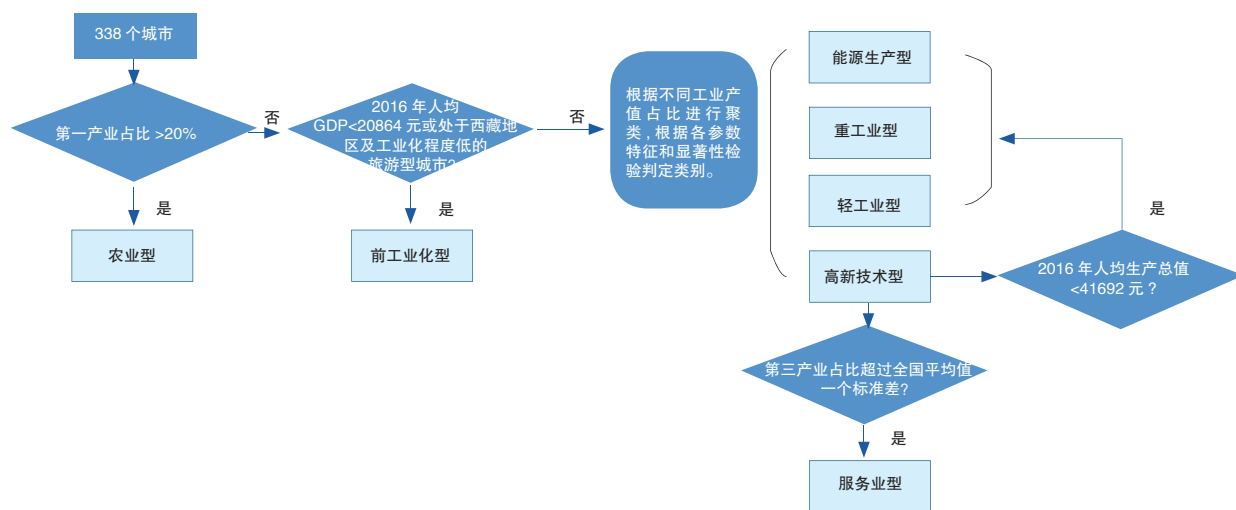


图 11 城市分类技术路线图

3.2 城市特征分析

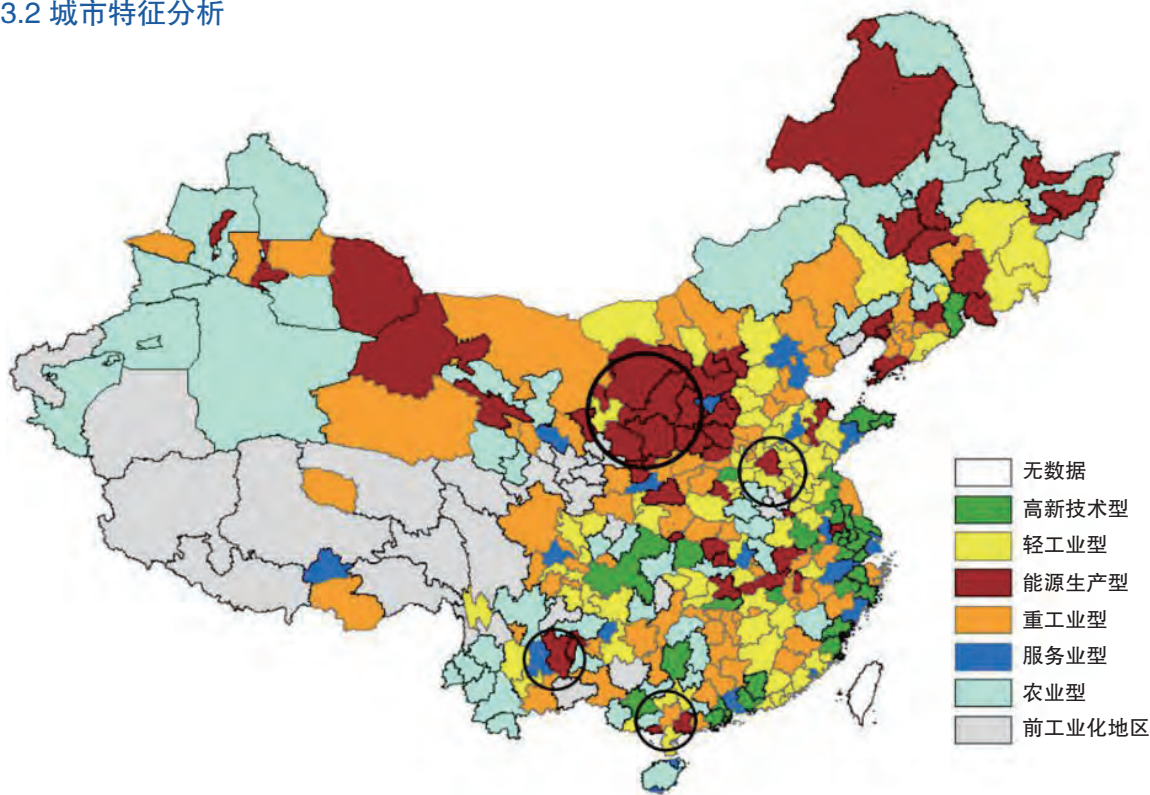


图 12 不同类型城市空间分布情况

图 12 展示了不同类型城市的空间分布情况。各类型城市之间存在依存关系，能源生产型城市群往往为周边较为发达的高新技术和服务业型城市群提供能源支持。图中黑色圈标识出了山西-内蒙古煤炭基地、淮南-淮北煤炭基地、贵州煤炭基地和茂名油田，它们分别为京津冀区域、长三角区域和成渝区域和珠三角区域提供了能源输入。

从城市发展阶段来看，农业型、前工业型城市工业化水平低，能源消耗型、重工业城市、轻工业城市处于工业化阶段，高新技术型和服务型城市则已经进入了工业化高级阶段和后工业化阶段。随着城市的发展，经济水平逐渐提高，第一产业占比逐渐下降，第二产业占比先升高后下降，第三产业占比逐渐上升。图 13 展示了不同类型工业产值占比、经济参数和排放强度的平均值与标准偏差，图 14 为双尾 t 检验的结果

热力图，用于确定各类型城市每个指标平均值之间是否存在显著性差异，颜色越深则差异越显著。这两张图较为直观地验证了不同类型城市的支柱产业，例如，能源生产型城市的能源生产工业产值占比显著高于其他类型城市。处于较高发展水平的服务业型、高新技术型和轻工业型城市的单位生产总值碳排放显著低于其他类型城市，其中服务型城市的碳排放强度最低。从经济水平和产业结构来看，服务业型城市人均 GDP 水平最高，第三产业占比平均值达到 60% 左右，显著高于其他类型城市。农业型城市和前工业型城市是经济发展水平和工业化程度最低的两类城市。农业型城市第一产业的占比显著高于其他城市，其中包括黑龙江、河南以及一些重要的粮食产地。前工业型城市受到资源禀赋等因素的限制，第一、第二产业占比相对较低，依靠旅游业等第三产业来获得经济收入。

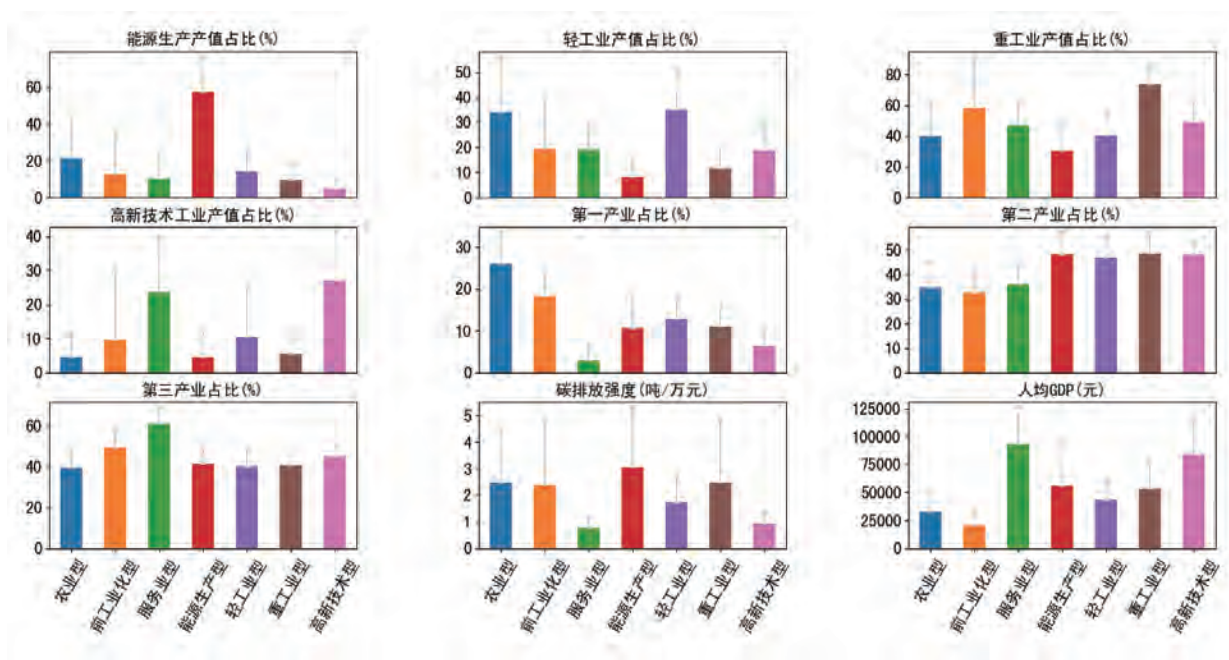


图 13 七种类型城市不同类型工业产值占比、经济参数和排放强度的平均值与标准偏差

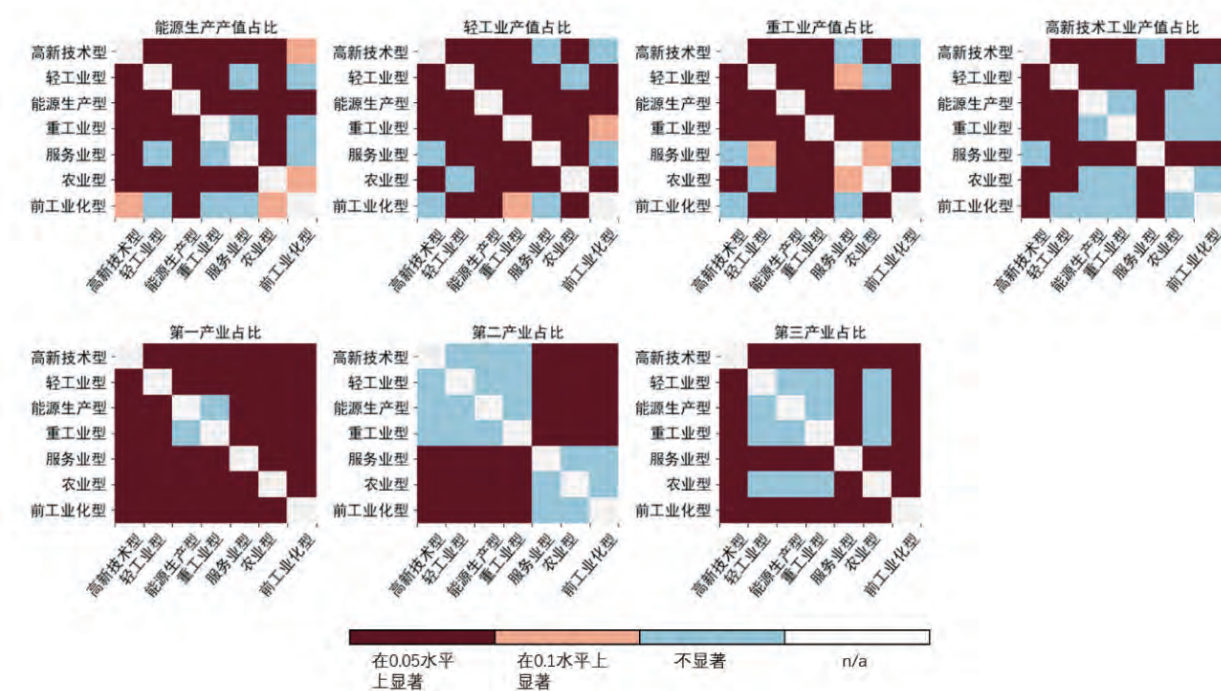


图 14 七种城市平均值显著性检验（双尾 t 检验）结果

从工业能源结构来看，服务业型、高新技术型城市的工业用能中电力和天然气的比例更高。重工业型城市由于涉及钢铁的生产消耗更多的焦炭。2016 年电

力和供热部门消耗了城市总煤炭消耗量的 60–70% 左右。未来应当提高工业部门，尤其是电力和供热部门的非化石燃料比例。

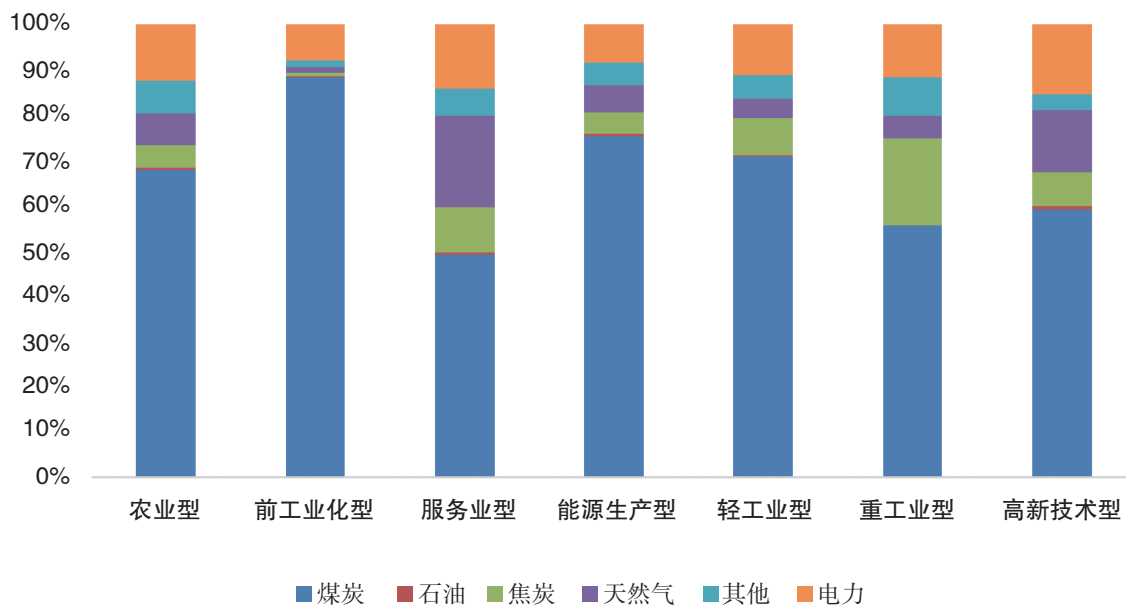


图 15 七种类型城市工业不同类型能源消耗占比情况

值得注意的是，以上分类体系的界限并不是绝对的，一个城市可能处于不同发展阶段的过渡期，从而具有几种类别的特征。例如，南阳市是河南省重要的产粮城市，2016 年第一产业产值绝对值居全国前十位，总 GDP 排名较高，人均 GDP 排名则比较靠后，第二

产业增加值比重达到 43.8%，同时具有农业城市和轻工业城市的特征。双鸭山市第一产业占比超过 30%，但同时城市煤炭储量位居黑龙江省第一位，同时具有能源城市和农业城市的特征。对于这些城市应当综合考虑所涉及类型城市的减排路径。

各部门重点协同减排政策

现阶段我国城市协同减排主要由空气质量目标驱动。其中，涉及减少化石燃料尤其是煤炭燃烧量的相关政策，如控制煤炭总量、大部分工业末端控制措施、工业错峰生产以及用地结构调整仅具有空气质量效益，其他政策则具有协同减排效益。以下进行分部门讨论。

4.1 工业部门协同减排政策

工业部门是我国能源消耗最多的部门，也是城市排放的主要来源。工业部门的协同减排政策主要包括需求控制、提高能效、产业结构调整和能源结构调整四个方面。

1. 需求控制。可通过设置城市煤炭总量控制目标、

禁止新建项目配套建设自备燃煤电站等措施进行。例如，大气十条政策实施期间，北京、天津、上海等城市都提出了煤炭总量控制目标。

2. 提高能效。主要通过推进工业清洁生产和技术升级实现，采用先进技术减少产品综合能耗是协同治理的重点，我国在这方面仍有较大的进步空间（表3）。以几个重点行业为例，推广超超临界燃煤机组、循环硫化床燃煤发电、整体煤气化联合循环（IGCC）等高效燃煤发电技术可提高能源加工转换效率；水泥行业采用新型干法水泥每生产1吨水泥燃料燃烧产生的CO₂比立窑少排放约12%，水泥生产余热可用于发电，利用工业废渣、低热值燃料以及可燃废弃物作为混合材代替熟料也能够降低能耗；钢铁行业提高废钢使用率、增加电炉钢比例可使能耗进一步降低。

表3 2016年主要高耗能产品单位能耗中外比较

项目	单位	中国	其他国家 / 国际先进水平
火电厂供电煤耗	gce/kWh	312	298（日本），274（意大利）
钢可比能耗	kgce/t	640	576（德国），615（日本）
水泥综合能耗	kgce/t	135	97（德国），111（日本）
乙烯综合能耗	kgce/t	842	629
合成氨综合能耗	kgce/t	1486	990
纸和纸板综合能耗	kgce/t	1027	506

来源：中国能源统计年鉴（2017）

3. 能源结构调整。旨在降低工业部门煤炭使用比例。主要使用生物质燃料、天然气、电力、热力等对燃煤锅炉进行清洁能源替代。

4. 产业结构调整。包括加快淘汰火电、钢铁、水泥、化工、石化、有色金属冶炼等重点行业的落后产能和整治散乱污小企业。例如，我国钢铁产量最为集中的重工业城市唐山市从2013年起开始逐步淘汰1000立方米以下的高炉和60吨以下的转炉，目前计划到2020年淘汰100吨以下（不包括100吨）转炉，同时将钢铁企业整合到30家以内，推进企业兼并重组和产能置换。京津冀周边地区要求淘汰日产2000吨以下的水泥熟料生产线以及年产100万吨以下的水泥粉磨站。最终，小企业会被技术水平较为先进的大企业所取代，排放水平会大幅下降。从整体工业产业结构来看，应当从源头开始控制对高耗能高排放产业的新

建投资，结合城市的经济水平和资源条件，推动高新技术工业的发展，如信息技术、高端装备制造、新能源、新材料等。

通过分析各类型城市不同工业能源消耗占工业总能源消耗的比例可识别出需要重点控制的行业。如图16所示，能源生产型、轻工业型、重工业型、高新技术型和服务业型的支柱产业在总工业能耗中的占比平均值相对其他类型城市更高。服务业型城市和高新技术型城市的高新技术工业能耗占比平均值虽然相对其他类型城市较高，但绝对值并不大，这是由于高新技术工业具有低能耗、高附加值的特征。能源生产行业和重工业在所有类型城市中都是主要的工业能源消耗贡献者。因此对于各类型的城市，工业部门应当通过淘汰落后产能、锅炉节能改造等方式，重点削减相应的支柱产业、能源生产业以及重工业的能源强度。

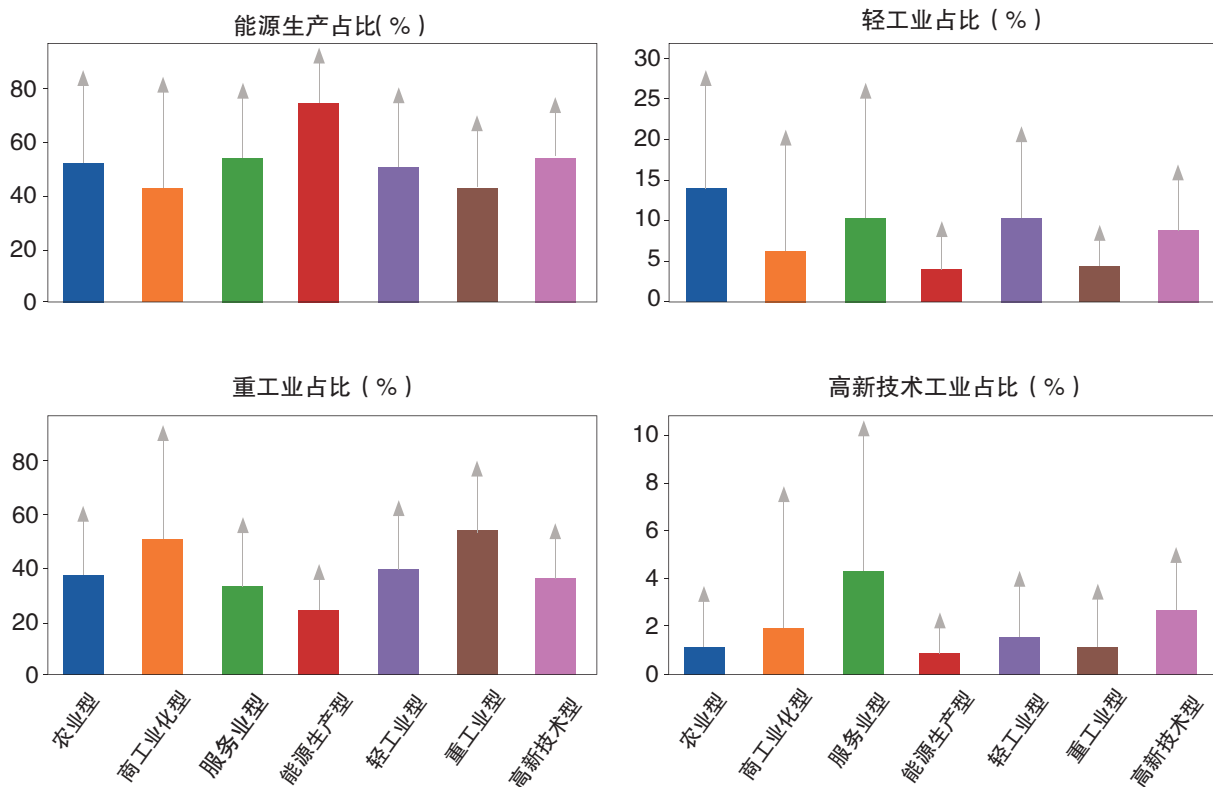


图 16 七种类型城市不同类型工业能源消耗占比平均值和标准差

各类型城市中都存在碳排放强度较高（也就意味着能源强度较高）的火电机组、工业锅炉和窑炉。基于 2.4 节中调查建立的工业点源数据库，可以依据基础设施的燃料类型、生产规模和技术计算出每一类基础设施的单位产品碳排放强度，如单位发电量排放的二氧化碳，或是生产单位热量排放的二氧化碳，识别出城市中的高能耗强度基础设施。

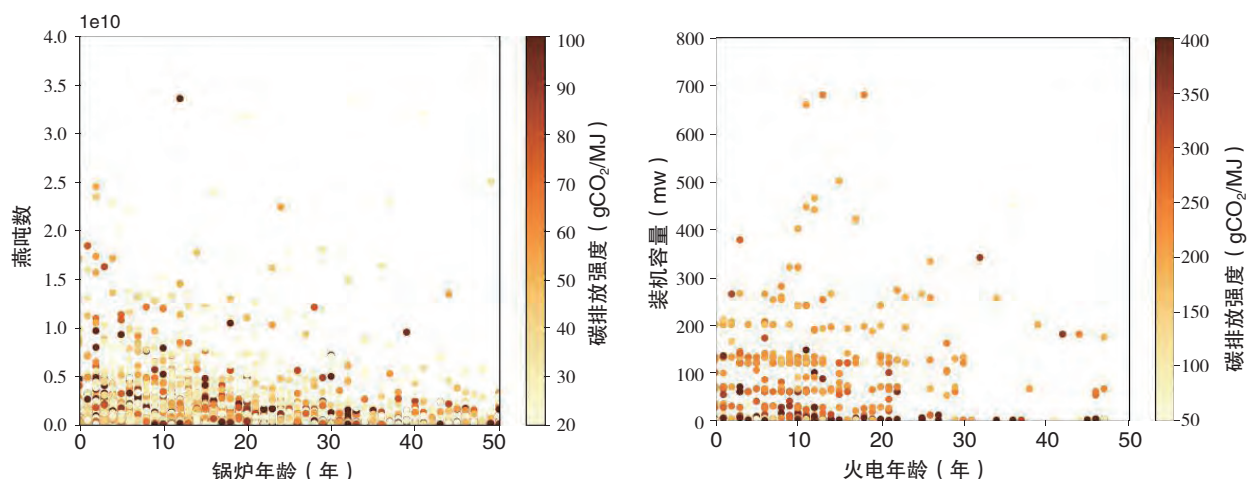


图 17 2016 年工业基础设施生产单位产品碳排放强度

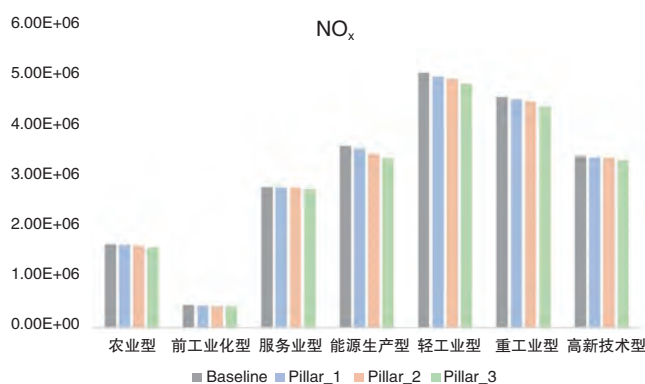
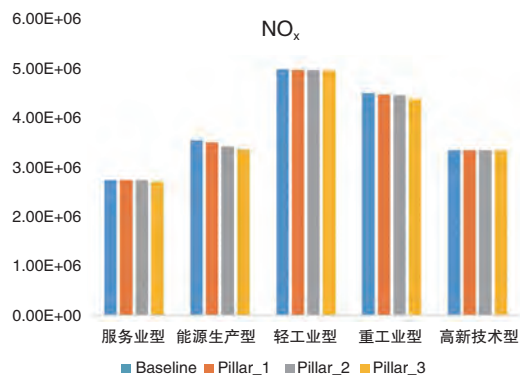
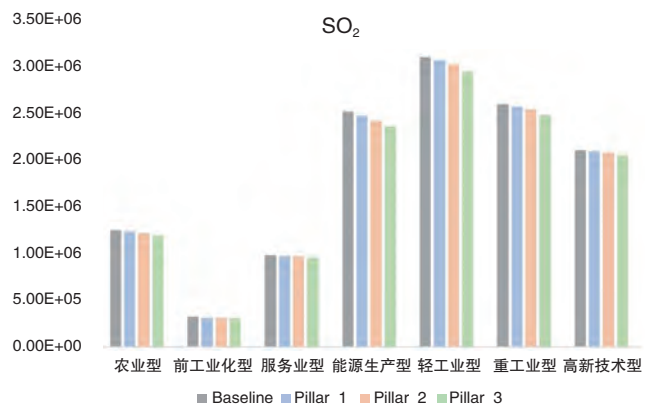
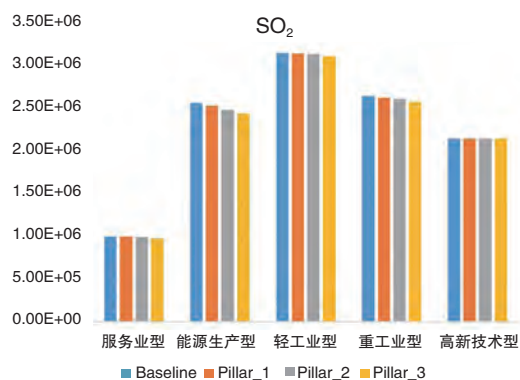
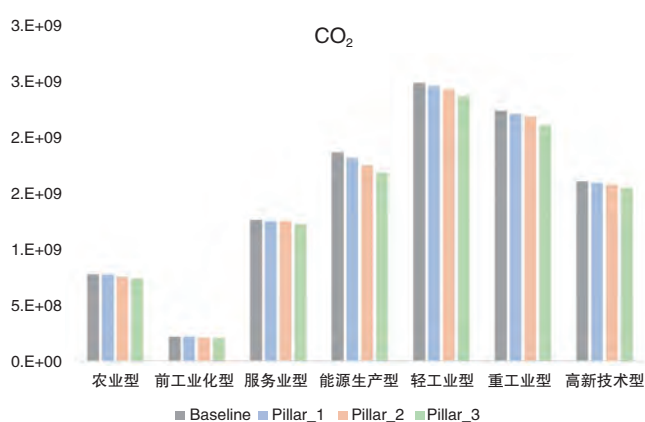
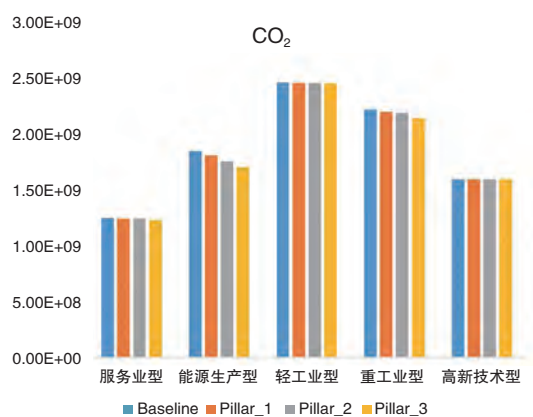
注：右图展示的是非热电联产的煤电机组。

为探究工业基础设施能效提升带来的协同减排效益，本研究设置了两个情景，情景一成为削减支柱产业情景（Pillar），即削减进入工业化的各类型城市（能源生产型、轻工业型、重工业型、高新技术型和服务业型）支柱产业对应基础设施的碳排放强度；情景二为共同削减情景（Both），削减所有城市支柱产业、能源生产工业和重工业的碳排放强度。每个情景对应三种削减方式：1. 将高于对应类别基础设施平均碳排放强度水平两个标准差的基础设施碳排放强度削减到平均值；2. 将高于对应类别基础设施平均碳排放强度水平一个标准差的基础设施碳排放强度削减到平均值；3. 将高于对应类别基础设施平均碳排放强度水平的基础设施碳排放强度削减到平均值。

在最强的削减支柱产业情景下（Pillar_3），工业部门的 CO_2 排放量、 SO_2 排放量、 NO_x 排放量和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量分别下降了 2.9%，2.56% 和 1.86%。能源生产型城市仅削减支柱产业基础设施的碳排放强度就有较为显著的减排效益，仅削减两个标准差以上的“超强排放强度基础设施”的碳排放强度（Pillar_1）就能使得 CO_2 排放量、 SO_2 排放量、 NO_x 排放量和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量分别下降 2.38%，1.78%，1.87% 和 1.33%，如果削减所有平均值以上的基础设施碳排放强度（Pillar_3）则可分别下降 9.0%，6.67%，7.85% 和 6.67%。重工业城市和服务业城市此情景下也产生了一定的协同减排效益，而轻工业和高新技术产业型城市对提高支柱产业的基础设施能源效率并不敏

感。在同时削减支柱产业、能源产业和重工业基础设施碳排放强度的情景下，所有类型城市都具有较明显的协同效益，除高新技术型和服务型城市外的其他类型城市的碳减排比例都超过了 5%。最强的共同削减情景（Both_3）下全国工业部门的 CO₂ 减排量达到 6 亿吨左右，CO₂ 排放量、SO₂ 排放量、NO_x 排放量和 PM_{2.5} 排放量分别下降了 6.76%，6.14%，

6.91% 和 4.83%。此情景下协同效益最强的仍然是能源生产型城市，工业部门 CO₂ 排放量、SO₂ 排放量、NO_x 排放量和 PM_{2.5} 排放量分别下降了 11.2%，8.7%，10.2% 和 6.24%。前工业化型和农业型城市的减排效益也较为显著，减排比例仅次于能源生产型城市，这可能是由于这两类城市经济发展水平和技术水平有限，落后基础设施数量较多。



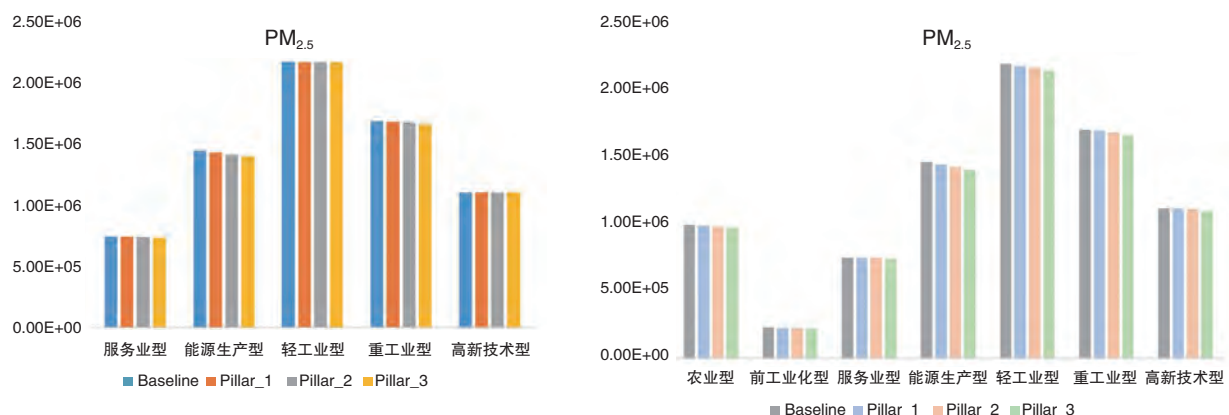


图 18 不同情景下工业部门二氧化碳和主要污染物的排放量

如果在上述能效提升情景下进一步考虑技术升级和淘汰落后产能，协同减排效益将会更为显著。以水泥熟料生产为例，大型生产线均采用新型干法，综合能耗显著低于立窑和其他旋窑，且安装了更为完善的末端控制措施。假设将 2016 年全国所有非新型干法或日产量 2000 吨以下的水泥熟料生产线淘汰，兼

并重组为大型新型干法生产线，对应末端措施达到和目前大型生产线的平均水平，则全国水泥行业 CO₂ 的排放将减少 2000 万吨、SO₂、NO_x 和 PM_{2.5}、35149 吨、214590 吨和 181637 吨，分别下降 2.0%、7.6%、20.7% 和 20.2%。图 19 展示了不同类型城市在能效升级和淘汰落后产能下的减排潜力。火电在工业煤炭消

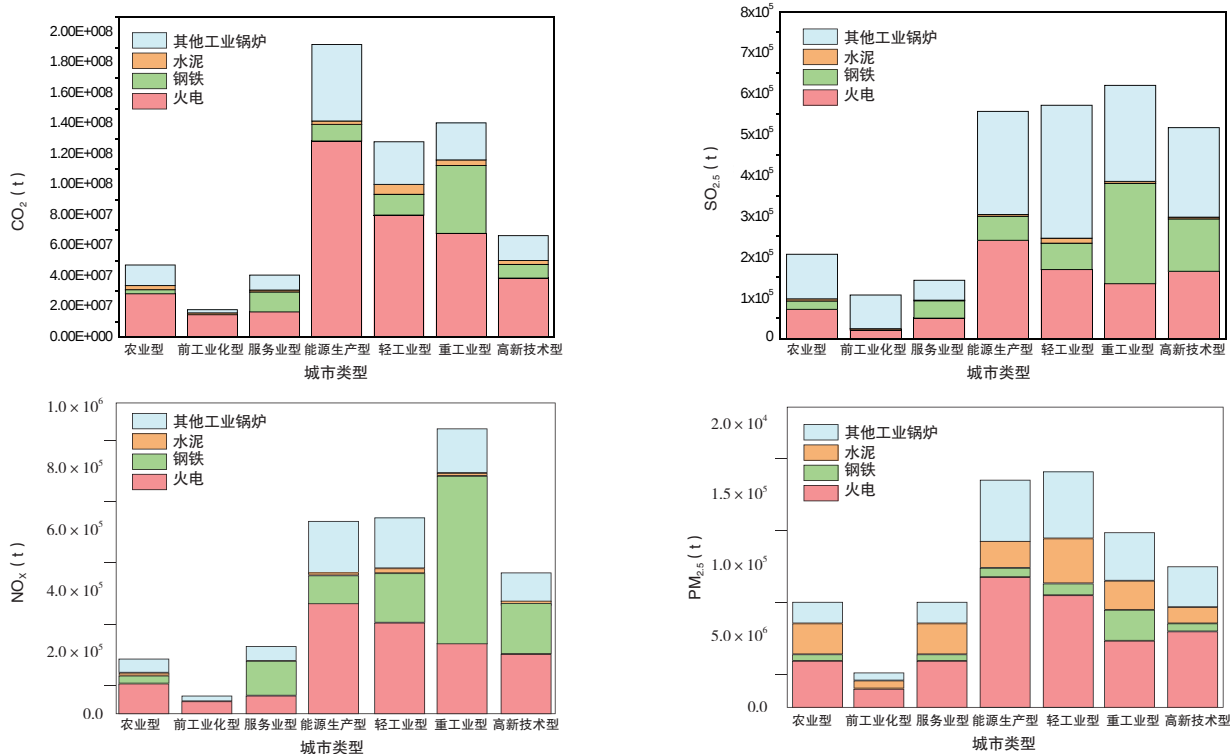


图 19 不同类型城市在能效升级和淘汰落后产能下的减排潜力

耗中的占比达到 50% 以上，因此火电部门是碳减排潜力最大的部门。分城市类型来看，能源生产型城市碳减排潜力最大，而重工业城市的 NO_x 减排潜力最大。对于服务业型城市、前工业化城市来说，工业部门协同减排中最重要的是火电部门。其他类型城市需要关注各自的重点工业，例如重工业城市需要重点关注钢铁行业。

综上所述，对于工业部门协同减排，能源型城市和重工业型城市应当重点针对支柱行业开展工业节能改造和技术升级；轻工业型、高新技术型和服务业型城市主要关注能源产业和重工业的能耗强度削减，淘汰高污染低能效的小火电和燃煤小锅炉。前工业化型、农业型城市在经济发展、推进工业化进程的同时，需要尽量提高基础设施的能源效率。

4.2 民用部门协同减排政策

民用部门燃料燃烧具有低空排放、燃烧效率低、无控制技术等特点，一次 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放因子可达燃煤电厂的 100 倍，对人类健康有显著的负面影响。我国北方地区传统采暖方式是燃烧散煤，民用部门燃煤在采暖季对中国北方 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的平均贡献可达 45%，重污染期间贡献可达 57%（Liu et al., 2016; Wang et al., 2012; Zhang et al., 2017）。

民用部门的协同减排策略包括能效提升、能源结构调整和需求控制三个方面：

1. 能源结构调整和能效提升。在以 2+26 城市为代表的北方城市已经开展了大量的工作。能源结构调整主要涉及“煤改电”、“煤改气”，政府对采暖装置及电价提供补贴，使用电力和天然气取代散煤。处于燃煤过渡区，或是无法使用天然气等清洁能源替代燃煤的地区，则主要通过控制民用散煤质量、提高民用炉具燃烧技术来提高能效和同时降低污染物的排放。此外，执行绿色建筑标准、实施住宅节能改造可提高房屋保温性能，也可认为是对热量利用效率的提

升。政府应当鼓励使用低灰、低硫的民用洁净煤和型煤替代传统使用的高挥发分的低变质烟煤，寻找优质洁净煤源，加快构建洁净型煤生产仓储供应配送体系。推广新型清洁高效燃煤炉具，分期分批更换传统炉灶，提升热效率。

2. 能源结构调整。未来在城市民用部门散煤清洁化替代的过程中，应当从城市的实际情况出发选择采取多样化清洁取暖方式，即，宜电则电、宜气则气、宜煤则煤、宜热则热。

3. 需求控制方面。应当推广节能生活方式，这对于经济发展水平较高、人口稠密的大城市尤为重要。《中国建筑节能年度发展报告》中指出，近年来随着生活水平的提升，一些居民的生活模式出现了奢侈化趋势，如大量使用烘干机等电器、采用独栋居住模式等，如此发展将会使得住宅部门能耗迅速上升。因此，未来应当鼓励居民维持目前的绿色生活模式，充分利用自然通风、坚持“部分时间、部分空间”的使用模式，限制民用部门能源需求随着生活水平提高无限地增加。

图 20 展示了全国城市民用部门二氧化碳和主要污染物排放情况，可以看到民用部门碳排放和污染物排放的高值区集中在我国东北地区，京津冀及其周边地区，以及贵州、湖南、湖北的一些区域，这与当地冬季气温以及是否处于煤炭生产区及周边区域有密切的联系。从排放绝对量来看，服务型城市一般是人口稠密、较为发达的大型城市，如北京、上海等，民用部门能源总消耗量大，因此平均排放量最高；前工业化城市人口较少、经济水平相对落后，对民用能源需求也相对较低，平均排放量最低。人均污染物 / 二氧化碳排放量则呈现出不同的特征，分析人均 GDP 和人均排放强度可以发现，人均 GDP 高于 75000 元的城市的排放强度普遍较低，说明富裕城市民用部门使用能源相对更清洁。从城市类型来看，能源生产型和农业型城市的人均排放量最高，高新技术型和服务业型城市的人均排放量最低（图 21）。

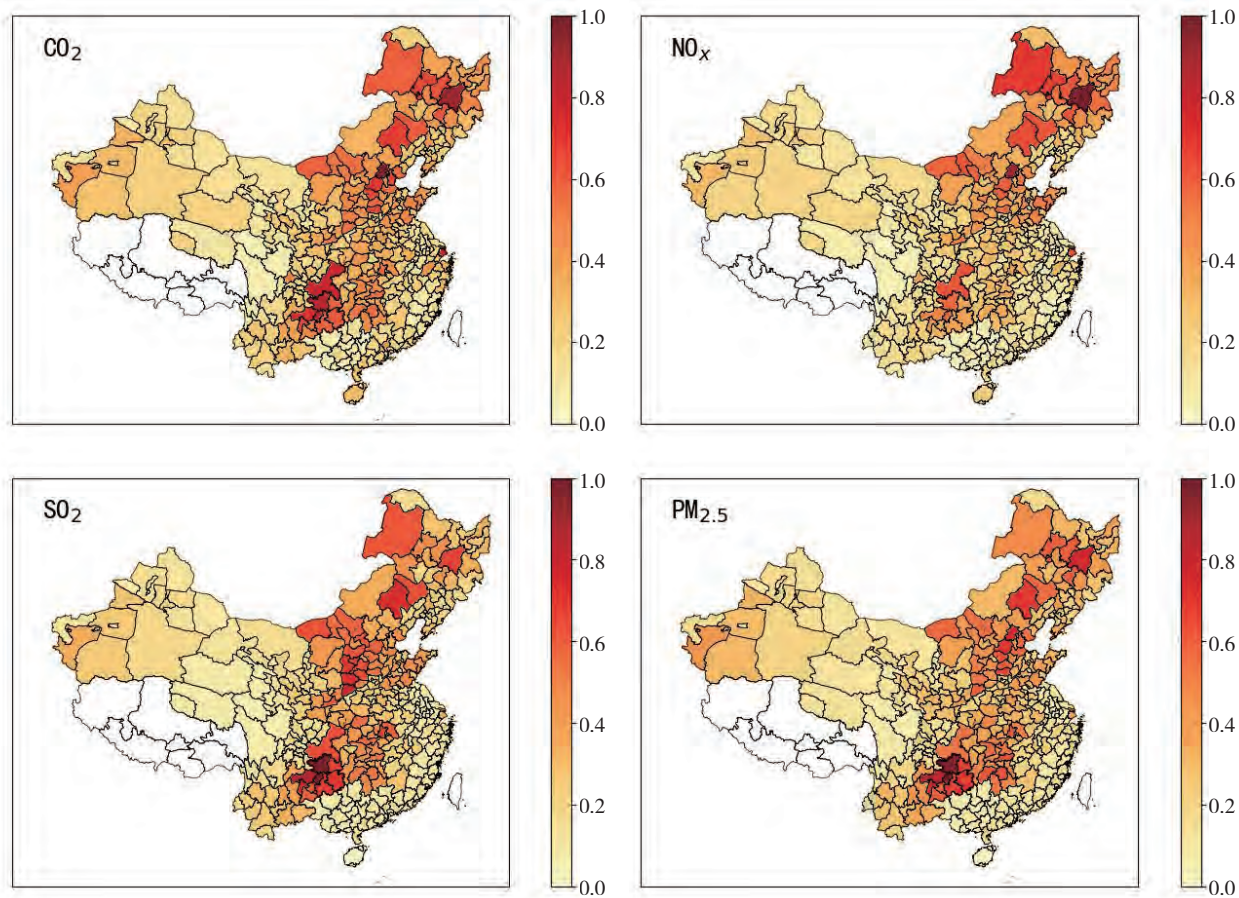


图 20 全国城市民用部门二氧化碳和主要污染物排放情况

注：使用归一化展示。

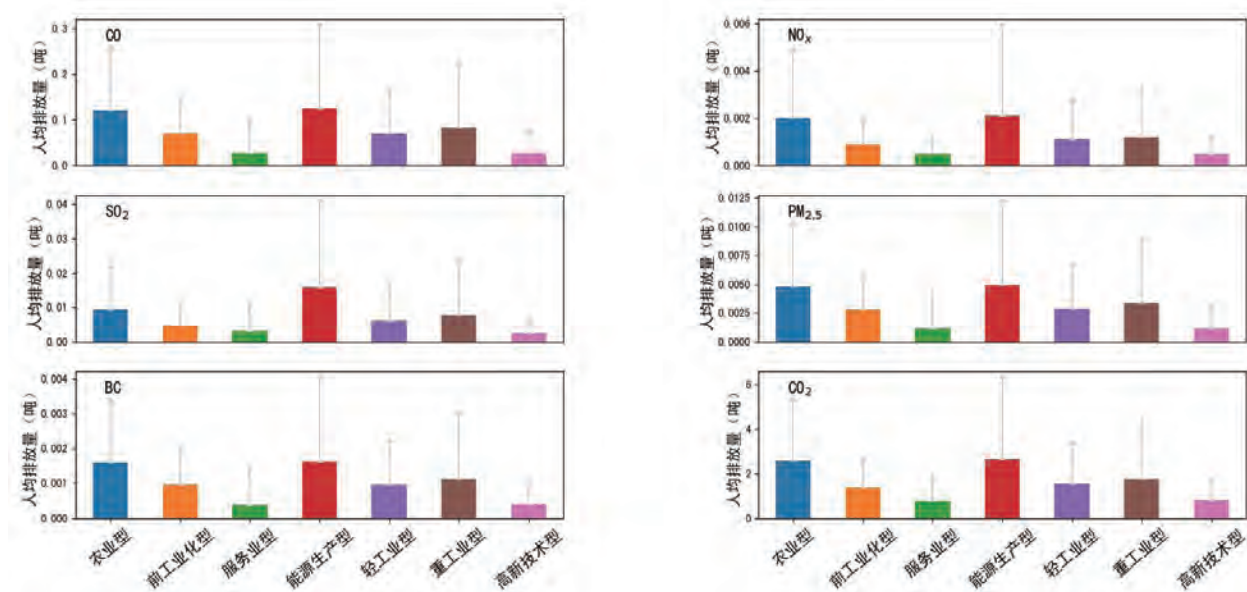


图 21 2016 年中国不同类型城市民用部门人均污染物 / 二氧化碳排放量

由于采暖季的气象条件较为不利，容易发生重污染过程，应当特别注重北方地区采暖季民用部门的清洁能源替代。一些城市的农村地区以往使用的劣质散煤热值低、燃烧效率低，含硫量和挥发分则相对较高，燃烧生产大量污染物。使用型煤、天然气、热力或电力对散煤进行替代都能提升燃烧效率，产生协同减排效益，但

在考虑何种清洁能源替代时应当充分考虑是否具有充足的电/气资源，是否具备将其输送到分散用户的条件，以及经济成本（刘新华等，2019）。对于人均排放量水平较低、经济较为发达的高新技术型和服务型城市，在可负担的情况下可使用电力、天然气等进行燃煤替代，同时提出总量管控目标，普及节能生活方式。

表 4 不同燃料使用成本

燃料	单价	热值	热效率	单位热值价格	单位热值价格（以型煤为基准）
型煤	800 元 / 吨	5500 千卡 / 千克	75%	0.0194 分 / 千卡	1.00
天然气	3 元 / 立方米	8000 千卡 / 千克	85%	0.0441 分 / 千卡	2.27
电力（空气源热泵）	0.5 元 / 度	860 千卡 / 度	200%	0.0291 分 / 千卡	1.50
直热或蓄热	0.5 元 / 度	860 千卡 / 度	100%	0.0581 分 / 千卡	3.00

来源：刘新华等，中国分散式民用供热技术现状分析，2019

4.3 交通部门协同减排政策

空气质量目标下，我国机动车排放标准不断加严、油品不断升级。目前全国机动车已全面执行第五阶段排放标准，北京等人口稠密且处于大气污染防治区域的重点城市已开始推行实施国六排放限值。尽管这主要是末端治理措施，但在实行标准的过程中淘汰高污染、高能耗的老旧车能带来污染物和二氧化碳协同减排效益。

未来随着人口和经济水平的增长，交通需求将会持续长，协同减排需要进一步减少交通部门的化石燃料消费总量，具体政策包括限制交通活动水平、降低单位里程能耗、促进新能源车辆和清洁车辆的应用以及调整交通运输结构。

1. 限制交通活动水平。包括限制机动车保有量以及减少机动车行驶里程数。机动车保有量随人均生产总值增加依次经历缓慢增长—快速增长—趋向饱和的 S 形曲线增长模式。一般认为我国千人机动车保有量

饱和值在 400–600 辆左右。图 22 展示了各类型代表性城市的民用汽车拥有量变化。大型服务型城市（如北京）具有较强的控制机动车保有量的意愿，在严格的限购政策下民用汽车拥有量已经进入后期平缓增长阶段。其他类型的城市目前已经进入机动车快速增长阶段，必要时可对机动车总量控制提出要求。

2. 降低单位里程能耗即提高燃油经济性。燃料消耗量的降低将带来显著的协同效益。2014 年，《乘用车燃料消耗量评价方法及指标》发布，提出 2016 年至 2020 年，轻型客车平均油耗需达到的目标分别是百公里 6.7L、6.4L、6L、5.5L 和 5L。最终，我国乘用车新车平均燃料消耗量水平将在 2025 年下降至 4L/100km，对应二氧化碳排放约为 95g/km 的国家总体节能目标。

3. 促进新能源车辆和清洁车辆的应用。在一些城市的公交、物流配送和邮政领域已经初具规模。目前市面上推广的新能源车辆主要包括混合动力车、纯电动汽车、燃料电池车。混合动力车具有高燃料经济性、低排放的特征；电动汽车在交通部门终端实现零排放，

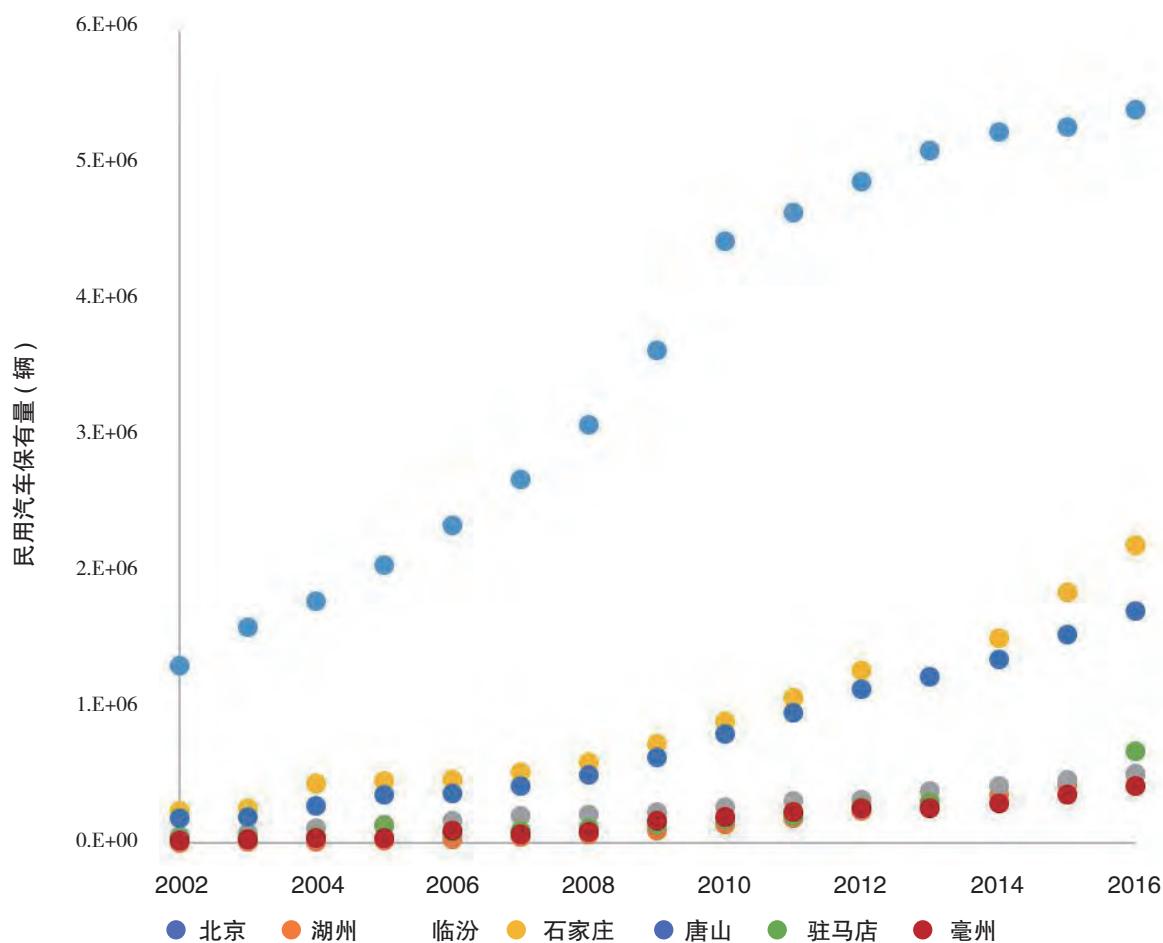


图 22 不同城市民用汽车拥有量变化

* 北京 - 服务业型，临汾 - 能源生产型，湖州 - 高新技术型，驻马店 - 农业型，亳州 - 前工业型，石家庄、唐山 - 重工业型。

而且没有排放劣化、传输过程中的油品污染等内燃机相关的问题。值得注意的是，为实现整体的协同减排，在电动化的同时也应当同步推进电力供给侧的能源清洁化。

4. 运输结构调整。能源生产型城市、重工业型城市在生产过程中涉及大宗物料运输，涉及钢铁、建材、焦化、化工、矿山等行业，包括推动大宗货物运输“公转铁”和“公转水”、建设城市绿色物流体系。未来应当加快大型工矿企业和物流园区铁路专用线建设、优化铁路运输组织模式，降低物流成本。推进公共交

通系统建设，包括公共汽车、地铁、公共自行车等，减少私人汽车和出租车的使用。

总体来说，所有类型的城市都应当加严机动车排放标准、提高燃油经济性以及在公用车辆中推广清洁能源车辆，其中服务型城市可以提前实施更严格的标准并在在小客车中推广清洁能源车辆替代和应用。能源生产型城市、重工业型城市在生产过程中涉及大宗物料运输，应当注重载货汽车的节能减排。此外，一些农业城市的农用机械排放量相对较大，未来可逐步加严农用机械的排放标准。

不同类型城市协同减排路径

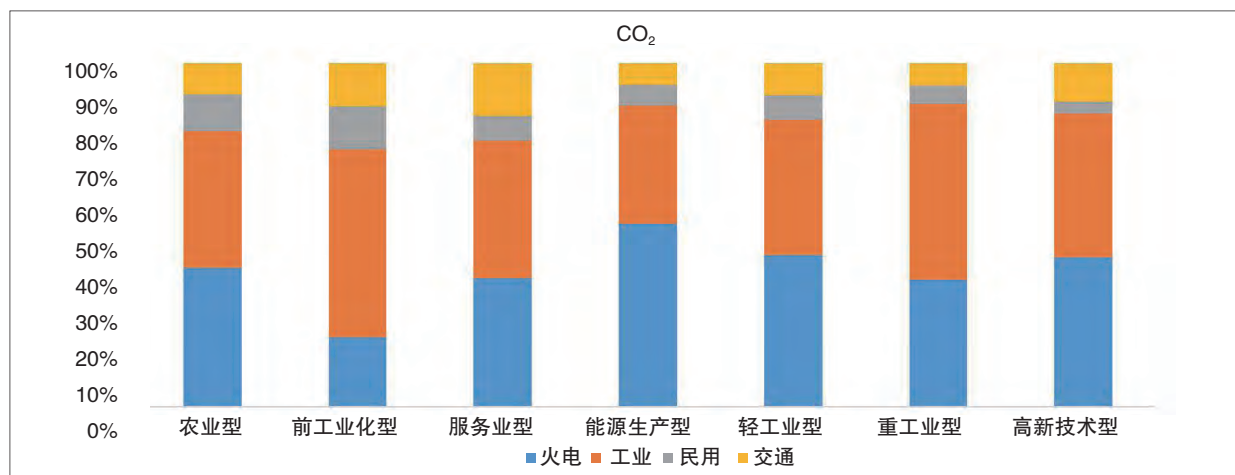
本章给出了不同类型城市在规划与产业、工业、民用以及交通方面的推荐协同减排政策。图 23 展示了 2016 年各类型城市二氧化碳和主要大气污染物的排放构成情况，可以看到不同类型城市、不同类型污染物的排放构成具有明显的差异。本章通过评星的形式呈现各部门不同政策的协同减排潜力，综合考虑了第四章的分析结果和不同类型城市的排放构成情况。此处建立了一个简单的评分体系，对于某一项政策，计算得分如下：

$$\text{总得分} = \sum_i w_i * (\text{政策评价分数}_i + \text{所属源贡献分数}_i)$$

其中， i 代表不同的物种，此处主要考虑了 CO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 和 NO_x 四个物种。代表不同物种得分的权重，权重分别取 0.5, 0.167, 0.167, 0.167。政策评价分数体现了该项政策对物种 i 减排的有效性，越有效则得分越高。所属源贡献分数体现了该政策作用的部门的排放放在物种 i 的总排放中的贡献，贡献越大则得分越

高。经过归一化处理后，总得分被对应到星级，表征减排潜力。具体的评分表及对应关系见附录。

由于减排潜力评价并未考虑到执行时间点、成本等因素，因此在具体实施政策时还应当依据城市空气质量需求和各项措施的可行性综合制定减排方案。例如，对于颗粒物浓度达标，空气质量目标向臭氧控制转变的城市，由于 NO_x 是臭氧生成的前体物，评定星级时可提高 NO_x 的权重、并将 VOCs 增加到评价体系中；由于交通部门对 NO_x 排放具有重要贡献，最后评价结果中交通部门政策的重要性可能会提升。使用其他清洁能源替代煤炭产生的协同效益较为显著，但位于煤炭产区的城市受成本等因素的限制短期可能无法将燃煤消耗转向其他更为清洁的能源，那么可以首先推行高效、洁净地使用煤炭的相关政策，而将能源结构调整作为中长期的目标。



◆ 不同类型城市协同减排路径 ◆

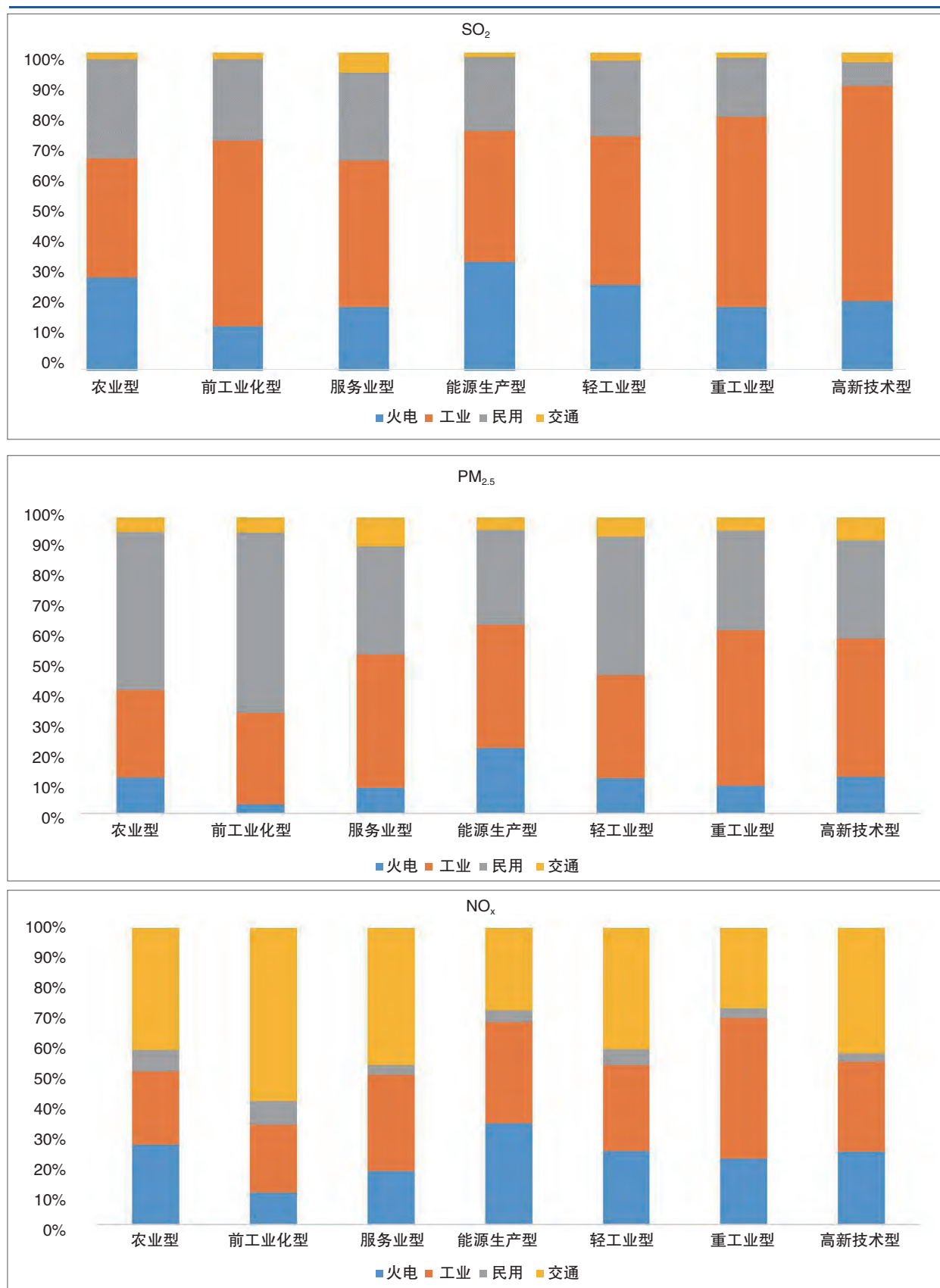


图 23 2016 年各类型城市二氧化碳和主要大气污染物的排放构成

5.1 能源生产型城市

本指南中的能源生产型城市特指生产煤炭、石油、天然气等一次能源，以及电力、热力等二次能源的资源型城市。在工业化进程中，能源生产型城市依托当地资源开发建立起庞大的工业体系，为我国建立独立完整的工业体系、促进国民经济发展作出了突出贡献。然而，这类城市的可持续发展面临着严峻挑战，资源开发与经济社会发展、生态环境保护之间不平衡、不协调的矛盾日益突出。

表5是能源生产型城市的协同减排政策表。从整体规划来看，能源生产型城市应当提高资源深加工水平，积极谋划布局战略性新兴产业，加快推进新型工业化。成熟型、衰退型和再生型能源生产型城市则应当发展支柱型接续替代产业，逐步增强可持续发展能力。

能源生产型城市存在单位产品排放水平很高的基础设施，仅依靠提高支柱行业基础设施的能效就能产生较为可观的协同减排效益，因此可优先从重点治理能源行业超大排放强度基础设施入手，重点推进支柱

产业的节能减排与技术升级。同时加大淘汰落后产能力度，逐渐改变高消耗、高排放的粗放型生产方式。此外，应当促进资源节约与综合利用，提高资源采选回收水平、强化废弃物综合利用。

我国煤炭储量丰富，许多能源生产型城市是煤炭型城市，这些城市的煤炭物流成本低、价格相对便宜，且销售渠道多、采购方便，煤炭供应相对有保障，所以人均散煤使用量更高。以山西省为例，据报道山西户均年用煤量高于京津冀同等纬度地区，为4吨至5吨。对于处于煤炭产区的能源型城市，如果改用电/气存在资源不足或成本过高的问题，可主要通过提升煤质和燃烧效率来推动协同减排，同时重点监管流通销售环节，严控劣质煤进入市场。例如，临汾市在民用散煤取代方面主要推进燃煤锅炉集中供热建设，辅助以煤改电、煤改气。集中供热的燃煤锅炉燃烧效率高且具有末端控制措施，相比劣质散烧煤仍然能产生可观的协同效益。

交通方面，应当加严机动车排放标准、提高燃油经济性以及在公用车辆中推广清洁能源车辆。能源生产型城市由于涉及大宗物料运输，因此还应当重点管控货运汽车，进一步优化大宗货物运输方式。

表5 能源生产型城市协同减排政策表

部门	推荐政策	协同减排潜力
规划和产业	1. 加大产业结构调整力度，扩大商业与服务业在经济发展中的占比和影响，构建多元化产业体系。 2. 推进产业间配套协作，实现资源的多层次转化增值，打造新产业集群。	★★★★★
工业	1. 降低能源行业基础设施能源强度，加快淘汰能源行业落后产能，提高能源加工转换效率，可优先从超高排放强度的基础设施入手。 ●淘汰燃煤小锅炉，推进工业锅炉节能改造和清洁能源替代。 ●淘汰落后小火电。	★★★★★
	2. 优化产业布局，发展循环经济，推动低碳工业园区和高新技术园区的建设。	★★★★★
	3. 促进资源节约与综合利用 ●提高资源采选回收水平。 ●强化废弃物综合利用。	★★★★☆
民用	1. 取缔劣质散煤。 ●重点监管流通销售环节，严控劣质煤进入市场。 ●推广洁净型煤、兰炭、清洁焦等燃烧效率和热值高且较为清洁的民用燃料，给予相应补贴。	★★★
	2. 进行民用节能炉灶改造和房屋节能改造，提高能源利用效率。	★★★
	3. 在有条件的区域进行燃煤清洁能源替换，如煤改电、煤改气。	★★★☆
交通	1. 优化大宗货物运输方式，针对重型货车进行治理。	★★★☆
	2. 加严排放标准、提高燃油经济性。	★★★☆
	3. 推广清洁能源车辆，首先在公用车例如出租车中推广纯电动汽车和混合动力汽车。	★★★☆

5.2 重工业型城市

重工业城市是指以为国民经济各部门提供物质技术基础的主要生产资料的工业为城市支柱产业。重工业城市的高耗能企业多，工业耗煤量大，单位 GDP 碳排放强度相对较高，空气质量问题日益严峻。

表 6 给出了重工业型城市的协同减排政策表。从整体战略来看，重工业型城市未来应当紧紧围绕资源节约型、环境友好型社会建设需要，加快发展节能环保和资源循环利用技术和装备。在供给侧结构性改革的大背景下，去产能政策对支柱产业产能过剩状况严重的重工业型城市会造成经济上的压力，这些城市应当培育转换新动能、抓紧发展新机遇，实现转型发展。工业方面，重工业型城市应当优先从水泥、钢铁、化工、

有色金属等高耗能、高污染的重点行业的基础设施入手，通过技术升级、节能改造、压减过剩产能和淘汰落后产能降低支柱重工业基础设施的能源强度，提高清洁能源利用比例。同时，应当提高电力、热力生产行业的加工转化效率，淘汰落后的小火电机组，鼓励工业企业自备电厂煤改气、采用热电联产及建设分布式能源站。

民用方面，重工业型城市应推动民用散煤清洁能源替代，实施住宅节能改造、提升住宅保暖性能，推广新型清洁高效燃煤炉具。

交通方面，应当加严机动车排放标准、提高燃油经济性以及在公用车辆中推广清洁能源车辆。重工业型城市由于涉及钢铁、建材、焦化、化工等行业的大宗物料运输，应当重点管控货运汽车，进一步优化大宗货物运输方式。

表 6 重工业型城市协同减排政策表

部门	推荐政策	协同减排潜力
规划和产业	坚持传统产业改造和新兴产业并重，将“去产能”和“增动能”有效结合起来。 更新设备，提高产品质量和产品增加值，适当限制某些耗能大，当地又缺乏原料资源的工业的发展。	★★★★★
工业	1. 降低支柱工业基础设施能源强度，可优先从超高排放强度的基础设施入手。 ●淘汰燃煤小锅炉，推进工业锅炉节能改造和清洁能源替代。 ●大力发展高效节能锅炉窑炉、电机及拖动设备、余热余压利用和节能监测等节能装备。 ●对重点行业依法开展强制性清洁生产审核。	★★★★★
	2. 加快压减重点行业过剩产能、淘汰落后产能，以水泥和钢铁行业为例： ●淘汰日产 2000 吨以下的水泥熟料生产线以及年产 100 万吨以下的水泥粉磨站。 ●淘汰 1000 立方米以下的高炉和 60 吨以下的转炉。	★★★★★
	3. 提高能源生产工业的加工转换效率，提高能源行业清洁能源比例。 ●鼓励工业企业自备电厂煤改气，采用热电联产及建设分布式能源站。 ●淘汰落后小火电机组。	★★★★☆
民用	1. 进行燃煤清洁能源替换，如煤改电、煤改气。	★★★☆☆
	2. 推广洁净型煤、兰炭、清洁焦等燃烧效率和热值高且较为清洁的民用燃料，给予相应补贴。	★★★
	3. 进行民用节能炉灶改造和房屋节能改造，提高能源利用效率。	★★★
交通	1. 优化大宗货物运输方式，针对重型货车进行治理。	★★★★☆
	2. 推广清洁能源车辆，首先在公用车例如出租车中推广纯电动汽车和混合动力汽车。	★★★★☆
	3. 加严排放标准、提高燃油经济性。	★★★★☆

5.3 轻工业型城市

轻工业型城市以主要提供生活消费品和制作手工

工具的工业为支柱产业，是我国出口的传统优势产业。轻工业的能耗水平一般较重工业和能源生产行业为低。这一类型城市未来应当稳定发展传统产品，大力推动轻工业产业技术升级，同时加快高新技术产业发展。

轻工业型城市的协同减排应当重点关注能源生产工业(主要为电力和热力供应)、重工业和支柱轻工业。鼓励工业企业自备电厂煤改气,采用热电联产及建设分布式能源站。由于轻工业准入门槛较低,多数产品产能供过于求,还可能存在一些不规范的散乱污小企业,应当推进轻工业集群化,提高生产效率,降低生

产成本与能耗。

民用方面,轻工业型城市应推动民用散煤清洁能源替代,实施住宅节能改造、提升住宅保暖性能,推广新型清洁高效燃煤炉具。交通方面,应当加严机动车排放标准、提高燃油经济性以及在公用车辆中推广清洁能源车辆。

表 7 轻工业型城市协同减排政策表

部门	推荐政策	协同减排潜力
规划和产业	稳定发展传统产品,同时加快高新技术产业发展,大力推动轻工业产业升级。发展企业规模化、技术集成化、生产节约化的现代化大工业模式。	★★★★★
工业	1. 降低能源生产工业与重工业基础设施能源强度,可优先从超高排放强度的基础设施入手。提高能源行业清洁电源比例。 ● 淘汰燃煤小锅炉,推进工业锅炉节能改造和清洁能源替代。 ● 大力发展高效节能锅炉窑炉、电机及拖动设备、余热余压利用和节能监测等节能装备。 ● 提高发电效率。	★★★★★
	2. 轻工业推动生产集群化,提升能效。 ● 淘汰燃煤小锅炉,推进工业锅炉节能改造和清洁能源替代。 ● 治理散乱污小企业。 ● 淘汰落后产能。	★★★★★
	3. 鼓励工业企业自备电厂煤改气,采用热电联产及建设分布式能源站。	★★★★☆
	4. 优化产业布局,推行清洁生产,发展循环经济;推动低碳工业园区和高新技术园区的建设。	★★★★★
民用	1. 进行燃煤清洁能源替换,如煤改电、煤改气。	★★★★★
	2. 推广洁净型煤、兰炭、清洁焦等燃烧效率和热值高且较为清洁的民用燃料,给予相应补贴。	★★★★☆
	3. 进行民用节能炉灶改造和房屋节能改造,提高能源利用效率。	★★★★☆
交通	1. 加严排放标准、提高燃油经济性。	★★★★☆
	2. 推广清洁能源车辆,首先在公用车例如出租车中推广纯电动汽车和混合动力汽车。	★★★★★

5.4 高新技术型城市

高新技术型城市的第二产业和第三产业占比相当,工业中高新技术工业增加值占比较高。高新技术工业具有技术密集型、资本密集型的特点,能耗强度远小于其他工业。与之对应的,高新技术型城市聚集在珠江三角洲、沪宁杭等经济较为发达、开放程度高的地区,单位 GDP 碳排放水平较低。这一类型城市未来应当继续加大研发投入,推动技术进步,发挥产业集群效应。进一步提升新技术工业所占比例、倡导发展节能环保、生物制药、新能源新材料等低碳产业有助于提高源效

率水平,推动协同减排。

高新技术型城市工业部门的协同减排重点集中在提供二次能源的能源生产工业(发电和供热)以及部分重工业,具体措施包括淘汰老旧设施以及技术升级。同时,在高新技术工业中医药制造业、电子及通讯设备制造业的能耗和碳排放相对较高(楚春礼,2011),应当进一步促进其关键领域和重要环节的技术进步。

民用方面,高新技术型城市的人均污染物排放量已经较低,可以通过补贴的方式继续推进民用散煤的清洁能源替代,同时提倡居民节能生活方式。交通方面,应当加严机动车排放标准、提高燃油经济性以及在公用车辆中推广清洁能源车辆。

表 8 高新技术型城市协同减排政策表

部门	推荐政策	协同减排潜力
规划和产业	加大研发投入，推动技术进步，发挥产业集群效应。 倡导发展低碳产业。	★★★★★
工业	1. 降低能源生产工业与重工业基础设施能源强度，可优先从超高排放强度的基础设施入手。 ●淘汰燃煤小锅炉，推进工业锅炉节能改造和清洁能源替代。 ●大力发展高效节能锅炉窑炉、电机及拖动设备、余热余压利用和节能监测等节能装备	★★★★☆
	2. 提高能源行业清洁电源比例，提高发电效率。	★★★★☆
	3. 促进碳排放较高的高新技术工业如高新技术工业中医药制造业、电子及通讯设备制造业的环节的技术进步，降低单位能耗。	★★★
	4. 推行清洁生产、发展循环经济，推动低碳工业园区和高新技术园区的建设。	★★★★★
民用	1. 进行燃煤清洁能源替换，如煤改电、煤改气。	★★★★☆
	2. 推广洁净型煤、兰炭、清洁焦等燃烧效率和热值高且较为清洁的民用燃料，给予相应补贴。	★★★
	3. 进行民用节能炉灶改造和房屋节能改造，提高能源利用效率。	★★★
交通	1. 加严排放标准、提高燃油经济性。	★★★★☆
	2. 推广清洁能源车辆，首先在公用车辆如出租车中推广纯电动汽车和混合动力汽车。	★★★★★

及清洁能源替换。

5.5 服务型城市

服务型城市的单位 GDP 碳排放水平是所有类型城市中最低的，但由于具有较高的经济发展水平和人口数量，排放绝对量较高，因此在协同控制方面可以尝试提出排放总量控制目标。

工业仍然是服务型城市耗能和排放占比最大的部门。服务型城市工业部门的协同减排重点集中在提供二次能源的能源生产工业（发电和供热）以及部分重工业，具体措施包括淘汰老旧基础设施、技术升级以

民用方面，服务型城市的城区终端用能已经高度电气化，人均污染物排放量较低，应当主要提倡居民节能生活方式，控制用能总量。同时，应当通过补贴等方式继续重点推进城郊和农村地区民用散煤的清洁能源替代。交通方面，以北上广深为代表的人口稠密且处于大气污染防治区域的服务型城市可采取限购等措施机动车保有总量，同时利用日常限行措施缓解拥堵；提前实施国六排放限值和先进的燃油经济性标准，加快淘汰高污染、高能耗的老旧车辆；出台相应补贴政策，在公用和民用领域大力推广新能源汽车，同时完善充电桩等基础设施的建设。

表 9 服务型城市协同减排政策表

部门	推荐政策	协同减排潜力
规划、产业及总体目标	提出碳排放总量控制目标。 培育低碳型服务业，发展高新技术产业。	★★★★★
工业	1. 降低能源生产工业与重工业基础设施能源强度，可优先从超高排放强度的基础设施入手。 ●淘汰燃煤小锅炉，推进工业锅炉节能改造和清洁能源替代。 ●大力发展高效节能锅炉窑炉、电机及拖动设备、余热余压利用和节能监测等节能装备。	★★★★☆
	2. 提高能源行业清洁电源比例，提高发电效率。	★★★★☆

民用	1. 进行燃煤清洁能源替换，如煤改电、煤改气。	★★★★
	2. 对于没有条件进行清洁能源替换的地区，推广洁净型煤、兰炭、清洁焦等燃烧效率和热值高且较为清洁的民用燃料，给予相应补贴。	★★★☆
	3. 进行民用节能炉灶改造和房屋节能改造，提高能源利用效率。	★★★☆
	4. 提倡节能生活方式。	★★★★
交通	1. 控制总机动车保有量，出台限购政策。	★★★★
	2. 推广城市智能交通管理，缓解拥堵，可采取限行措施。	★★
	3. 大力发展公共交通出行网络，倡导绿色出行。	★★★★
	4. 加严排放标准，可提前实施国六标准。提升油品。提升燃油经济性，淘汰老旧车辆。	★★★☆
	5. 在公用车（例如出租车）和小客车中推广清洁能源车辆，完善配套设施如充电桩的建设。	★★★★

5.6 农业型城市

农业型城市具有第一产业占比较高的特征，包括了重要的粮食产地和林业资源型城市。农业型城市的经济发展水平较低，但往往具有优越的自然生态禀赋或区位，未来可以以边境贸易、旅游等第三产业为先导，积极发展高新技术产业。同时，发展低碳农业，提升农业的产出率、资源利用效率和现代化水平，加强废弃物综合利用。

工业方面，目前农业型城市工业基础设施的能源强

度相对较高，应当尽量提高能效和清洁能源利用比例。

对于处于可开发地区的农业城市，未来在工业化进程中应当尽量建设低碳节能的基础设施。民用方面，农业型城市应将加强对散煤流通销售环节的监管，推广洁净民用燃料和新型清洁高效燃煤炉具的使用，实施住宅节能改造、提升住宅保暖性能。在有条件的地区，也可进行燃煤清洁能源替换。交通方面，应当加严机动车排放标准、提高燃油经济性以及在公用车辆中推广清洁能源车辆。同时，加强农业机械排放和能耗标准，推广清洁能源农业机械。

表 10 农业型城市协同减排政策表

部门	推荐政策	协同减排潜力
规划和产业	发展低碳农业。 发展旅游业等第三产业。	★★★★
工业	降低工业基础设施能源强度，可优先从超高排放强度的基础设施入手。 ●淘汰燃煤小锅炉，推进工业锅炉节能改造和清洁能源替代。 ●大力发展高效节能锅炉窑炉、电机及拖动设备、余热余压利用和节能监测等节能装备。	★★★★★
	提高能源行业清洁能源比例，提高发电效率。	★★★★☆
民用	1. 取缔劣质散煤。 ●重点监管流通销售环节，严控劣质煤进入市场。 ●推广洁净型煤、兰炭、清洁焦等燃烧效率和热值高且较为清洁的民用燃料，给予相应补贴。	★★★☆
	2. 进行民用节能炉灶改造和房屋节能改造，提高能源利用效率。	★★★☆
	3. 在有条件的区域进行燃煤清洁能源替换，如煤改电、煤改气。	★★★★
交通	1. 加严排放标准、提高燃油经济性。	★★★
	2. 推广清洁能源车辆，首先在公用车例如出租车中推广纯电动汽车和混合动力汽车。	★★★☆
	3. 加强农业机械排放和能耗标准，推广清洁能源农业机械。	★★
农业	1. 提高使用化肥、农药的效率。	★★
	2. 科学处理农业废弃物，对秸秆、沼气等农业生产中的副产品进行资源再生和能源利用。	★★★☆

5.7 前工业化型城市

前工业化型城市集中在我国西部地区西藏、新疆、甘肃等省份，人口较少，工业化程度、城镇化程度以及经济发展水平相对较低。多数前工业化城市位于生态保护区或旅游区，空气质量较好，对全国碳排放量贡献不到 2%。因此，这一类型城市的协同减排压力相对较小。规划与总体目标仍然以在保护生态的前提

下发展经济为主，未来可因地制宜提升旅游休闲等服务功能，建设生态友好型产业体系。

工业方面，前工业化城市可能由于经济发展和技术水平限制，基础设施的能源强度相对较高，应当淘汰燃煤小锅炉，提高能效和清洁能源利用比例。此外，西部一些前工业化城市如和田地区、天水市等地的空气污染主要来自于沙尘天气等自然因素，可主要通过加强生态建设、植树造林等措施，防治风沙、增加碳汇，实现进行协同减排。

表 11 前工业型城市协同减排政策表

部门	推荐政策	协同减排潜力
规划和产业	因地制宜发展特色产业，发展清洁能源体系。	★★★★
工业	降低能源生产和重工业基础设施能源强度，淘汰落后产能，提高能源加工转换效率。 ●淘汰燃煤小锅炉，推进工业锅炉节能改造和清洁能源替代。 ●淘汰落后小火电。	★★★★★
民用	1. 进行燃煤清洁能源替换，如煤改电、煤改气。	★★★★
	2. 推广洁净型煤、兰炭、清洁焦等燃烧效率和热值高且较为清洁的民用燃料，给予相应补贴。	★★★☆
	3. 进行民用节能炉灶改造和房屋节能改造，提高能源利用效率。	★★★☆
交通	1. 加严排放标准、提高燃油经济性。	★★★☆
	2. 推广清洁能源车辆，首先在公用车例如出租车中推广纯电动汽车和混合动力汽车。	★★★★
其他	加强生态建设、植树造林。	★★★★

城市案例分析

本章节挑选了所属类别中的代表性城市进行城市案例分析。在对具体城市进行减排潜力分析时，可首先基于城市基准年大气污染物和温室气体排放清单识别出城市重点减排领域，对于可量化的措施考虑未来活动水平和末端控制措施的变化，计算大气污染物和二氧化碳排放的减排潜力。然后，结合第五章的评分方法，基于城市各个源的排放特征、重点领域和可量化的措施的计算结果评估各项措施的总体减排潜力。



1. 城市所属分类及空气质量现状

大同市是中国最大的煤炭能源基地之一，同时也是国家重化工能源基地，属于能源型城市。新中国成立后的60余年里，大同向全国输送了24亿吨的煤炭。但“一煤独大”的模式，也造成了单一的产业结构和典型的煤烟型污染。近年来大同市主动应对资源型城市转型的严峻挑战，坚持生态立市发展战略，持之以恒改善环境质量，2018年优良天达标率83.7%，成为山西省空气质量最好的城市。大同的探索与试错，对资源型城市未来的发展和协同减排路径有着很好的借鉴意义。

2. 重点领域识别和减排潜力分析

在提高煤炭就地转化和清洁生产能力的战略下，大同市“十三五”纲要规定未来把煤变电作为产能置换的重要抓手，加快电力项目建设，重点发展大容量、高参数超临界、超超临界燃煤发电机组，建设千万千瓦级火电基地。若考虑火电部门淘汰关停不达标的30万千瓦以下煤电机组、机组单位碳排放下降到全国先

进水平，CO₂、SO₂、NO_x、PM_{2.5}的排放量可分别减少310万吨、1600吨、10182吨和1261.4吨，在2016年基础上下降6.2%、2.7%、12.3%和3.8%。工业方面，重点关注煤炭及其相关产业向清洁低碳型、生态环保的方向转变。如果淘汰所有35蒸吨以下的工业燃煤小锅炉、降低锅炉单位产品碳排放水平，CO₂、SO₂、NO_x、PM_{2.5}的排放量可分别在2016年基础上下降1.5%、5.7%、4.0%、2.8%。

由于处于煤炭产区，煤炭可得性高，大同市平房户以往燃煤污染较为严重。为此，大同市委、市政府以政府补助、专项资金支持和相关县区配套的方式，每年冬季向古城内平房居民每户免费发放1吨环保型煤，购买2吨环保型煤的价格也较为优惠。大同市还正在开展“煤改电”采暖电气化试点工程，若2050户全部改造完成（张义丰等，2017），终端预计可年节约0.615万吨原煤，年减排SO₂ 145.6吨、NO_x 26.7吨、PM_{2.5} 218.4吨、CO₂ 2.1万吨。

大同市交通部门CO₂的排放主要来源于小客车和

重型柴油货车，NO_x、PM_{2.5}、BC 等污染物的主要来源则集中在重型载货柴油车以及三轮、低速柴油货车。大同市在煤炭生产过程中涉及的大宗物料运输依赖于重型柴油货车，其污染物和碳排放量都较高。为推进大同市交通部门未来的协同减排，应当重点关注重型柴油货车的管理，加严排放标准的同时积极调整交通运输结构，推进大宗物料运输的公转铁、公转水。

3. 未来重点协同减排措施

表 12 展示了大同市未来的重点协同减排措施。整体发展战略上，煤和非煤产业将并行发展。煤炭产业方面未来朝“高碳能源低碳发展，黑色能源绿色发展”的方向努力，淘汰落后煤炭产能、压减过剩煤炭产能，提高煤炭产业的集约化水平。由于减少原煤在终端的使用可提升能源效率、减少碳和污染物的排放，推进煤炭就地转化、提高清洁生产能力对协同减排具有重要意义。例如，大同市依赖出产的低变质烟煤的优势，未来可着力推进传统煤化工转型升级、现代煤化工链式发展和煤炭固废综合循环利用，重点发展煤基天然气清洁能源、煤制烯烃、煤制芳烃等高端产品。“煤转电”是另一个重要的战略，大同市计划建设大型火电基地，因此应当特别注重火电部门的技术升级

和能效提升。在非煤炭工业方面，应当积极培育替代产业、发展高新技术产业。以光伏产业为例，大同市的采煤沉陷区国家先进技术光伏示范基地列入了国家专项规划，未来可进一步规模化开发利用风电、光伏发电和生物质发电等新能源，形成风电、光电、水电多轮驱动的新能源供应体系，打造具有全国典型示范意义的“千万风光”新能源城市和清洁能源供应基地。

民用方面，应当着力构建低碳取暖体系。基于大同市的资源禀赋，可将发展集中供热、推广洁净型煤作为主要的民用部门协同减排措施，在少数有条件的区域可进行“煤改气”、“煤改电”的试点工作。目前城区已经建立了禁燃区，未来应当重点关注城中村、城乡结合部和农村地区的燃煤清洁替代。

交通方面，主要加强工业生产中涉及的柴油货运车治理以及大宗物料货运结构调整。未来应当加严柴油货运车排放标准和燃油经济性标准，大宗物料和产品通过铁路、新能源汽车或达到国六排放标准汽车等方式运输。加快铁路集运站点建设，鼓励引导重点用车企业采用铁路运输方式。加大工矿企业铁路专用线建设投入，加快钢铁、电力等重点企业铁路专用线建设。

表 12 大同市协同减排政策总结

部门	推荐政策	协同减排潜力
规划和产业	煤与非煤产业两手抓。 加快转变能源产业发展方式，调整优化能源结构，提高能源效率，提升能源产业核心竞争力。 提升装备制造、现代煤化工、新材料、节能环保等优势替代产业，构建转型发展重要支柱产业。大力发展旅游业。 煤炭消费总量控制。	★★★★★
煤炭工业	降低能源行业基础设施能源强度，淘汰落后煤炭产能，提高能源加工转换效率。提高煤炭就地转化和清洁生产能力。 引进和推广先进的煤炭洗选、配煤、煤泥脱水干燥等适用技术，改原煤供应为经洗选筛分的高端商品煤供应。	★★★★★
火力发电	煤电产业优化升级。淘汰落后小火电，重点发展大容量、高参数超临界、超超临界燃煤发电机组，建设千万千瓦级火电基地。	★★★★★
非煤炭工业	淘汰 35 吨以下燃煤小锅炉，推进工业锅炉节能改造和清洁能源替代。	★★★
民用	设立散煤禁燃区，扩大集中供热覆盖范围。推广环保型煤，给予相应补贴。	★★★
	在有条件的地区进行燃煤清洁能源替换试点，如煤改电、煤改气。	★★★☆
交通	针对柴油货车进行重点治理。加强大宗物料货运结构调整。	★★★★
	加严小客车排放标准和燃油经济性标准；控制机动车保有总量。	★★★★



1. 城市所属分类及空气质量现状

经过百年发展，唐山市依托区位、资源、港口等优势逐渐形成了钢铁、装备、化工、能源、建材等优势支柱产业。截止 2016 年底，钢铁、装备制造、能源、化工、建材五大产业占比达到 70.4%，钢铁产业在全国占据重要位置，是典型的重工业城市。2018 年，唐山市细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 平均浓度 $60 \mu g/m^3$ ，2018 年空气质量综合指数在 169 个城市中排名 166，在 338 个城市中排名 334，空气质量仍然需要改进。

2. 重点领域识别和减排潜力分析

工业是唐山市的重点减排领域。工业煤炭消费量中，焦化行业消费 1721.7 万吨，钢铁行业消费 1700.9

万吨，电力热力生产行业消费 1438.0 万吨，建材行业消费 157.0 万吨，分别占工业煤炭消费量的 23.5%、23.2%、19.6% 和 2.1%。其中，钢铁对除 NH_3 以外的所有大气污染物排放的贡献都是第一位，需要重点关注。如果考虑工业部门能效提升，即假设 2016 年唐山市火电、钢铁、水泥以及工业锅炉等基础设施的单位产品碳强度均达到全国平均水平，工业部门 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 和 $PM_{2.5}$ 的减排比例将分别达到 9.0%、3.5%、6.8% 和 4.0%，其中钢铁部门对协同减排的贡献最大（表 13）。如果考虑淘汰落后产能时小型基础设施被大型基础设施兼并后末端技术升级到大型基础设施的水平，则大气污染物减排效益将更为显著，仅

表 13 唐山市工业部门能效提升情景

部门	CO_2 减排量 / 吨	SO_2 减排量 / 吨	NO_x 减排量 / 吨	$PM_{2.5}$ 减排量 / 吨
火电	4305378	336	10932	525
钢铁	12307542	6526	17509	3729
水泥	14630	14	65	73
其他工业锅炉	2295830	405	3307	960
合计减排量	16810877	6946	28850	4535

钢铁行业的 SO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的减排量就能达到 26236 吨和 14998 吨，分别占 2016 年唐山市工业部门排放的 15% 和 14%。

唐山市的民用散煤使用量较大。截止 2017 年底唐山市民用散煤耗量约 300 万吨，清洁型煤的使用比例仅为 7%，具有较大的污染物减排空间。如果未来将城镇的煤炭消费全都替换为循环流化床锅炉集中供热，假设集中供热锅炉燃烧效率达 70%， CO_2 、 SO_2 、 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放可分别下降 34 万吨、186.5 吨、481 吨和 44.3 吨。如果将乡村剩余的一般烟煤全都替换为清洁型煤且采用配套的高效清洁燃烧炉具（热效率 70% 以上），可节约燃煤 30 万吨， CO_2 、 SO_2 、 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放可分别下降 67 万吨、3816.5 吨、270.6 吨和 1734.2 吨。如果实现以上散煤清洁替代措施，民用部门 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放将在 2016 年基础上均下降超过 40%。

目前唐山市交通部门 CO_2 的排放主要来源于小客车和重型柴油货车， NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、BC 等污染物的主要来源则集中在重型载货柴油车和三轮柴油车。作为典型的重工业城市，唐山市铁矿石、煤炭、钢材、焦炭等大宗物料运输量大。以钢铁行业为例，生产一吨粗钢需要 5 倍以上的运输量，以 2018 年 1.3 亿吨粗钢产量计，钢铁行业货物周转量 6.5 亿吨，仅此一项重型柴油货车日车流量达 5 万辆以上，且大部分为国 III 车辆，占比达 50% 左右，污染排放贡献大。为推进唐山市交通部门未来的协同减排，应当重点关注重型柴油货车的管理，加严排放标准的同时积极调整交通运输结构，推进大宗物料运输的公转铁、公转水。

3. 未来重点协同减排措施

整体战略上，唐山市以第二产业为主体，一、三产业也不断发展壮大。钢铁、能源、化工和建材等传统重工业产业增加值占规上工业比重下降，先进装备制造、电子信息产业等逐步发展，装备制造业成为拉动工业经济增长的第一动力。唐山市未来将持续推

进转方式、调结构，加速转型升级传统主导产业，同时在战略性新兴产业和现代服务业上打开新的发展空间。由于煤炭消耗总量大，应当实行煤炭消费总量的控制。

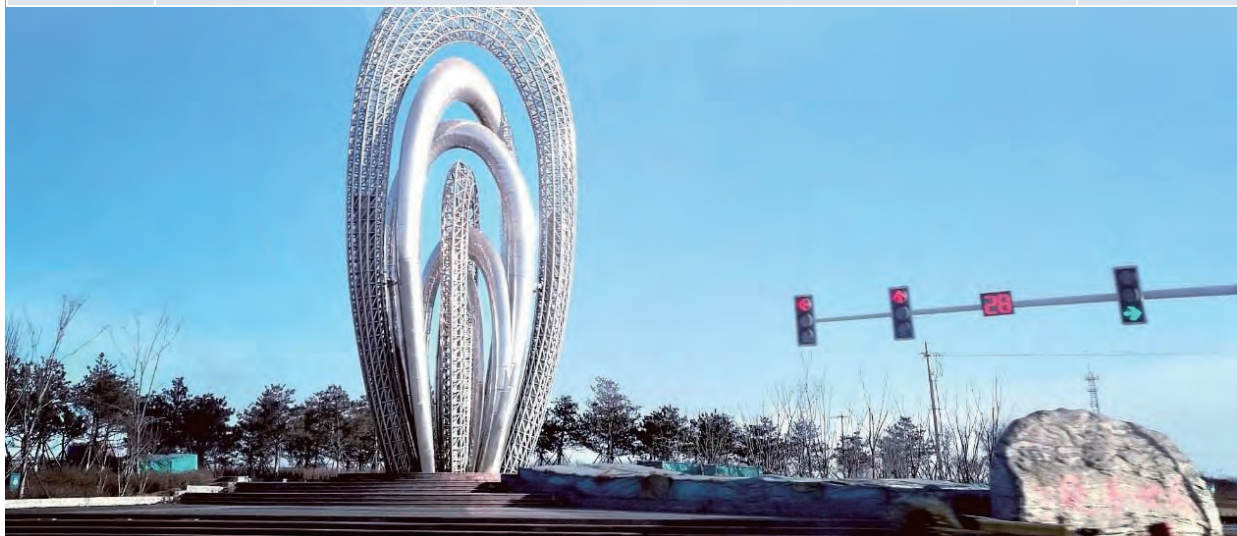
工业方面，按照“绿色、高端、集约、高效”的发展方向，调整优化产业结构，加快传统产业向中高端迈进。火电行业应提高电力装机水平，继续淘汰能耗高、污染重的小火电机组，重点推进城市和区域热电联产机组建设，稳妥推进超临界、超超临界大型发电机组布局建设。重点推进钢铁、煤炭、水泥、造纸等重点行业的产业结构调整。以钢铁行业为例，从 2013 年起，唐山市开始逐步淘汰 1000 立方米以下的高炉和 60 吨以下的转炉，未来要淘汰 100 吨以下（不包括 100 吨）转炉。唐山市支持优势钢铁企业在减量调整前提下实施兼并重组，未来将钢铁企业整合到 30 家以内，使有效钢铁产能向优势核心企业集中，降低能耗和污染物排放水平。同时，应当优化升级生产技术，提高高炉煤气、转炉煤气、焦炉煤气、高炉水渣、钢渣的综合利用率。

民用方面，着力构建低碳取暖体系。强化散煤市场和劣质煤管控，推进“煤改气”、“煤改电”的燃煤清洁取暖，根据唐山市“十三五规划”，2020 年前全市平原农村地区的分散燃煤取暖要实现基本清零。

交通方面，主要加强重点行业生产运输中涉及的柴油货运车的治理以及大宗物料货运结构调整。未来应当加严柴油货运车排放标准和燃油经济性标准，大宗物料和产品通过铁路、新能源汽车或达到国六排放标准汽车等方式运输；同时加强公转铁“最后 1km”污染控制，采取措施减少独立轧钢厂、铸造企业等货车倒运量。例如，唐山市目前正在加快推进钢铁企业铁路专用线建设，计划 2019 年新建 10 家钢铁企业铁路专用线，基本实现疏港铁矿石全部采用铁路运输。对于载客汽车，未来应当继续加严排放标准、提高燃油经济性，进一步推广新能源汽车的应用，必要时可对保有总量进行控制。

表 14 唐山市协同减排政策总结

部门	推荐政策	协同减排潜力
规划和产业	加快传统产业向中高端迈进，培育壮大战略性新兴产业 持续化解产能过剩，建立倒逼退出机制，在去产能的过程中调整优化产业结构。 煤炭消费总量控制。	★★★★★
火力发电	煤电产业优化升级，淘汰关停环保、能耗、安全等不达标的 30 万千瓦以下燃煤机组，完成机组供热改造。 重点推进城市和区域热电联产机组建设，稳妥推进超临界、超超临界大型发电机组布局建设。	★★★★★
钢铁工业	升级生产技术、降低吨钢综合能耗，提高高炉煤气、转炉煤气、焦炉煤气、高炉水渣、钢渣的综合利用率。 控制钢铁、焦化行业总产能，淘汰落后产能。推进企业兼并重组和产能置换。	★★★★★
其他工业	削减建材行业低端产能，加强铸造企业产能调成与污染治理。 淘汰 35 蒸吨以下燃煤小锅炉，推进工业锅炉节能改造和清洁能源替代。鼓励工业炉窑使用电、天然气等清洁能源或由周边热电厂供热。 动态出清散乱污企业。	★★★★★
民用	取缔全市平原农村地区的分散燃煤取暖。 推广清洁燃烧炉具与环保型煤，给予相应补贴。	★★★☆☆
	推进燃煤清洁能源替换，如煤改电、煤改气。	★★★★★
交通	针对柴油货车进行重点治理。 加强大宗物料货运结构调整。	★★★★★
	加严小客车排放标准和燃油经济性标准；控制机动车保有总量。	★★★☆☆





1. 城市所属分类及空气质量现状

泉州市是地处福建省的沿海城市，是我国重要的纺织鞋服生产基地和出口基地，纺织鞋服业年产值约占全市工业总产值的 1/3；其他主导产业还包括石油化工、机械装备和建材家居。泉州市 2017 年三次产业比例为 2.6: 58.3: 39.1，轻重工业规模以上工业总产值的比约为 1.6，在本指南中被划分为轻工业城市。

泉州市空气质量较好，2018 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度达到国家二级标准， SO_2 、 NO_2 、CO、 O_3 全部达标。为进一步改善空气质量，防止臭氧污染恶化，泉州市除 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、 $PM_{2.5}$ 外还将重点关注挥发性有机物的控制。

2. 重点领域识别和减排潜力分析

工业能耗约占泉州市综合能耗的 80%，是泉州市节能减排的重点领域。尽管泉州市经济以轻工业主导，但工业主要的能源消耗集中于重工业。2015 年，石油加工、炼焦及核燃料加工业消耗 916.34 万 tce，电力、热力的生产和供应业消耗 453.63 万 tce，非金属矿物制品业消耗 397.46 万 tce，黑色金属冶炼及压延加工业消耗 141.36 万 tce，纺织业消耗 93.53 万 tce，造纸及纸制品业消耗 50.07 万 tce。上述 6 个行业的能源消

费量占规模工业能源消费量比重达 88.7%，却只贡献了全市工业规模以上增加值的 36.2%。为此，应当重点削减这些行业的能源强度。火电方面，应当全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造。通过淘汰落后小火电，泉州市 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、 $PM_{2.5}$ 的排放量可分别减排 9.5 万吨，1435 吨，6568 吨和 1462 吨，在 2016 年基础上下降 0.2%，2.1%，5.9%，5.0%。对于其他工业，应当加快燃煤锅炉综合整治，控制石油炼制、石油化工、集装箱、汽车、船舶制造等重点行业挥发性有机物排放。如果淘汰所有 35 蒸吨以下的燃煤小锅炉并进行技术升级， CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、 $PM_{2.5}$ 和 VOC_s 的排放量可分别减排 68.9 万吨，14567 吨，55567.0 吨，1639.9 吨和 3631.5 吨，在 2016 年基础上下降 1.3%，21.2%，5.0%，5.6% 和 1.4%。

民用方面，泉州市散煤总体使用量并不大，2016 年碳排放仅占全市碳排放量的 1.1%， SO_2 和 $PM_{2.5}$ 排放分别占全市的 2.5% 和 3.3%。目前泉州市已经划定了高污染燃料禁燃区，开展散煤的清洁能源替代。此外，还应当强化建筑节能，加大绿色建筑推广力度、开展住房节能改造，进一步健全能源计量体系。新建建筑应当全面执行绿色建筑标准。同时，提倡居民的

节能生活方式。

交通方面，泉州市交通部门 SO_2 、 CO_2 的排放主要来源于小客车，载货柴油车也有一定的贡献。 CO 、 VOC_x 基本上全都来源于小客车。 NO_x 主要来源于轻型和重型载货汽车， $\text{PM}_{2.5}$ 、 OC 等污染物的主要来源是载货柴油车、摩托车和一些非道路机械。因此，控制泉州市小客车保有量、降低小客车燃油消耗总量可有效进行碳减排，而加严载货汽车、摩托车和非道路机械的排放标准能带来更为显著的空气质量效益。同时，推广新能源汽车的应用能够有效降低交通部门终端的碳排放和污染物排放。

3. 未来重点协同减排措施

工业方面，针对泉州市高耗能行业能源消费占工业能源消费的比重很大、创造的增加值却相对较小的问题，应当加快延伸高耗能行业的中下游产业链，提升附加值。同步控制高能耗、高污染型企业的准入门槛，主要包括产值能效限额、产品能耗限额、工艺能耗限额以及设备能效限定等，推广使用低碳技术，最大限度地减少和控制生产过程中的排放，在源头治理、过程治理、末端治理这 3 个环节上通过科技创新，提高行业能源利用水平。以电力、石化、建材、钢铁、

纺织等行业为重点，淘汰落后产能、加快兼并重组，推广节能装备，加强资源节约、污染物减排与治理。火电行业按照“总量控制、全面削减、全程管理、高效低碳”的原则，控制发电行业燃煤总量。积极探索煤炭清洁化发电技术，有序推进热电联产和天然气发电。全面推广水力、太阳能、风能、生物质能等清洁能源发电，扩大清洁能源发电比例。

民用方面，加大民用散煤清洁化治理力度，推进以电代煤、以气代煤，推广使用洁净煤、先进民用炉具。削减农村炊事和设施用煤，鼓励开发使用太阳能、地热、水电等清洁能源，改造提升农村炊事、采暖和设施农业燃煤装置和设备。强化既有建筑节能改造，新建建筑全面执行绿色建筑标准，加强公共机构节能。同时，推广低碳生活方式。

交通方面，针对载货汽车、摩托车、非道路机械进行治理，淘汰落后车辆、加严排放标准。货物运输方面，推广先进运输组织模式，大力发展甩挂运输，加快推进集装箱多式联运、零散货物快运化运输。加严小客车排放标准和燃油经济性标准，淘汰老旧车辆，控制机动车保有总量。持续推进公交优先发展战略，大力推广新能源汽车、清洁能源汽车。

表 15 泉州市协同减排政策总结

部门	推荐政策	协同减排潜力
规划和产业	加快推动传统产业改造提升和优化升级、着力打造战略性新兴产业集群。限制高耗能高排放产业扩张，优化产业结构。 能源消费总量和能源消费强度双控。	★★★★
火力发电	控制发电行业燃煤总量，积极探索煤炭清洁化发电技术。 淘汰高排放小火电，规范有序地重点建设大容量、高参数、低排放热电联产项目。 扩大清洁能源发电比例。	★★★★★
工业	发展流程型制造业清洁生产，推进离散型制造业绿色制造。 整合小型企业，淘汰落后产能，提升工业生产效率和能耗效率。 推广工业集中供热和供气。淘汰 35 蒸吨以下燃煤小锅炉，推进工业锅炉节能改造和清洁能源替代。	★★★★★
民用	加大民用散煤清洁化治理力度，推进以电代煤、以气代煤，推广使用洁净煤、先进民用炉具。	★★
	推行低碳生活方式，强化建筑节能。	★★★
交通	对载货汽车、摩托车和非道路机械进行重点治理。	★★★
	加严小客车排放标准和燃油经济性标准；控制机动车保有总量。 大力推广新能源汽车。	★★★☆



1. 城市所属分类及空气质量现状

湖州市地处浙江省北部。从产业结构来看，湖州市第三产业占比目前已经超过了第二产业，2016 年达到 5.1: 47.4: 47.5。2016 年湖州市高新技术产值已经占到 40% 以上，在本指南分类中被划分到高新技术产业型城市。湖州市在浙江省内空气质量排名靠后，但空气质量近年来逐年改善，2018 年 $\text{PM}_{2.5}$ 的年均浓度为 $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，同比下降 14.3%，已经接近达标。

2. 重点领域识别和减排潜力分析

湖州市的工业门类齐全，但行业存在过剩产能。湖州市规上工业企业综合能源消费中，建材、纺织、电力、化纤、化工等高耗能高污染行业共占到 70% 以上，是需要重点关注的行业。湖州市火力发电能耗水平已经较为先进，进一步加强烟气深度治理可产生更多的空气质量效益，使得 SO_2 、 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 下降 7.8%，5.6% 和 9.9%。未来大力推进热电联产，基本淘汰热电联产供热管网覆盖范围内的燃煤加热、烘干炉（窑）。水泥砖瓦行业存在产能过剩情况，可进一步进行产能压减。例如，如果将 2017 年 16 家粘土砖瓦企业、2 家水泥粉磨站和 3 家水泥熟料生产企业关停，可减少 SO_2 排放量 1207.5 吨， NO_x 排放量 2585.5 吨，一次

$\text{PM}_{2.5}$ 排放量 752.6 吨， CO_2 排放量 221.2 万吨。淘汰 35 蒸吨以下燃煤锅炉并将排放绩效提高至先进水平，可减少 SO_2 排放量 7485.2 吨， NO_x 排放量 2593 吨，一次 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量 944.1 吨， CO_2 排放量 48.9 万吨，分别在 2016 年基础上下降 33.3%，5.4%，6.8% 和 1.95%。重点削减工业部门非电力用煤，提高电力用煤比例，非电用煤消耗占比到 2020 年降至 30% 以下。可进一步提高外调电比例。

民用方面，湖州市不属于冬季严寒地区，没有大面积使用散煤取暖的情况。因此未来主要加大绿色建筑推广力度。鼓励开展农村住房节能改造。进一步健全能源计量体系。新建建筑全面执行绿色建筑标准。同时，提倡居民的节能生活方式。

交通方面，湖州市是长三角地区重要的建筑材料供应基地，矿建材料、水泥熟料等大宗货物运输量大，使得货车的污染物排放较高。目前货物运输仍以重型货车为主的公路运输为主，未来应当发挥水运、铁路在大宗物资中长距离运输中的骨干作用，大幅提高水路、铁路货运比例。

3. 未来重点协同减排措施

工业方面，湖州市未来将积极推广使用超临界和超超临界的发电设备。按照“宜气则气”、“宜电则电”

原则，积极引导用能企业实施清洁能源替代。加快园区集中供热，推进配套热力管网建设。供热范围内不得新建自备燃煤发电机组、分散燃煤锅炉。通过关停淘汰、整治入园、规范提升等方式，推进建材行业（包含但不限于水泥、砖瓦、琉璃瓦、陶瓷、玻璃、耐火材料等生产企业）、木业（包括竹制品）行业上大压小、扶优汰劣、整合提升，全面提高装备技术水平和绿色低碳发展水平，力争达到国际先进水平。全面开展“散乱污”企业及集群综合整治专项行动。

民用方面，新建建筑全面执行绿色建筑标准。加快推进城乡用能电气化，加强农村电网建设，提升农村供电质量。同时，提倡居民的节能生活方式。

交通方面，发挥水运、铁路在大宗物资中长距离运输中的骨干作用，提高水路、铁路货运比例，推动

交通运输业绿色低碳发展。依托内河港口、公路港和铁路物流基地等，推进多式联运型和干支衔接型货运枢纽（物流园区）建设，加快推广集装箱多式联运，提升“陆改水、散改集”的运输比例。提升机动车排放标准，采取经济补偿、限制使用、严格超标排放监管等方式，大力推进国三及以下营运柴油货车提前淘汰更新，加快淘汰采用稀薄燃烧技术和“油改气”的老旧燃气车辆。同时，以湖州市列入国家新能源汽车推广应用试点城市为契机，大力推动交通运输装备低碳化，交通用能结构持续优化。出台新能源运输车辆财政补贴政策和路权优先政策，为其提供经济支持和城市通行便利。同时，加快城市充电站（桩）建设，积极构建适应新能源汽车推广应用规模的充换电基础设施网络。

表 16 湖州市协同减排政策总结

部门	推荐政策	协同减排潜力
规划和产业	大力发展低能耗、高附加值的新兴产业和高端制造业，着力传统制造业低碳化改造，加快发展现代服务业。 能源消费总量和能源消费强度双控，有序推进天然气输配系统建设。	★★★★★
火力发电	积极发展热电联产、优化电力生产结构。 提高接收外送电比例。	★★★☆☆
工业	关停一批水泥、砖瓦企业。	★★★
	加大非金属矿物制品、纺织、化纤、金属压延加工等重点耗能行业节能力度，实施工业炉窑改造、余热余压利用、热电冷联产、电机能效提升等工程。 淘汰 35 蒸吨以下燃煤小锅炉，推进工业锅炉节能改造和清洁能源替代。 严格治理自备电厂。鼓励工业炉窑使用电、天然气等清洁能源或由周边热电厂供热。	★★★★★
民用	加大绿色建筑推广力度。 加快推进城乡用能电气化，加强农村电网建设，提升农村供电质量。 提倡节能生活方式。	★★★
交通	针对柴油货车进行重点治理，淘汰老旧车辆。 加强大宗物料货运结构调整。	★★★
	大力发展公共交通。 加严小客车排放标准和燃油经济性标准；控制机动车保有总量。	★★★★★



案例

5

北京市
— 服务型城市

1. 城市所属分类及空气质量现状

北京市是我国的首都，经济发展水平较高，人口数量大。2016 年北京市人均 GDP 达到 118198 元，第三产业占比高达 80% 以上，在本指南中被划分为服务型城市。

目前，北京市已经基本形成了低消耗、低排放的经济发展格局。从能源结构来看，北京市 2016 年煤炭消费仅占能源消费总量的 9.8%，油品、天然气消费和净调入电力分别占 32.9%，31.7% 和 23.2%，基本确立了清洁低碳的能源结构体系。

近年来北京市空气质量不断改善，2018 年全市平均浓度为 51 微克 / 立方米，比 2013 年下降了 42.7%，但目前仍超过国家标准（35 微克 / 立方米）46%。此外，北京市作出了 2020 年碳达峰的承诺。为实现空气质量和碳达峰目标，未来北京还需要在节能减碳、污染减排领域继续奋斗。

2. 重点领域识别和减排潜力分析

根据北京市“十三五”规划，北京市第三产业和居民生活能耗占全市能源消耗总量的比重已经超过 70%，因此节能减碳的重点领域已经逐步从工业转向了服务业。

北京市在十二五规划中就提出了煤炭总量控制和五环路内无煤化的目标。在“大气十条”的推动下，目前北京市建成了四大燃气热电中心，燃煤电厂全面关停。2016 年北京市基础设施的碳排放强度低于全国平均水平，能效方面较为先进。水泥行业没有落后产能，吨熟料能耗在 123 吨标准煤左右。如果按照 2020 年国家目标下降至 105 吨标准煤 / 吨熟料，水泥行业

CO₂ 和 SO₂ 排放可分别减排 170916 吨和 104 吨，分别占 2016 年北京市水泥行业排放的 5.4% 和 14.7%。

北京的民用散煤治理起步也较早，1998–2013 年间就开展了中心城区和核心区的老旧平房煤改电。目前北京市实现了城六区及南部平原地区基本无煤化，其他地区基本实现了洁净型煤替代散煤，农村煤炭使用量为 300 万吨左右。北京市政府提出到 2020 年实现全市平原地区农村基本无煤化的目标，因此未来还将进一步实施煤改电政策。假定继续完成 100 万吨民用煤炭的“煤改电”工作，预计需要 28.6 亿千瓦时电力替代。如果用于替代的电力全部来自煤电机组，由于火电厂具有较为完善的末端控制措施，NO_x、SO₂ 和 PM_{2.5} 排放量可分别下降 650 吨，1100 吨和 5454 吨，占 2017 年北京农村民用部门排放的 15.3%，19.7% 和 22.2%。但对于二氧化碳，由于电力加工转换损失和电力传输损失等因素总排放反而上升了 10%。如果替代电力有 30% 来自非化石燃料电源，则煤改电后的碳排放维持原有水平，NO_x、SO₂ 和 PM_{2.5} 排放量可分别下降 728 吨、1309 吨和 5464 吨。如果替代电力全部来自清洁能源，则污染物和碳减排量同步下降 1/3，从这里可以看出电力供应侧清洁生产的重要性。

交通方面，北京市民用汽车保有量和能源消耗量的主体是小客车。CO、CO₂、SO₂ 的排放主要来源于保有量最大的小客车，而 NO_x、PM_{2.5}、OC 等污染物的主要来源是重型载货柴油车和大型载客柴油车。因此，降低小客车燃油消耗总量可有效进行碳减排，而

加严大型柴油车的排放标准能带来更为显著的空气质量效益。同时，推广新能源汽车的应用能够有效降低交通部门终端的碳排放和污染物排放。按照 2020 年我国小客车燃油经济性的目标，如果将 2016 年所有小客车的燃油经济性提升至 5L/100km，交通部门可节约 52 万吨汽油，碳排放量将下降 8.7%，但 NO_x 下降比例仅 1.4% 左右。如果纯电动大型客车比重提升到约 60%（参照北京市 2020 年公交车电动化率达到 60% 的目标），则交通部门终端 CO_2 排放和 NO_x 分别减排 87 万吨和 1.2 万吨，占 2016 年北京市交通部门总排放的 4.7% 和 16.8%。未来在排放措施较为严格、燃油经济性水平较高的情况下，北京市应深化交通结构调整，进一步推广新能源汽车的使用。

3. 未来重点协同减排措施

未来北京市将围绕民用、交通、工业和公共机构等重点耗能领域，加快实施节能减排工程，突出全生命周期和全运行过程的节约管理，切实提高重点领域能源利用效率，实现协同减排。

工业方面，首先要强化能源生产环节的节能减排。加强电厂节能发电调度，优化启停操作、整机协调、辅机运行管理。对全市燃气电厂、燃气锅炉、工业窑炉余热余压回收利用改造。更新、改造老旧电网线路和变压器，降低电网综合线损率。推行按需供热模式，推广气

候补偿、烟气冷凝热回收、锅炉集控等技术，实现智能化管控，提高综合供热效率。加强外受电通道建设，实施配网升级改造，稳步提升电力供应保障能力。第二，要深入推进工业企业节能改造。淘汰落后用能设备，优化重点企业的生产工艺和能源系统优化项目，提升能效，降低工业生产过程碳排放和污染物排放。运用信息化技术和手段，实现生产过程能源消耗的监测和精细化管理。

民用方面，新建建筑全面执行绿色建筑标准。加快推进城乡用能电气化，加强农村电网建设，提升农村供电质量；通过燃气管网或 CNG、LNG 储运等输配方式，推进天然气利用由中心城和新城向乡镇及农村地区拓展。在工业园区、学校、工商业企业和大型公共建筑等场所推广使用分布式光伏发电系统，推进太阳能光热系统建筑一体化应用。结合新型农村社区建设和农宅新建翻建改造，推广使用太阳能供暖系统和光伏系统。同时，提倡居民的节能生活方式。

交通方面，应当打造低碳交通体系，推进交通用能结构持续优化。在地面公交、郊区客运、出租行业、省际客运、旅游客运、货运行业领域，分步骤推广应用新能源和清洁能源车，加快充电设施建设，并继续提高新能源小客车指标在年度指标总量中的比例。同时，加快城市充电站（桩）建设，积极构建适应新能源汽车推广应用规模的充换电基础设施网络。

表 17 北京市协同减排政策总结

部门	推荐政策	协同减排潜力
规划和产业	继续推进无煤化战略，提高可再生能源比例。突出全生命周期和全运行过程的节约管理。利用碳排放交易等制度推动碳达峰。	★★★★★
火力发电	加强外受电通道建设，减少电网损耗。优化电力生产结构。	★★★
工业	加快淘汰落后产能。应用余热余压回收利用等节能技术。生产过程能源消耗的监测和精细化管理。	★★★
民用	高标准推广绿色建筑。新建民用建筑 100% 执行绿色建筑标准，新建政府投资的公益性建筑及大型公共建筑须达到绿色建筑二星级及以上标准。	★★★☆
	继续在农村推进“煤改气”、“煤改电”，山区农村分散燃煤实现清洁燃料覆盖。	★★★☆
交通	加严小客车排放标准和燃油经济性标准；控制机动车保有总量。	★★★★★
	新能源车辆推广。	★★★★★

结论和建议

城市是未来我国实现空气质量目标和碳减排目标的基本单元，在城市尺度上实现大气污染物和温室气体的协同减排至关重要。绿色发展是构建高质量现代化经济体系的必然要求，也是解决污染问题的根本之策。空气质量改善目标和碳达峰目标的约束将是推动我国城市向绿色发展方式转型的重要契机。

本指南介绍了城市尺度大气污染物和碳排放清单的统一编制方法，建立了 2016 年全国工业点源数据库以及全国城市大气污染物和二氧化碳的排放清单。结合城市产业结构、经济发展水平等信息，本指南将全国地级城市分为了能源生产型、轻工业型、重工业型、高新技术型、服务业型、农业型和前工业化型七种类型，分析了各类型城市的特征并提出了重点部门的协同减排政策建议。本指南的结论和建议主要有以下几点：

1. 我国目前处于空气质量目标为导向的减排阶段，随着末端治理空间逐渐压缩，空气质量目标的实现最终依赖于深度结构调整带来的化石燃料使用量的削减。空气污染物和二氧化碳存在协同减排路径，涉及减少化石燃料，尤其是煤炭使用量的相关政策都具有协同减排效益。因此，城市在制定未来减排策略时，在实施末端控制措施、快速改善空气质量的同时要加快结构调整、深挖协同减排潜力。

2. 由于城市区位、资源禀赋、发展基础上存在的差异，许多城市可能在未来较长一段时间内还将维持现有的产业结构。在空气质量目标和碳达峰目标要求下，城市一方面要优化升级传统产业，采用先进工艺降低工业能耗延长产业链、提升附加值，运用互联网、大数据、人工智能等新技术促进传统产业智能化、清洁化改造；一方面要积极深入推进供给侧结构性改革，实施创新驱动发展战略、发展多元化产业结构，培育壮大新产业、新业态、新模式等发展新动能，通过推动形成内需扩大和生态环境改善的良性循环实现经济与环境的“双赢”。

3. 分城市类型来看，农业型和前工业化型城市工业

化程度较低，如果处于限制开发地区，可根据生态区位优势重点关注农业或旅游业的低碳清洁发展；处于可开发地区的城市则应当做好低碳发展规划，实现绿色工业化进程。能源生产型、重工业型和轻工业城市应积极推广先进工艺、深挖产品附加值，重点消除碳密集型生产过程，在优化升级传统产业的同时积极发展高新技术和第三产业，走新型工业化道路。能源生产型和重工业城市在工业生产过程中会涉及大量大宗货物的运输，因此应当注重货运车辆的管控以及运输方式的转变。高新技术型和服务业型城市一般具有较高的经济发展水平，能源消耗强度和排放强度已经较低，但对于人口总量大、具有较高的排放总量的城市，应当提出排放总量的控制目标；同时，在未来生活水平提高、民用和交通部门能源需求持续增长的情况下，这两类城市应重点推进民用和交通部门的节能及燃料清洁化替代，倡导简约适度、绿色低碳的生活方式，反对奢侈浪费和不合理消费。

4. 能源生产工业和重工业是所有类型的城市最重要的能源消耗部门，因此应当重点削减能源生产工业以及高耗能重工业的能源强度。各类型城市中都存在能源强度 / 碳排放强度较高的火电机组、工业锅炉和窑炉等基础设施，通过识别能源强度 / 碳排放强度较高的基础设施，指向性地进行节能改造、技术升级和落后产能淘汰，可以在近期较为快速地进行协同减排，为深度结构调整争取时间。在原有基础上提高能效到全国相似规模的装置的平均水平可以产生较为可观的碳减排效益，如果进一步考虑由于使用先进产能替代落后产能产生的末端控制装置升级，空气质量效益将会更为显著。

5. 指南评估了各项措施的协同减排潜力，可为各类型城市提供参考。但在制定综合决策时，城市还应当充分考虑资源禀赋、自身定位、所处区域整体规划和政策的成本效益来确定协同减排的工作重点，不能与实际脱节。对于处于发展过渡阶段或兼有多种类型特征的城市，应当综合参考所具有的特征相应类型的政策。

附录

附表 1 国民经济行业分类在聚类中对应的工业类别

名称	分类
煤炭开采和洗选业	能源生产
石油和天然气开采业	能源生产
黑色金属矿采选业	重工业
有色金属矿采选业	重工业
非金属矿采选业	重工业
开采辅助活动	重工业
其他采矿业	重工业
农副食品加工业	轻工业
食品制造业	轻工业
酒、饮料和精制茶制造业	轻工业
烟草制品业	轻工业
纺织业	轻工业
纺织服装、服饰业	轻工业
皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业	轻工业
木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业	轻工业
家具制造业	轻工业
造纸和纸制品业	轻工业
印刷和记录媒介复制业	轻工业
文教、工美、体育和娱乐用品制造业	轻工业
石油加工、炼焦和核燃料加工业	能源生产
化学原料和化学制品制造业	重工业
医药制造业	高新技术产业
化学纤维制造业	重工业
橡胶和塑料制品业	重工业
非金属矿物制品业	重工业
黑色金属冶炼和压延加工业	重工业
有色金属冶炼和压延加工业	重工业
金属制品业	重工业
通用设备制造业	重工业
专用设备制造业	重工业
汽车制造业	重工业
铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业	重工业
电气机械和器材制造业	高新技术产业
计算机、通信和其他电子设备制造业	高新技术产业
仪器仪表制造业	高新技术产业
其他制造业	轻工业
废弃资源综合利用业	高新技术产业
金属制品、机械和设备修理业	重工业
电力、热力生产和供应业	能源生产
燃气生产和供应业	能源生产
水的生产和供应业	重工业

附表 2 城市分类结果

类别	城市
服务业型	北京市, 天津市, 太原市, 上海市, 南京市, 杭州市, 温州市, 厦门市, 济南市, 青岛市, 武汉市, 广州市, 深圳市, 东莞市, 海口市, 三亚市, 成都市, 贵阳市, 昆明市, 拉萨市, 西安市, 兰州市
轻工业型	邢台市, 保定市, 张家口市, 呼和浩特市, 通辽市, 巴彦淖尔市, 丹东市, 辽源市, 延边朝鲜族自治州, 哈尔滨市, 牡丹江市, 宿迁市, 蚌埠市, 黄山市, 滁州市, 宿州市, 六安市, 亳州市, 莆田市, 泉州市, 漳州市, 赣州市, 吉安市, 宜春市, 抚州市, 枣庄市, 潍坊市, 济宁市, 泰安市, 日照市, 临沂市, 德州市, 聊城市, 滨州市, 开封市, 鹤壁市, 新乡市, 濮阳市, 许昌市, 漯河市, 南阳市, 商丘市, 孝感市, 咸宁市, 常德市, 张家界市, 益阳市, 汕头市, 湛江市, 梅州市, 汕尾市, 潮州市, 揭阳市, 梧州市, 防城港市, 贵港市, 泸州市, 绵阳市, 广元市, 遂宁市, 内江市, 眉山市, 宜宾市, 宜宾市, 遵义市, 黔南布依族苗族自治州, 玉溪市, 楚雄彝族自治州, 迪庆藏族自治州, 安康市, 吴忠市
重工业型	石家庄市, 唐山市, 秦皇岛市, 邯郸市, 承德市, 沧州市, 廊坊市, 衡水市, 运城市, 包头市, 赤峰市, 乌兰察布市, 阿拉善盟, 沈阳市, 鞍山市, 本溪市, 营口市, 辽阳市, 长春市, 徐州市, 盐城市, 镇江市, 宁波市, 衢州市, 舟山市, 丽水市, 马鞍山市, 铜陵市, 池州市, 宣城市, 三明市, 龙岩市, 景德镇市, 萍乡市, 新余市, 鹰潭市, 上饶市, 洛阳市, 安阳市, 焦作市, 三门峡市, 黄石市, 十堰市, 襄阳市, 鄂州市, 随州市, 株洲市, 湘潭市, 衡阳市, 郴州市, 怀化市, 娄底市, 韶关市, 肇庆市, 阳江市, 清远市, 柳州市, 玉林市, 百色市, 自贡市, 攀枝花市, 德阳市, 乐山市, 广安市, 雅安市, 资阳市, 阿坝藏族羌族自治州, 安顺市, 黔东南苗族侗族自治州, 红河哈尼族彝族自治州, 山南地区, 宝鸡市, 渭南市, 汉中市, 嘉峪关市, 金昌市, 白银市, 西宁市, 海东市, 海西蒙古族藏族自治州, 石嘴山市, 昌吉回族自治州, 博尔塔拉蒙古自治州
高新技术型	通化市, 无锡市, 常州市, 苏州市, 南通市, 连云港市, 淮安市, 扬州市, 泰州市, 嘉兴市, 湖州市, 绍兴市, 金华市, 台州市, 合肥市, 芜湖市, 福州市, 宁德市, 南昌市, 烟台市, 威海市, 郑州市, 宜昌市, 长沙市, 珠海市, 佛山市, 江门市, 惠州市, 河源市, 中山市, 南宁市, 桂林市, 重庆市
能源生产型	大同市, 阳泉市, 长治市, 晋城市, 朔州市, 晋中市, 忻州市, 临汾市, 吕梁市, 乌海市, 鄂尔多斯市, 呼伦贝尔市, 大连市, 抚顺市, 锦州市, 盘锦市, 葫芦岛市, 吉林市, 白山市, 松原市, 白城市, 鹤岗市, 双鸭山市, 大庆市, 七台河市, 淮南市, 淮北市, 安庆市, 九江市, 淄博市, 东营市, 菏泽市, 平顶山市, 荆门市, 岳阳市, 茂名市, 北海市, 六盘水市, 曲靖市, 铜川市, 咸阳市, 延安市, 榆林市, 商洛市, 酒泉市, 庆阳市, 海北藏族自治州, 银川市, 中卫市, 乌鲁木齐市, 克拉玛依市, 哈密市
农业型	兴安盟, 锡林郭勒盟, 阜新市, 铁岭市, 朝阳市, 四平市, 齐齐哈尔市, 鸡西市, 伊春市, 佳木斯市, 黑河市, 绥化市, 大兴安岭地区, 阜阳市, 南平市, 信阳市, 周口市, 驻马店市, 荆州市, 黄冈市, 恩施土家族苗族自治州, 邵阳市, 永州市, 云浮市, 钦州市, 贺州市, 来宾市, 崇左市, 三沙市, 儋州市, 南充市, 达州市, 凉山彝族自治州, 毕节市, 铜仁市, 黔西南布依族苗族自治州, 保山市, 普洱市, 临沧市, 西双版纳傣族自治州, 大理白族自治州, 德宏傣族景颇族自治州, 武威市, 张掖市, 黄南藏族自治州, 海南藏族自治州, 吐鲁番市, 巴音郭楞蒙古自治州, 阿克苏地区, 喀什地区, 伊犁哈萨克自治州, 塔城地区, 阿勒泰地区
前工业化型	湘西土家族苗族自治州, 河池市, 巴中市, 甘孜藏族自治州, 昭通市, 丽江市, 文山壮族苗族自治州, 怒江傈僳族自治州, 日喀则市, 昌都市, 林芝市, 那曲市, 阿里地区, 天水市, 平凉市, 定西市, 陇南市, 临夏回族自治州, 甘南藏族自治州, 果洛藏族自治州, 固原市, 克孜勒苏柯尔克孜自治州, 和田地区, 玉树藏族自治州

附表 3 评星表格示例

排放源分数用于衡量排放源的相对贡献，贡献越高则减排的相对重要性越大。下表展示了排放源贡献对应的分数：

排放源贡献（%）	对应分数
0	0
5	1
10	2
15	3
20	4
25	5
30	6
35	7
40	8
45	9
50	10

下表展示了某一政策的分数计算过程，最终总分被归一化到以十分为满分的分值：

物种	权重	政策评价分数	所属源的比重	排放源分数	总分
CO ₂	0.5	10	0.345	7	17
PM _{2.5}	0.167	10	0.414	8	18
SO ₂	0.167	10	0.410	8	18
NO _x	0.167	10	0.342	6	16
总分 = 0.5*（0.5×17 + 0.167×（18+18+16））= 8.592					

得到总分值后对应的星级关系如下：

总分	星级
[8,10)	★★★★★
[7,8)	★★★★☆
[6,7)	★★★★
[5,6)	★★★☆☆
[4,5)	★★★★
[3,4)	★★★☆☆
[2,3)	★★

参考资料

- Cai, W. J., Li, K., Liao, H., Wang, H. J., and Wu, L. X.: Weather conditions conducive to Beijing severe haze more frequent under climate change, *Nature Climate Change*, 7, 257–+, 2017.
- Guan, D. B., Meng, J., Reiner, D. M., Zhang, N., Shan, Y. L., Mi, Z. F., Shao, S., Liu, Z., Zhang, Q., and Davis, S. J.: Structural decline in China's CO₂ emissions through transitions in industry and energy systems, *Nature Geoscience*, 11, 551–+, 2018.
- Shan, Y., Guan, D., Hubacek, K., Zheng, B., Davis, S. J., Jia, L., and Meng, J.: City-level climate change mitigation in China, *Science advances*, 4(6), 2018.
- Peters, G. P., Le Quere, C., Andrew, R. M., Canadell, J. G., Friedlingstein, P., Ilyina, T., Jackson, R. B., Joos, F., Korsbakken, J. I., McKinley, G. A., Sitch, S., and Tans, P.: Towards real-time verification of CO₂ emissions, *Nature Climate Change*, 7, 848–850, 2017.
- Silva, R. A., West, J. J., Lamarque, J. F., Shindell, D. T., Collins, W. J., Faluvegi, G., Folberth, G. A., Horowitz, L. W., Nagashima, T., Naik, V., Rumbold, S. T., Sudo, K., Takemura, T., Bergmann, D., Cameron-Smith, P., Doherty, R. M., Josse, B., MacKenzie, I. A., Stevenson, D. S., and Zeng, G.: Future global mortality from changes in air pollution attributable to climate change, *Nature Climate Change*, 7, 647–+, 2017.
- Liu, J., Mauzerall, D. L., Chen, Q., Zhang, Q., Song, Y., and Peng, W.: Air pollutant emissions from chinese households: a major and underappreciated ambient pollution source, *Proc Natl Acad Sci U S A*, 113(28), 7756–7761, 2016.
- Liu Z, Zheng B, Zhang Q, Guan D. New dynamics of energy use and CO₂ emissions in China. *Nature*. Submitted.
- Stowell, J. D., Kim, Y. M., Gao, Y., Fu, J. S., Chang, H. H., and Liu, Y.: The impact of climate change and emissions control on future ozone levels: Implications for human health, *Environment International*, 108, 41–50, 2017.
- Wang, R., Tao, S., Wang, W., Liu, J., Shen, H., and Shen, G.: Black carbon emissions in china from 1949 to 2050. *Environmental Science & Technology*, 46(14), 7595–7603, 2012.
- Xing, J., Wang, J. D., Mathur, R., Pleim, J., Wang, S. X., Hogrefe, C., Gan, C. M., Wong, D. C., and Hao, J. M.: Unexpected Benefits of Reducing Aerosol Cooling Effects, *Environmental Science & Technology*, 50, 7527–7534, 2016.
- Zhang, Z., Wang, W., Cheng, M., Liu, S., Xu, J., and He, Y.: The contribution of residential coal combustion to PM_{2.5} pollution over china's beijing-tianjin-hebei region in winter, *Atmospheric Environment*, 159, 147–161, 2017.
- Zheng, B., Zhang, Q., Davis, S. J., Ciais, P., Hong, C., Li, M., Liu, F., Tong, D., Li, H., and He, K.: Infrastructure Shapes Differences in the Carbon Intensities of Chinese Cities, *Environ Sci Technol*, 52, 6032–6041, 2018.
- Zhou, N., Price, L., Dai, Y. D., Creyts, J., Khanna, N., Fridley, D., Lu, H. Y., Feng, W., Liu, X., Hasanbeigi, A., Tian, Z. Y., Yang, H. W., Bai, Q., Zhu, Y. Z., Xiong, H. W., Zhang, J. G., Chrisman, K., Agenbroad, J., Ke, Y., McIntosh, R., Mullaney, D., Stranger, C., Wanless, E., Wetzel, D., Yee, C., and Franconi, E.: A roadmap for China to peak carbon dioxide emissions and achieve a 20% share of non-fossil fuels in primary energy by 2030, *Applied Energy*, 239, 793–819, 2019.
- 楚春礼：中国高新技术产业能源消耗与碳排放分析，*环境污染与防治*, 33, 23–28, 2011.
- 刘新华，韩健，张楠，王晶晶：中国分散式民用供热技术现状分析，*中国科学院院刊*, 34(04):401–408, 2019.
- 生态环境部：2018 中国生态环境状况公报，2019
- 生态环境部：中国空气质量改善报告（2013–2018 年），2019
- 清华大学：城市大气污染物排放清单编制技术手册，2017
- 清华大学，能源基金会：中国如何在 2030 年实现 PM_{2.5} 空气质量全面达标？——基于能源及末端控制情景的数值模拟探讨，2017
- 清华大学建筑节能研究中心：中国建筑节能年度发展研究报告 2017, 2017
- 张义丰，张吉福，马彦平，马安全，赵晓宁，穆松林，张伟：资源型城市转型发展的绿色实践——以山西省“大同蓝”为例，*中国科学院院刊*, 32, 896–904, 2017.
- 中国清洁空气联盟：“大气十条”中煤炭总量控制政策的协同碳减排效应分析，2014.



清华大学



亚洲清洁空气中心

在亚洲清洁空气中心的支持下，清华大学贺克斌院士和张强教授团队编制了《中国城市空气质量改善和温室气体协同减排方法指南》，旨在为城市层面实现空气质量改善和温室气体协同减排提供系统性方法参考，包括统一的排放清单编制方法，基于城市经济结构、资源禀赋和主要污染源的城市归类方法。本报告根据不同类别城市的减排难度和潜力提出城市从规划层面实现协同治理和效益的相应措施，可为不同类型的城市从规划层面实现协调效益提供参考。



微信公众号



空气智库