

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响

李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕

PM_{2.5}

• 中风

PM_{2.5}控制目标
健康经济效益

• 冠心病

• 呼吸系统疾病

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年4月

第42卷 第4期
Vol.42 No.4

目次

京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析	唐倩, 郑博, 薛文博, 张强, 雷宇, 贺克斌 (1591)
珠江三角洲大气光化学氧化剂(O_3)与 $PM_{2.5}$ 复合超标污染特征及气象影响因素	颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 王伟文, 刘永林, 钟部卿, 毛敬英, 杨士士, 王雪梅, 刘焯芳 (1600)
广州市臭氧污染溯源:基于拉格朗日光化学轨迹模型的案例分析	裴成磊, 牟江山, 张英南, 申恒青, 陈玉茹, 黄杰生, 丁浩然, 李成柳 (1615)
运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析	赵清, 李杏茹, 王国选, 张兰, 杨阳, 刘永桥, 孙宁宁, 黄禹, 雷文凯, 刘新罡 (1626)
降雪后24 h内大气中多环芳烃的变化规律	范慧泽, 祝富杰, 胡鹏持, 马万里 (1636)
道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 粒度乘数的测定方法及特征	李冬, 陈建华, 张月帆, 高忠阳, 高健, 张凯, 竹双 (1642)
铸造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	高爽, 李时蓓, 伯鑫, 李厚宇, 舒木水, 谈默, 屈加豹, 雷团团 (1649)
燃煤电厂和垃圾焚烧电厂燃烧产物中卤代多环芳烃的赋存特征和毒性风险	倪秀峰, 王儒威, 蔡飞旋, 蔡家伟 (1660)
兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性	赵炜, 李杰, 谢慧娜, 张莉红, 王亚娥 (1668)
大气污染排放格局优化方法及案例	李敏辉, 廖程浩, 常树诚, 张永波, 杨柳林, 曾武涛 (1679)
$PM_{2.5}$ 污染对我国健康负担和经济损失的影响	李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕 (1688)
基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析	金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 李光耀, 张文辽, 李非里 (1696)
新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素	张杰, 周金龙, 曾妍妍, 涂治, 纪媛媛, 孙英, 雷米 (1706)
漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价	黄宏伟, 肖河, 王敦球, 席北斗, 孙晓杰, 李洁月, 李向奎 (1714)
近20年来鄱阳湖流域泛滥平原沉积物微量元素含量与污染变化	李括, 杨柯, 彭敏, 刘飞, 杨峥, 赵传冬, 成杭新 (1724)
汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义	刘鑫, 向伟, 司炳成 (1739)
会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析	李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松 (1750)
贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算	曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪 (1761)
辽宁典型海域表层海水中在用化学农药浓度水平与潜在生态风险	杜静, 胡超魁, 解怀君, 田甲申, 李爱, 谢晴, 吴金浩, 宋伦 (1772)
辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源	韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 陆安祥, 殷敬伟, 田佳宇 (1781)
津冀辽地区典型湖库沉积物PAHs污染特征及来源解析	吴鹏, 鲁逸人, 李慧, 郑天娇子, 程云轩, 焦立新 (1791)
环太湖河流及湖体中有机磷酸酯的污染特征和风险评价	张文萍, 张振飞, 郭昌胜, 吕佳佩, 邓洋慧, 张恒, 徐建 (1801)
太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价	丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 石溪哲, 邹华, 史红星 (1811)
淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价	程云轩, 高秋生, 李捷, 李慧, 吴鹏, 焦立新 (1820)
三亚河沉积物PAHs和PCBs的分布、来源及风险评价	詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 董滨, 张领军, 黄远东 (1830)
三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析	李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 褚琳, 李朝霞 (1839)
反硝化细菌、硝酸钙和锆改性沸石联用对底泥中氮磷迁移转化的影响及硝态氮释放风险评估	辛慧敏, 李建伟, 詹艳慧 (1847)
锁磷剂联合好氧反硝化菌修复富营养化水体	李炳堂, 周志勤, Ravi Naidu, 胡智泉, 郭大滨, 陈嘉鑫 (1861)
太湖蓝藻胞内有机质的微生物降解	张巧颖, 孙伟, 杜瑛珣, 巩小丽 (1870)
青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析	魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 齐文华, 汪洋, 赵彬洁, 谭香, 张全发 (1879)
基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源	何杰, 朱学惠, 魏彬, 李学艳, 汤如涛, 林欣, 周飞, 司壮壮 (1889)
老化前后轮胎磨损微粒与聚氯乙烯微粒对抗生素的吸附-解吸行为	范秀磊, 邹峰峰, 刘加强, 李莹, 刘强, 侯俊 (1901)
磁性铁基改性生物炭去除水中氨氮	王芳君, 桑倩倩, 邓颖, 赵元添, 杨娅, 陈永志, 马娟 (1913)
城市污水处理厂进水氨氧化菌对活性污泥系统的季节性影响	于莉芳, 汪宇, 滑思思, 李韧, 张兴秀, 惠晓飞 (1923)
基于粒径分化的厌氧氨氧化污泥性能与微生物多样性分析	王晓瞳, 杨宏 (1930)
ClO_2 消毒工艺对污水处理厂出水超级耐药基因的影响	程春燕, 李海北, 梁永兵, 师丹阳, 陈郑珊, 杨栋, 焦巧瑞, 邵一帆, 李君文, 金敏 (1939)
微塑料PES与2,4-DCP复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响	林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 黄嫒, 邓雪, 林香凤, 黄尊, 魏佳林 (1946)
城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价	李娟, 李金香, 杨妍妍 (1956)
气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响	王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 李世强, 柴迅 (1967)
沼液秸秆联用对滨海围垦田土壤重金属迁移及形态变化的影响	王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚 (1979)
地块尺度城市土地质量地球化学调查方法:以雄安新区起步区为例	周亚龙, 郭志娟, 刘飞, 韩伟, 孔牧, 赵传冬, 刘爱涛, 彭敏, 王乔林, 王成文 (1989)
雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析	周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟 (2003)
地质背景农田土壤下不同水稻品种对Cd的累积特征及影响因素	代子雯, 方成, 孙斌, 魏志敏, 胡锋, 李辉信, 徐莉 (2016)
不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响	刘杨, 齐明星, 王敏, 刘娜娜, Pornpimol Kleawsampanjai, 周菲, 翟辉, 王梦柯, 任蕊, 梁东丽 (2024)
影响不同农作物镉富集系数的土壤因素	陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯 (2031)
Cd胁迫下不同外源植物激素对水稻幼苗抗氧化系统及Cd吸收积累的影响	张盛楠, 黄益宗, 李颜, 保琼莉, 黄永春 (2040)
不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响	李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 赵秀兰 (2047)
铜尾矿坝及其周边土壤真菌群落结构与功能多样性	陈建文, 张红, 李君剑, 刘勇 (2056)
微生物群落驱动AM真菌、生物炭及联合改良沙化土壤作用潜力	张哲超, 杨久扬, 郝百惠, 郝利君, 罗俊清, 李雪, 刁风伟, 张璟霞, 郭伟 (2066)
动物粪便施肥措施促进耐药基因在粪便-土壤-蔬菜之间的散播	张红娜, 董梦洁, 周玉法, 孙佳欣, 常美洁, 翟真真 (2080)
区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用	万炳彤, 鲍学英, 赵建昌, 李爱春 (2089)
《环境科学》征订启事(1738) 《环境科学》征稿简则(1790) 信息(1860, 1878, 1900)	

大气污染排放格局优化方法及案例

李敏辉^{1,2,3}, 廖程浩^{1,2,3*}, 常树诚^{1,2,3}, 张永波^{1,2,3}, 杨柳林^{1,2,3}, 曾武涛^{1,2,3}

(1. 广东省环境科学研究院, 广州 510045; 2. 广东省区域大气环境质量科学研究中心, 广州 510045; 3. 广东省环境保护大气环境管理与政策模拟重点实验室, 广州 510045)

摘要: 目前改善空气质量的方法包括末端治理、产业结构调整、能源结构调整以及交通结构调整等, 鲜见大气排放空间格局优化的方法。因此, 本研究团队基于自然环境、人体健康、污染物传输能力和气象扩散条件等多种因素, 使用阈值、自然间断点分级和空间擦除等方法划定大气环境布局适宜区; 并据此优化调整大气排放格局, 实现空气质量改善; 再以广东省为例, 校验空气质量改善效益以及探讨大气环境分区对排放格局优化的引导应用。结果表明, 广东省环境空气质量一类区面积占全省9%; 人口密集区占3%; 国控站点敏感区占15%; 污染物积聚区占22%; 大气环境布局适宜区占60%, 主要分布在粤西。通过推动广东省非火电工业源移入大气环境布局适宜区, 可以使全省 $PM_{2.5}$ 平均改善4%, 城市最大改善10%。排放格局优化是空气质量持续改善方法中的一种创新性辅助支撑技术, 在实际应用中, 可以结合能源与产业结构调整、污染控制技术提升和跨区域联防联控, 综合制定最可行的空气质量改善方案。

关键词: 大气环境; 排放格局; 分区管控; 空气质量模拟; 广东省

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)04-1679-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007250

Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern

LI Min-hui^{1,2,3}, LIAO Cheng-hao^{1,2,3*}, CHANG Shu-cheng^{1,2,3}, ZHANG Yong-bo^{1,2,3}, YANG Liu-lin^{1,2,3}, ZENG Wu-tao^{1,2,3}

(1. Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou 510045, China; 2. Guangdong Provincial Regional Atmospheric Environmental Quality Research Center, Guangzhou 510045, China; 3. Guangdong Provincial Environmental Protection Key Laboratory of Atmospheric Environment Management and Policy Simulation, Guangzhou 510045, China)

Abstract: Few of the current methods of improving air quality, including end-pipe treatment, industrial, energy and transportation structure adjustments, are from the viewpoint of the spatial pattern optimization of pollutant emissions. Therefore, based on factors such as natural environment, human health, pollutant transmission capability, and meteorological diffusion conditions, our research group used the threshold approach, natural breaks, spatial erasure, and other methods to define the layout area suitable for atmospheric pollution sources. Based on these results, the emissions pattern was optimized to achieve air quality improvement. Taking Guangdong Province as an example, we examined the application of the emissions pattern optimization of air quality improvement and atmospheric environment zoning. The results indicate that the first class area of environmental air quality accounts for 9% of total province area, the densely populated area accounts for 3%, the sensitive area of the national air quality monitor stations accounts for 15%, the pollutant accumulation area accounts for 22%, and the layout area suitable for atmospheric pollution sources primarily distributed in the west part of the province accounts for 60%. By shifting the non-thermal power industrial sources into those area, the concentration level of $PM_{2.5}$ will decrease by 4% at the provincial scale and 10% at the city scale. Emissions pattern optimization has become an innovative aided support technology for the continuous improvement of air quality. In practical applications, it can be combined with energy and industrial structure adjustments, pollution control technology enhancements, and cross-regional prevention and control to formulate the most feasible air quality improvement plan.

Key words: atmospheric environment; emission spatial pattern; subarea management; air quality simulation; Guangdong Province

随着多种管控措施的出台,我国 $PM_{2.5}$ 污染得到缓减^[1,2], 尤其体现在京津冀^[3]、长三角^[4]以及珠三角^[5]等重点区域。与此同时, 空气质量进一步改善的代价在不断提高^[6~9], 开展中长期空气质量改善的新技术方法研究, 已势在必行。

近年来, 空气质量改善的方法研究主要集中在末端治理^[10~12]、产业结构调整^[13~15]、能源结构调整^[16~18]及交通结构调整^[19~21]等方面, 鲜见关于污染排放空间格局调整的技术方法。目前与空间格局调整相关的研究成果主要总结为2类: 一是行政管理类, 即将具备明确管理归属的区域通过行政手段

赋予大气环境管理职能; 如, 20世纪90年代美国建立臭氧传输委员会^[22,23], 明确指出 O_3 未达标的州要强制执行控制措施, 并为这些州划分臭氧前体物控制区域, 实现以州为基本单元的空间管控; 欧美国也同样在20世纪初, 以各成员国或州为基本单位, 实施差异化的空气质量标准及改善要求^[24~26]; 我国从20世纪90年代开始通过制定空

收稿日期: 2020-07-27; 修订日期: 2020-09-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0213906)

作者简介: 李敏辉(1990~), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为大气环境数值模拟, E-mail: minhuili_gd@foxmail.com

* 通信作者, E-mail: liaochenghao@foxmail.com

气质量标准与区域性空气质量目标等方式实施分区管控^[27,28];这类措施虽然管理责任明确,可执行性较高,但是管理精度差,难以实现高于城市尺度的精细化管控.二是功能分区类,即通过对环境要素构建可量化指标,为区域空间赋予环境管理属性;如,空气质量功能区划^[29]、生态保护红线^[30]、大气环境红线^[31]和环境功能分区^[32~35]等就是通过评估人口、气象条件和扩散能力等环境相关要素建立空间管控信息;该类方法科学性较强且管控精度高,但缺乏空气质量改善效益的验证,难以界定功能分区的实用性.

本文立足功能分区类研究,创新性地提出一种优化大气排放格局,实现空气质量改善的技术方法,并以广东省为例,分析验证排放格局优化对空气质量的改善效益,探讨大气环境分区对排放格局优化的引导应用.

1 材料与方法

1.1 技术方法设计

大气污染排放格局的优化方法主要分三块内容:一是划定大气环境布局适宜区,二是调整大气污染排放的空间格局,三是验证调整后的排放情景对空气质量的改善.具体实现步骤如图1所示,首先是划定大气环境布局适宜区,即通过扣除目标区域的不宜布局因素获得,包括利用空气质量功能区划识别的环境空气质量一类区,使用遥感卫星数据结合统计年鉴校正的人口密集区,使用空气质量模型以及扩散模型结合阈值分级评价方法识别的污染物积聚区与国控站点敏感区.然后,依据布局适宜区调整大气污染源排放清单的空间格局.最后再使用空气质量模型模拟排放清单调整前后的污染物浓度变

化,以此验证排放格局优化的效益以及大气环境分区划定的合理性.

1.2 大气环境布局适宜区识别方法

将研究区域从空间上擦除所识别的不适宜布局区域,剩余区域即为大气环境布局适宜区.可表示为:

$$\vec{B} = \vec{A} - \sum_{i=1}^n f_i(\vec{x}_i)$$

式中, $\vec{B}$ 为大气环境布局适宜区, $\vec{A}$ 为研究区域, $f_i(\vec{x}_i)$ 表示所识别的第*i*个不适宜污染源布局的分区, $\vec{x}_i$ 为第*i*分区的划定阈值.本研究中*n*为4,不适宜布局区域分别为环境空气质量一类区、人口密集区、国控站点敏感区及污染物积聚区.式中的减法运算为空间向量的擦除.

空间向量擦除方式如图2所示,研究区域擦除所识别的不适宜布局区域时,若不适宜布局的分区在空间上有重叠,则扣除的是各分区的并集,不会重复扣除重叠区域.

1.2.1 环境空气质量一类区识别方法

环境空气质量一类区即是大气环境中需优先保护的区域,最直接的数据来源是各城市已划定的环境空气质量一类功能区.其次,可以使用土地利用数据中的自然保护区与风景名胜区等作为备选划定依据.

1.2.2 人口密集区识别方法

人口密集区是人口数量多且分布集中的区域,该区域多为城市建成区,不适合工业项目布局.建议使用表征人口密度的矢量数据作为划定依据,使用土地利用数据中的城镇区域作为备选补充.人口密度矢量图层的一般制作方式是利用DMSP/OLS遥感夜间灯光密度,反演人口密度分布^[36],再使用统

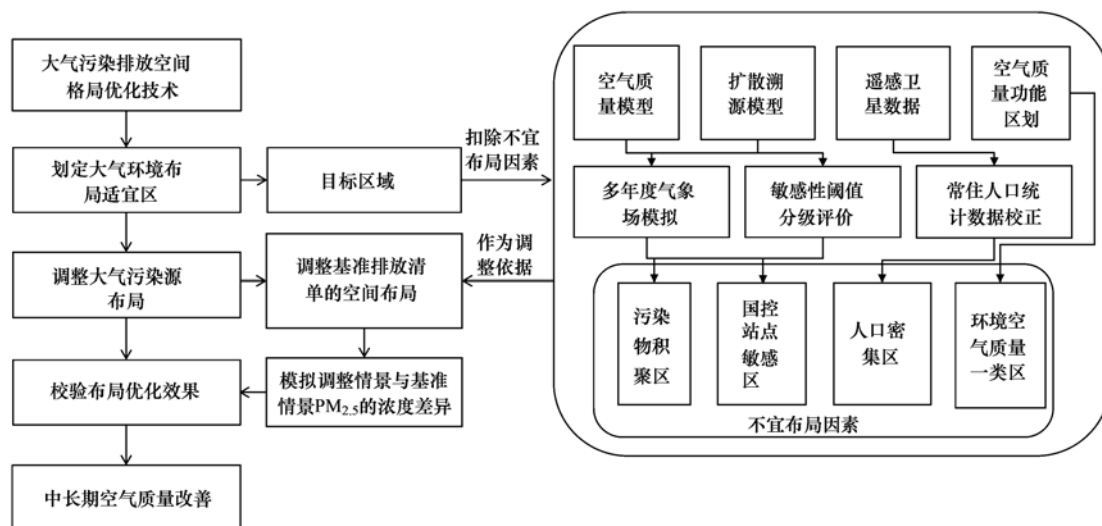


图1 研究技术路线

Fig. 1 Technology route of research

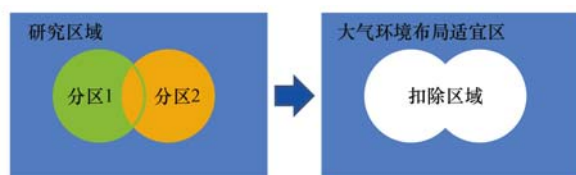


图2 空间擦除运算示例

Fig. 2 Example of spatial erasing

计年鉴中的常住人口数据对反演结果作区域人口总量校正获得. 但识别人口密集区还需要合理选择密度阈值作为划分界线. 阈值的选择应根据研究区域内人口总数以及分布特征是否符合城市建成区分布等作为参考依据.

1.2.3 国控站点敏感区识别方法

国控站点敏感区是指对空气质量国控监测站点污染传输贡献较大的区域, 该区域的识别需要使用 WRF-CALPUFF 模拟工具^[37,38]辅助完成. 模拟网格建立后, 以国控监测站点所在的网格作为受体点, 单次的模拟需以单一网格恒定源强排放作为输入, 并循环模拟遍历全部网格. 恒定源强可以使用大气污染源排放清单的平均值, 确保源强强度处于合理范围. 逐网格模拟结果全部叠加后, 即得每个网格对受体点的污染传输贡献. 建议做多年度模拟, 以平均值降低气象波动对区域识别带来的不确定性. 为便于划定国控站点敏感区, 将模拟结果归一化处理, 以所有网格的平均浓度作为基准, 计算各网格相对平均值的比值, 该比值称为传输敏感性, 敏感性越高传输贡献越大. 划定国控站点敏感区的阈值选择, 可参考国土空间规划双评价法里常用的自然间断点分级法 (natural breaks)^[39], 对传输敏感性分为 5 个档次, 选择较高及高的档次.

1.2.4 污染物积聚区识别方法

污染物积聚区是指大气污染物容易积聚的区域, 该区域的识别需要使用 WRF-CMAQ 模拟工具^[40,41]. 污染源数据需要处理成全网格相等排放量, 可利用大气污染源排放清单取平均值, 以保障排放水平较为合理. 建议做多年度模拟, 并把结果取平均以降低气象变化对分区识别的干扰. 为便于识别污染物积聚区, 将模拟结果归一化处理, 把各网格浓度相对全域平均值的比值称为污染物积聚敏感性, 敏感性越高表示越容易发生污染物积聚. 划定污染物积聚区的阈值选择, 可使用自然间断点分级法把污染物积聚敏感性分 5 个档次, 选择较高及高的档次.

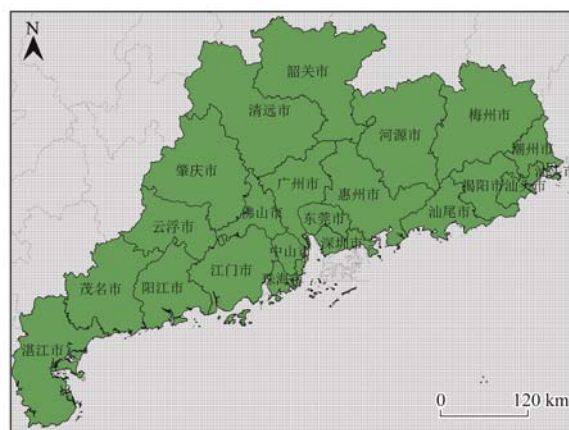
1.3 大气排放格局优化及改善成效验证方法

大气排放格局的优化是调整污染源的空间布局, 即将污染源迁移至同城市临近的大气环境布局

适宜区内, 该迁移可表征为大气污染源排放清单中布局适宜区外的排放量置 0, 再将置 0 的量按地域属性取平均值, 放置在对应地域范围的布局适宜区内. 通过 WRF-CMAQ 模拟比较调整前后的大气污染源排放清单, 在同一气象、初始和边界场条件下的污染物浓度变化, 以验证是否有改善效益.

1.4 空气质量模拟体系参数设置

WRF (weather research and forecasting model) v3. 7.1 模式使用 Morrison 微物理方案, Pleim-Xiu 近地面方案以及 ACM2 边界层方案; CMAQ (community multiscale air quality) v5.0.2 的气相化学机制使用 CB05, 气溶胶化学机制使用 AE6; CALPUFF 模式使用纯扩散传输机制. 模拟体系采用三重嵌套网格, 投影方式使用 Lambert 正形投影, 中心经纬度为 114°E、28.5°N, 两条真纬线为 15°N、40°N. 第一层网格的分辨率为 27 km × 27 km, 包括整个中国和东南亚等地区, 第二层网格的分辨率为 9 km × 9 km, 范围囊括华南地区, 第三层网格的分辨率为 3 km × 3 km, 范围包括广东省地区及周边城市, 为本研究的目标区域 (见图 3). 垂直分辨率为 23 层, 模拟结果取近地层. 第一、第二层网格使用的大气污染源排放清单为清华大学 MEIC 模型团队开发的 2016 年 0.25° × 0.25° MEIC 清单 (multi-resolution emission inventory for China), 第三层区域使用项目组自主研发的 2017 年 3 km × 3 km 的大气污染源排放清单, 自然源使用 MEGANv2.10 制作.



绿色为广东省模拟区域, 灰色网格为省外模拟区域;

图内界线不作为权属争议依据, 下同

图3 第三层模拟研究区域

Fig. 3 Third layer of simulation research area

2 结果与讨论

2.1 大气环境分区结果

2.1.1 环境空气质量一类区

本研究中环境空气质量一类区的识别, 使用了广东省各城市公布的空气质量功能区划中的一类功

能区,通过 ARCGIS 矢量化合并,直接划定为环境空气质量一类区.结果如图 4 所示,该区域的属性为自然保护区与风景名胜等需保护区域,从功能定义上应禁止建设工业项目.划定的面积约占广东省陆域面积 9%,其中分布在粤北的最为广阔,占全省陆域面积 4%,其次是珠三角占 3%.



图 4 广东省环境空气质量一类区

Fig. 4 First class area of environmental air quality in Guangdong Province

2.1.2 人口密集区

根据城市夜间灯光指数反演广东省人口分布,使用 2017 年统计年鉴的常住人口数据作线性校正,即分城市按比例校正网格数据,使其加和等于统计年鉴的城市人口总数,并以单位面积人口作为人口密度表征.考虑广东省人口实际情况,本研究主要参考国内学者对高密度城镇人口集中区域的相关分析^[42,43],以 $4\,000\text{人}\cdot\text{km}^{-2}$ 作为阈值.所得结果如图 5 所示,人口密集区占全省陆域面积约 3%.将划定的

人口密集区与城市建成区作校对比较,两者空间分布特征相近,可认为划定结果较为合理.人口集中区域位于珠三角与粤东城市,粤北城市人口分布相对稀疏.

2.1.3 国控站点敏感区

国控站点敏感区定位为污染传输的敏感区域,传输贡献又以工业源更为突出.对广东省工业源这类以工业锅炉为主的大气污染源, SO_2 的排放更具代表性,因此 CALPUFF 模拟的表征物种选择 SO_2 ,源强使用 2017 年广东省大气污染工业源 SO_2 排放的均值.受体点为广东省各空气质量国控监测站点所在的网格,气象场使用了 2016~2018 年这 3 个年度.模拟结果处理成传输敏感性指标后,使用 ARCGIS 工具以自然间断点分级法将敏感性从高至低划分为 5 个档次,并在此基础上对断点数值进行规整,结果为高 (≥ 2)、较高 ($1.2 \sim 2$)、一般 ($0.8 \sim 1.2$)、较低 ($0.4 \sim 0.8$) 和低 (≤ 0.4) 这 5 个档次.国控站点敏感性评价结果如图 6 所示,基本以珠三角城市敏感性更高,这与受体点在珠三角城市更密集的分布特征相符合.为尽可能保留全省的敏感性分布特征,又兼顾不同片区的城市之间国控站点敏感区面积比例的平衡性,云浮、江门及湛江取一般档次,其余城市以较高和高档次划定.国控站点敏感区大多在珠三角城市,占全省陆域面积 15%.

2.1.4 污染物积聚区

污染物积聚区定位为污染物易积聚的区域,且本研究技术方法期望应用于 $\text{PM}_{2.5}$ 的空气质量改善,因此具备较完善化学反应机制的 CMAQ 模型选择

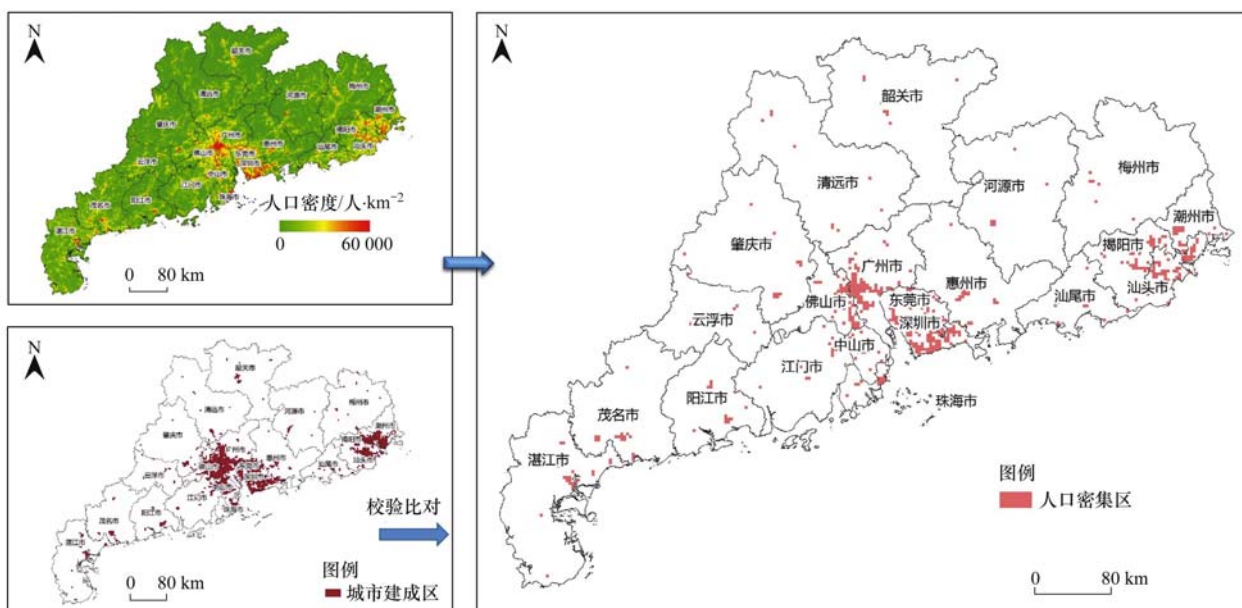


图 5 广东省人口密集区

Fig. 5 Densely populated area of Guangdong Province

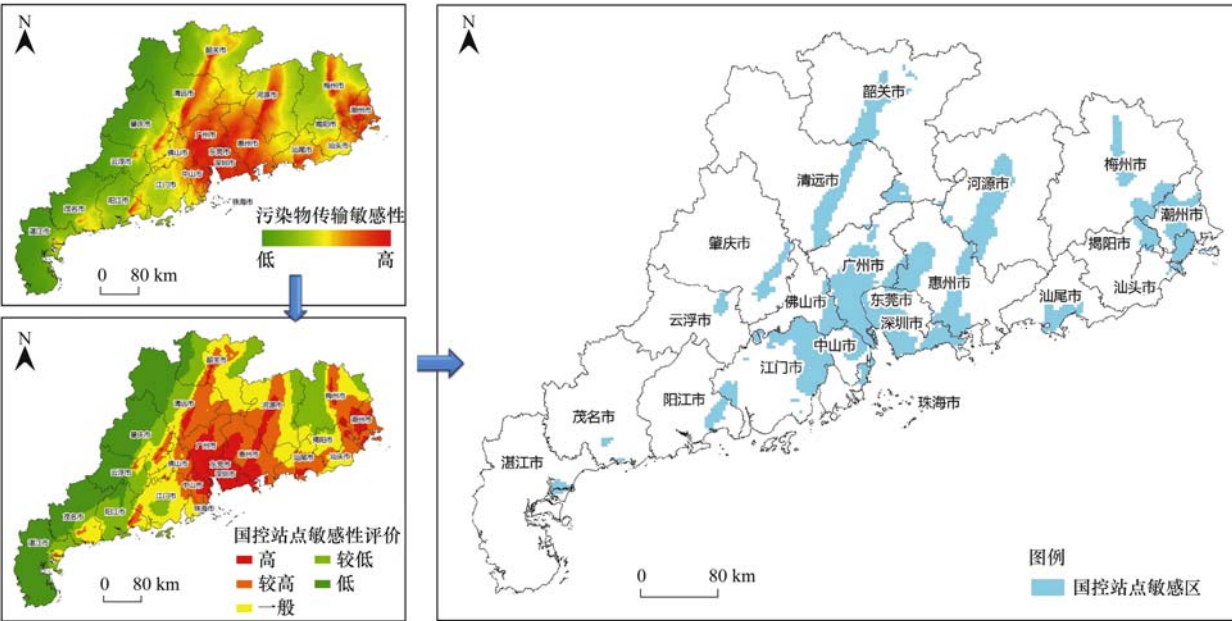


图6 广东省国控站点敏感区

Fig. 6 Sensitive area of the national air quality monitor stations of Guangdong Province

以PM_{2.5}作为表征物种,气象场使用WRF模拟的2016~2018年气象结果.将模拟结果处理成污染物积聚敏感性后,使用自然间断点分级法将敏感性从高至低划分为5个档次,并对断点数值进行规整,结果为高(≥1.3)、较高(1.1~1.3)、一般(0.9~1.1)、较低(0.7~0.9)和低(≤0.7)这5个档次.同样地,为尽可能保留全省污染物积聚敏感性的分布特征,又兼顾各片区城市的分区面积占比的平衡性,除揭阳、汕尾、深圳、汕头和潮州这5个临海城市选择一般档次外,其余城市以较高及高这两个档次选择阈值.结果如图7所示,广东省中部和北部更易使

污染物积聚,沿海地带扩散条件更好,这与广东北部山区地形以及沿海受季风影响等情况相符,污染物积聚区面积约占全省陆域面积的22%.

2.1.5 大气环境布局适宜区

通过ARCGIS工具,经过空间擦除方法将广东省陆域空间扣除环境空气质量一类区、人口密集区、国控站点敏感区和污染物积聚区,获得大气环境布局适宜区(见图8),面积约占全省60%,大都分布在广东省东西两翼及北部山区.

各城市布局适宜区的面积占比统计结果如图9所示,珠三角城市布局适宜区面积比重在全省各片

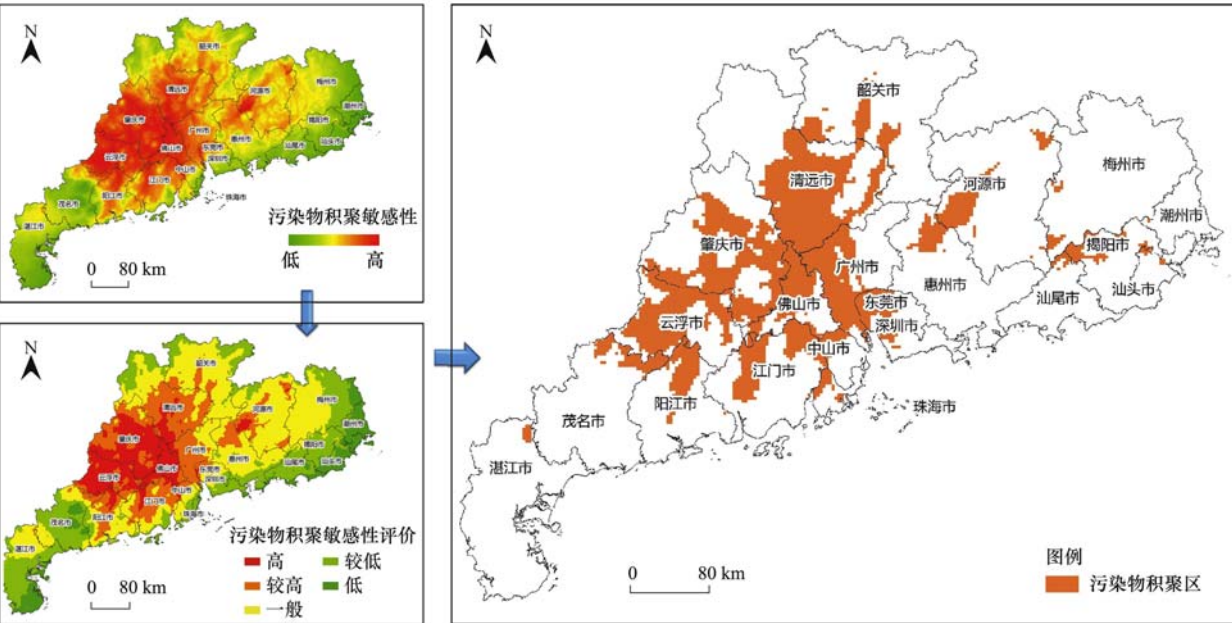


图7 广东省污染物积聚区

Fig. 7 Pollutant accumulation area of Guangdong Province



图8 广东省大气环境布局适宜区

Fig. 8 Layout area suitable for atmospheric pollution sources of Guangdong Province

区中最小,珠三角9市平均约33%;粤西的面积比重最大,粤西3市平均约78%;粤东与粤北大致相等,平均约60%.珠三角的布局适宜区明显少于其他片区,与其属于广东省人口中心和高度城镇化的特征相符.

2.2 排放格局优化与应用导向

2.2.1 大气污染排放格局优化调整及成果校验

本研究的大气排放格局优化是以2017年广东省大气污染源排放作为基准,根据大气环境布局适宜区结果调整基准排放格局.考虑实际操作中调整各类污染源的可行性及必要性,选择非火电工业源作为优化调整的基础,其余移动源、农业源、扬尘源等污染源的调整潜力较低,本研究中暂不考虑.

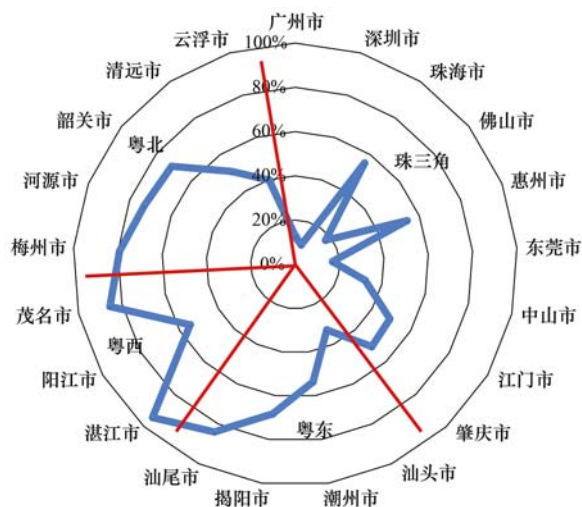


图9 大气环境布局适宜区占各城市面积比重

Fig. 9 Proportion of layout area suitable for atmospheric pollution sources in each city

将调整前后的排放清单作为 WRF-CAMQ 的输入,使用2017年气象场,比较调整前后各城市 $PM_{2.5}$ 季均以及年均浓度变化,其中城市 $PM_{2.5}$ 浓度值由该城市国控站点所在网格的 $PM_{2.5}$ 平均值表征,季度值由1、4、7和10月分别表征冬、春、夏和秋季,年均值则为这4个月平均.由于排放格局调整前后的比较属于同体系之间的运算,仅需分析比较相对改善趋势,因此未对 WRF-CAMQ 的基准排放情景做准确性校验.

不同季节下的模拟结果如图10所示,季节变化对 $PM_{2.5}$ 的改善效益存在差异.其中, $PM_{2.5}$ 在冬季的

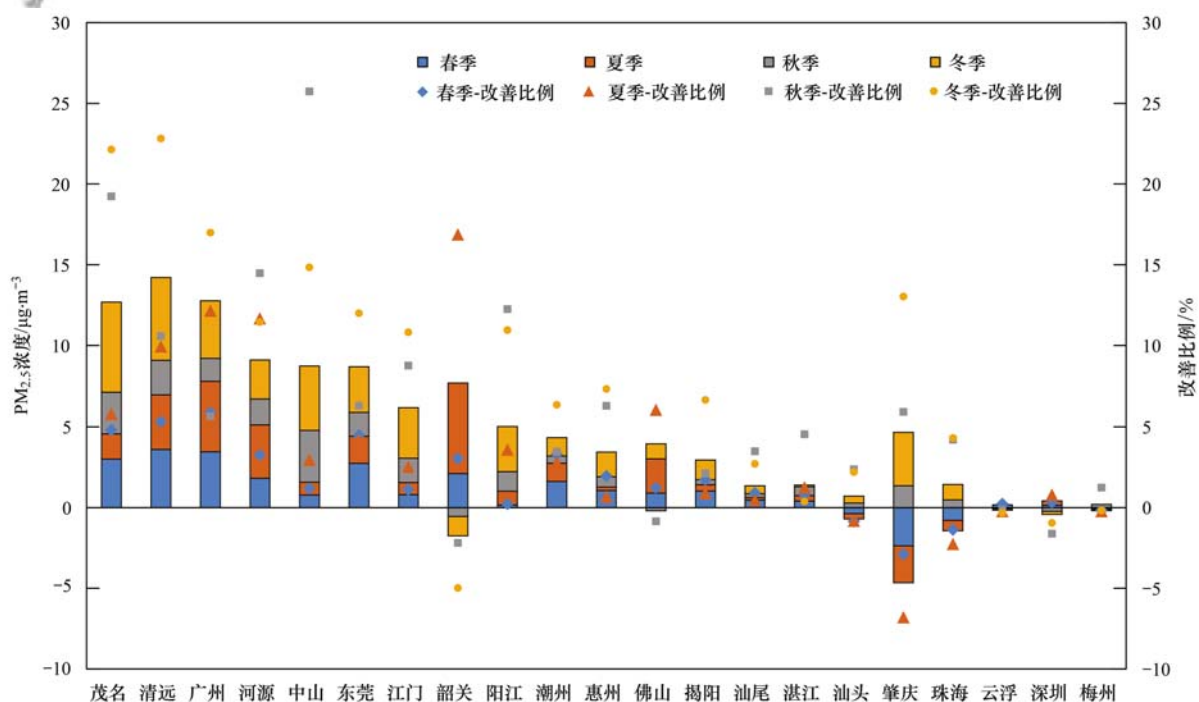
图10 不同季度下广东省大气环境布局适宜区 $PM_{2.5}$ 改善情景验证

Fig. 10 Seasonal $PM_{2.5}$ verification scenario of layout area suitable for atmospheric pollution sources in Guangdong Province

改善最为明显,全省平均改善约 8%;其次为秋季,改善幅度平均约 6%.此外,不同城市在不同季节中的改善效益有较大差距.韶关、汕头、肇庆和珠海在个别季节上存在较为明显的负效益,又以夏季最为突出,最高达 7%.这可能由于不同季节的气象条件对个别城市的污染扩散影响突出,而该城市的布局适宜区有较大范围位于季风性输送通道之间,受季节影响显著.这也揭示了可以在目前技术方法基础上,为不适宜布局因素再添加季节变化影响研究,精

细化筛选布局适宜区,进一步排除易受气象变化影响区域,提高整体改善效益.

PM_{2.5}年均值比较结果如图 11 所示,其改善效益波动幅度相比于季节性结果更为稳定.通过排放格局优化,广东省 PM_{2.5}浓度平均下降 4%,各城市降幅在 0%~10%之间;其中又以茂名、清远、广州改善幅度较大,平均超过 8%.虽然各城市空气质量改善幅度存在差异,个别城市 PM_{2.5}浓度无明显下降,但从区域层面上空气质量能得到改善.

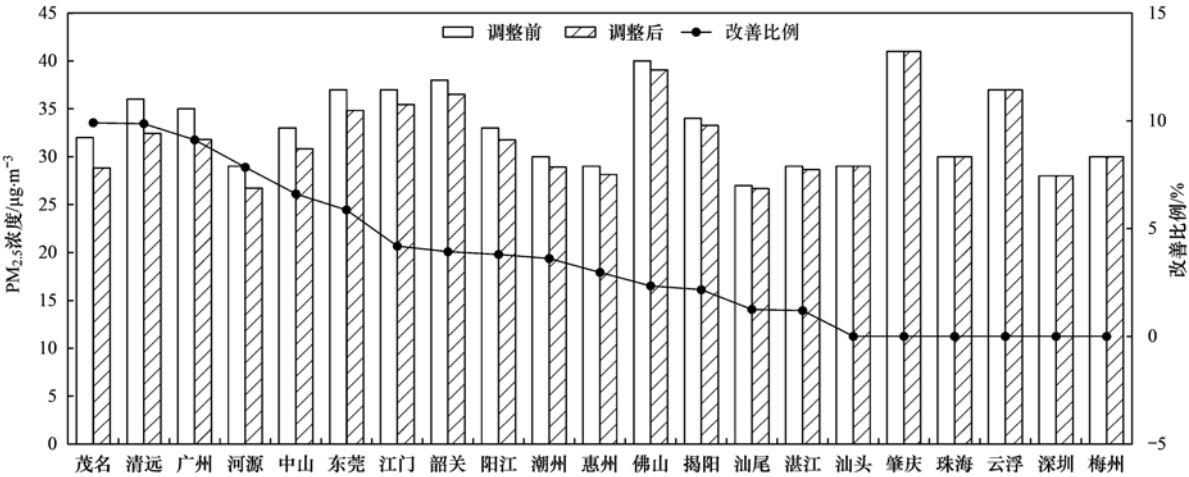


图 11 广东省大气环境布局适宜区年均 PM_{2.5}改善情景验证

Fig. 11 Annual PM_{2.5} verification scenario of layout area suitable for atmospheric pollution sources in Guangdong Province

为进一步分析大气污染排放格局优化的效益,以广东省 PM_{2.5}的年均改善效益的面状分布作探讨.结果如图 12 所示,全省正负改善效益并存,改善效益高的区域更多位于珠三角城市,以人口集中区域更为明显.该排放格局优化方法虽然在一定程度上改善了人居环境与空气质量,但正负改善效益交织的面状分布也说明了该方法在实际应用中应作为空气质量改善的一种辅助性技术方法,需结合能源调整、产业优化以及末端治理等多种减排手段,共同服务于全面的空气质量改善.

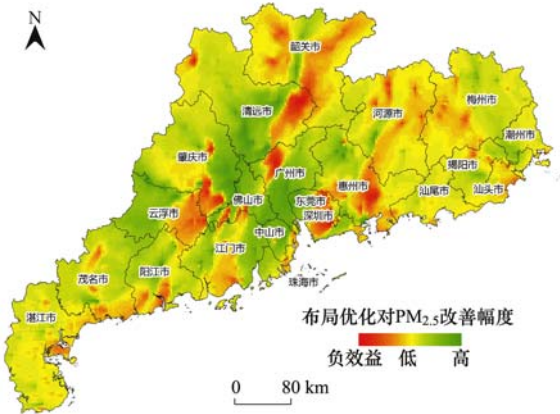


图 12 大气污染排放格局优化对 PM_{2.5}改善效益

Fig. 12 PM_{2.5} reduction effect by emissions spatial optimization

2.2.2 大气环境分区对排放格局优化的应用导向

大气排放格局优化后的改善效益验证了广东省大气环境分区划定的合理性.按目前划定的大气环境分区类型,可以在空间管理层面差异化引导广东省大气污染排放格局的逐步优化.

一是环境空气质量一类区,该区域从功能定位是自然保护区和风景名胜区,应实施严格保护,禁止新建及扩建大气污染物排放工业项目,搬迁已建项目至大气环境布局适宜区.

二是人口密集区,该区域为城市建成区等人口稠密地区,应以保护人群健康为主,限制钢铁、石化、高 VOCs 排放及产生有毒有害气体等项目的开发建设,引导现有该类项目逐步搬迁至大气环境布局适宜区.

三是国控站点敏感区,属于大气污染物排放对城市空气质量传输影响较为显著的区域;应着重限制高架源类型等易于污染传输的项目建设,如火电、钢铁、石化和水泥等项目,并引导该类项目的迁离.

四是污染物积聚区,区域内大气扩散条件较其他区域差,大气污染物容易积聚,应严格控制高污染、高排放项目以及面状类工业源项目的建设,引导原有项目迁离.

五是大气环境布局适宜区,该区域定位是适宜大气污染源布局的区域,可承接大气污染排放项目的落地,应加快区域内配套基础设施的建设,鼓励新建项目布局其中。

由于本研究的大气环境布局适宜区未考虑经济水平、基础配套设施、人力成本、交通运输和地形地貌等非大气环境的布局影响因素,对污染源布局引导缺乏精准定位,需在后续研究中深入分析,提高大气环境布局适宜区的实用性。

3 结论

(1)本研究创新性地提出大气污染排放格局优化的技术方法,以广东省为研究示例,识别了环境空气质量一类区、人口密集区、国控站点敏感区和污染物积聚区,划定了大气环境布局适宜区,并依此优化大气污染排放格局,使用数值模拟方法校验了对 $PM_{2.5}$ 的改善效益,为中长期空气质量的改善提供了科学支撑。

(2)广东省环境空气质量一类区面积占全省面积的9%,人口密集区占3%,国控站点敏感区占15%,污染物积聚区占22%;划定的大气环境布局适宜区占60%,其中分布在粤西最多,珠三角最少。

(3)依据大气环境布局适宜区优化广东省大气污染排放格局,可以实现区域层面的空气质量改善,通过调整非火电的工业源空间布局,全省 $PM_{2.5}$ 平均下降4%,城市最大改善10%,冬季改善效益最高。

(4)不同类别的大气环境分区可根据功能定位实施差异化的空间管控措施,引导排放格局的调整。环境空气质量一类区禁止工业项目建设;人口密集区禁止有毒有害气体及高污染排放相关项目建设;国控站点敏感区严格控制高架源类型项目建设;污染物积聚区限制面状类工业源项目建设;引导新增及现有大气污染排放项目落入大气环境布局适宜区。

参考文献:

- [1] Gui K, Che H Z, Wang Y Q, *et al.* Satellite-derived $PM_{2.5}$ concentration trends over Eastern China from 1998 to 2016: relationships to emissions and meteorological parameters [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **247**: 1125-1133.
- [2] Guo H, Cheng T H, Gu X F, *et al.* Assessment of $PM_{2.5}$ concentrations and exposure throughout China using ground observations [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **601-602**: 1024-1030.
- [3] Cai S Y, Wang Y J, Zhao B, *et al.* The impact of the "Air Pollution Prevention and Control Action Plan" on $PM_{2.5}$ concentrations in Jing-Jin-Ji region during 2012-2020 [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **580**: 197-209.
- [4] Shu L, Wang T J, Xie M, *et al.* Episode study of fine particle and ozone during the CAPUM-YRD over Yangtze River Delta of China: characteristics and source attribution [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **203**: 87-101.
- [5] Li J B, Zhu Y, Kelly J T, *et al.* Health benefit assessment of $PM_{2.5}$ reduction in Pearl River Delta region of China using a model-monitor data fusion approach [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **233**: 489-498.
- [6] Ciucci A, D'Elia I, Wagner F, *et al.* Cost-effective reductions of $PM_{2.5}$ concentrations and exposure in Italy [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **140**: 84-93.
- [7] Zhang B B, Wu B B, Liu J. $PM_{2.5}$ pollution-related health effects and willingness to pay for improved air quality: evidence from China's prefecture-level cities [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **273**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122876.
- [8] Wu W Q, Zhang M, Ding Y T. Exploring the effect of economic and environment factors on $PM_{2.5}$ concentration: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, **268**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110703.
- [9] Zhang N, Wu Y P, Choi Y. Is it feasible for China to enhance its air quality in terms of the efficiency and the regulatory cost of air pollution? [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **709**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136149.
- [10] Zou W X, Gao B, O Y S, *et al.* Integrated adsorption and photocatalytic degradation of volatile organic compounds (VOCs) using carbon-based nanocomposites: a critical review [J]. *Chemosphere*, 2019, **218**: 845-859.
- [11] Park J H, Ahn J W, Kim K H, *et al.* Historic and futuristic review of electron beam technology for the treatment of SO_2 and NO_x in flue gas [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, **355**: 351-366.
- [12] Chang H G, Zhu R H, Liu Z S, *et al.* Development and industrial application of catalyzer for low-temperature hydrogenation hydrolysis of Claus tail gas [J]. *Natural Gas Industry B*, 2015, **2**(4): 368-373.
- [13] Zhu F K, Zhang F R, Ke X L. Rural industrial restructuring in China's metropolitan suburbs: evidence from the land use transition of rural enterprises in suburban Beijing [J]. *Land Use Policy*, 2018, **74**: 121-129.
- [14] Liu X J, Xia S Y, Yang Y, *et al.* Spatiotemporal dynamics and impacts of socioeconomic and natural conditions on $PM_{2.5}$ in the Yangtze River Economic Belt [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114569.
- [15] Chen S M, Zhang Y, Zhang Y B, *et al.* The relationship between industrial restructuring and China's regional haze pollution: a spatial spillover perspective [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **239**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.078.
- [16] Xia F Q, Zhang X H, Cai T Y, *et al.* Identification of key industries of industrial sector with energy-related CO_2 emissions and analysis of their potential for energy conservation and emission reduction in Xinjiang, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **708**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134587.
- [17] Hu J L, Huang L, Chen M D, *et al.* Impacts of power generation on air quality in China—Part II: future scenarios [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, **121**: 115-127.
- [18] Tong D, Geng G N, Jiang K J, *et al.* Energy and emission pathways towards $PM_{2.5}$ air quality attainment in the Beijing-Tianjin-Hebei region by 2030 [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **692**: 361-370.
- [19] Zhang Q R, Tong P F, Liu M D, *et al.* A WRF-Chem model-based future vehicle emission control policy simulation and

- assessment for the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, **253**, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109751.
- [20] Wu Y, Zhang S J, Hao J M, *et al.* On-road vehicle emissions and their control in China: a review and outlook [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **574**: 332-349.
- [21] Zhang S J, Wu Y, Zhao B, *et al.* City-specific vehicle emission control strategies to achieve stringent emission reduction targets in China's Yangtze River Delta region [J]. *Journal of Environmental Science*, 2017, **51**: 75-87.
- [22] Gilliland A B, Hogrefe C, Pinder R W, *et al.* Dynamic evaluation of regional air quality models: assessing changes in O₃ stemming from changes in emissions and meteorology [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(20): 5110-5123.
- [23] Napolitano S, Stevens G, Schreifels J, *et al.* The NO_x budget trading program: a collaborative, innovative approach to solving a regional air pollution problem [J]. *The Electricity Journal*, 2007, **20**(9): 65-76.
- [24] Macpherson A J, Simon H, Langdon R, *et al.* A mixed integer programming model for National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) attainment strategy analysis [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2017, **91**: 13-27.
- [25] Viana M, Leeuw F de, Bartonova A, *et al.* Air quality mitigation in European cities: status and challenges ahead [J]. *Environment International*, 2020, **143**, doi: 10.1016/j.envint.2020.105907.
- [26] 柴发合, 王晓, 罗宏, 等. 美国与欧盟关于PM_{2.5}和臭氧的监管政策述评[J]. *环境工程技术学报*, 2013, **3**(1): 46-52.
- Chai F H, Wang X, Luo H, *et al.* Review of supervision policies of USA and European Union on PM_{2.5} and O₃ [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2013, **3**(1): 46-52.
- [27] Chen X Y, Li F, Zhang J D, *et al.* Spatiotemporal mapping and multiple driving forces identifying of PM_{2.5} variation and its joint management strategies across China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **250**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119534.
- [28] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [29] HJ/T 14-1996, 环境空气质量功能区划分原则与技术方法[S].
- [30] Guo X D, Chang Q, Liu X, *et al.* Multi-dimensional eco-land classification and management for implementing the ecological redline policy in China [J]. *Land Use Policy*, 2018, **74**: 15-31.
- [31] 薛文博, 汪艺梅, 王金南. 大气环境红线划定技术研究[J]. *环境与可持续发展*, 2014, **39**(3): 13-15.
- Xue W B, Wang Y M, Wang J N. On determining methodology of the red line of atmospheric environment [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2014, **39**(3): 13-15.
- [32] Xu K P, Wang J N, Wang J J, *et al.* Environmental function zoning for spatially differentiated environmental policies in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, **255**, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109485.
- [33] 杨柳林, 李敏辉, 廖程浩, 等. 大气环境分区管理: 以广东省为例[J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 49-56.
- Yang L L, Li M H, Liao C H, *et al.* Air quality subarea management: a case study of Guangdong province [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 49-56.
- [34] 姜昀, 王文燕, 史常艳, 等. 生态功能改善目标下的青海省“三线一单”编制实践[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(5): 1293-1299.
- Jiang Y, Wang W Y, Shi C Y, *et al.* Compilation and practice of 'three lines and one list' in Qinghai province under the objective of ecological function improvement [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(5): 1293-1299.
- [35] 成润禾, 李巍, 李天威, 等. “三线一单”纳入城市发展战略环评技术体系研究[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(12): 4772-4779.
- Cheng R H, Li W, Li T W, *et al.* Study on the technical system of integrating the requirement of three lines and one list into urban development strategic environmental assessment [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(12): 4772-4779.
- [36] Kumar P, Sajjad H, Joshi P K, *et al.* Modeling the luminous intensity of Beijing, China using DMSP-OLS night-time lights series data for estimating population density [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2019, **109**: 31-39.
- [37] Ruggeri M F, Lana N B, Altamirano J C, *et al.* Spatial distribution, patterns and source contributions of POPs in the atmosphere of Great Mendoza using the WRF/CALMET/CALPUFF modelling system [J]. *Emerging Contaminants*, 2020, **6**: 103-113.
- [38] Xu H, Zhu Y, Wang L, *et al.* Source contribution analysis of mercury deposition using an enhanced CALPUFF-Hg in the central Pearl River Delta, China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **250**: 1032-1043.
- [39] 苏鹤放, 曹根榕, 顾朝林, 等. 市县“双评价”中优势农业空间划定研究: 理论、方法和案例[J]. *自然资源学报*, 2020, **35**(8): 1839-1852.
- Su H F, Cao G R, Gu C L, *et al.* The superior agricultural space demarcation based on the evaluation of resources and environmental carrying capacity and territorial spatial development suitability at municipality and county levels: theories, methods and study of two cases [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, **35**(8): 1839-1852.
- [40] Li X K, Seth A, Zhang C R, *et al.* Evaluation of WRF-CMAQ simulated climatological mean and extremes of fine particulate matter of the United States and its correlation with climate extremes [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **222**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117181.
- [41] 李敏辉, 廖程浩, 杨柳林, 等. 基于区域传输矩阵和PM_{2.5}达标约束的大气容量计算方法[J]. *环境科学*, 2018, **39**(8): 3485-3491.
- Li M H, Liao C H, Yang L L, *et al.* Capacity simulation method based on regional transfer matrix and PM_{2.5} concentration target constraint [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(8): 3485-3491.
- [42] Song J C, Tong X Y, Wang L Z, *et al.* Monitoring finer-scale population density in urban functional zones: a remote sensing data fusion approach [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2019, **190**, doi: 10.1016/j.landurbplan.2019.05.011.
- [43] Wang L T, Wang S X, Zhou Y, *et al.* Mapping population density in China between 1990 and 2010 using remote sensing [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, **210**: 269-281.

CONTENTS

Contributors to Air Pollutant Emission Changes in Autumn and Winter in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	TANG Qian, ZHENG Bo, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (1591)
Characteristics and Meteorological Factors of Complex Nonattainment Pollution of Atmospheric Photochemical Oxidant (O_x) and $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta Region, China	YAN Feng-hua, CHEN Wei-hua, CHANG Ming, <i>et al.</i> (1600)
Source Apportionment of Ozone Pollution in Guangzhou; Case Study with the Application of Lagrangian Photochemical Trajectory Model	PEI Cheng-lei, MU Jiang-shan, ZHANG Ying-nan, <i>et al.</i> (1615)
Chemical Composition and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Yuncheng, Shanxi Province in Autumn and Winter	ZHAO Qing, LI Xing-ru, WANG Guo-xuan, <i>et al.</i> (1626)
Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall	FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, <i>et al.</i> (1636)
Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust	LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, <i>et al.</i> (1642)
Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries	GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, <i>et al.</i> (1649)
Emission Characteristics and Toxicity Effects of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Coal-Fired and Waste Incineration Power Plants	NI Xiu-feng, WANG Ru-wei, CAI Fei-xuan, <i>et al.</i> (1660)
Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Microbial Aerosol and Bacterial Community Structure During Spring in Lanzhou City, China	ZHAO Wei, LI Jie, XIE Hui-na, <i>et al.</i> (1668)
Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, <i>et al.</i> (1679)
Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China	LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1688)
Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes	JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, <i>et al.</i> (1696)
Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang	ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (1706)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water of Lijiang River Basin	HUANG Hong-wei, XIAO He, WANG Dun-qiu, <i>et al.</i> (1714)
Changes in Concentrations and Pollution Levels of Trace Elements of Floodplain Sediments of Poyang Lake Basin in Recent Twenty Years	LI Kuo, YANG Ke, PENG Min, <i>et al.</i> (1724)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Shallow Groundwater of the Fenhe River Basin and Indicative Significance	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (1739)
Major Ionic Characteristics and Factors of Karst Groundwater at Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (1750)
Hydrochemistry Characteristics and Estimation of the Dissolved Inorganic Carbon Flux in the Caohai Lake Wetland Catchment of Guizhou Province	CAO Xing-xing, WU Pan, YANG Shi-di, <i>et al.</i> (1761)
Concentration Levels and Potential Ecological Risks of Current Use Pesticides in the Surface Seawater of Typical Liaoning Sea Areas	DU Jing, HU Chao-kui, XIE Hua-jun, <i>et al.</i> (1772)
Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River Basin	HAN Li-hua, XU Li, LI Qiao-ling, <i>et al.</i> (1781)
PAHs Pollution Characteristics and Source Analysis of Typical Lake and Reservoir Sediments in Jin-Ji-Liao Area	WU Peng, LU Yi-ren, LI Hui, <i>et al.</i> (1791)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers and Water Body Around Taihu Lake	ZHANG Wen-ping, ZHANG Zhen-fei, GUO Chang-sheng, <i>et al.</i> (1801)
Spatiotemporal Distributions and Ecological Risk Assessments of Typical Antibiotics in Surface Water of Taihu Lake	DING Jian-nan, LIU Shu-jiao, ZOU Jie-ming, <i>et al.</i> (1811)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Risk Assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin	CHENG Yun-xuan, GAO Qiu-sheng, LI Jie, <i>et al.</i> (1820)
Distribution, Source, and Ecological Risk Evaluation of the PAHs and PCBs in the Sediments from Sanya River	ZHAN Yong, WEI Ting-ting, YE Hui-bin, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Change and Source Apportionment of Non-point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Loads in the Three Gorges Reservoir Area	LI Ming-long, JIA Meng-dan, SUN Tian-cheng, <i>et al.</i> (1839)
Effect of the Combined Use of Denitrifying Bacteria, Calcium Nitrate, and Zirconium-Modified Zeolite on the Mobilization of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Evaluation of Its Nitrate-Nitrogen Releasing Risk	XIN Hui-min, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (1847)
Combined Remediation of Eutrophic Water by Phoslock® and Aerobic Denitrifying Bacteria	LI Bing-tang, ZHOU Zhi-qin, Ravi Naidu, <i>et al.</i> (1861)
Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu	ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1870)
Structure Characteristics and Driving Variables of Epilithic Algae Community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau	WEI Jun-wei, LI Hong-ran, WANG Xing-zhong, <i>et al.</i> (1879)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter from Landscape River During Flood Season in Suzhou Based on EEMs and UV-vis	HE Jie, ZHU Xue-hui, WEI Bin, <i>et al.</i> (1889)
Adsorption and Desorption Behaviors of Antibiotics on TWP and PVC Particles Before and After Aging	FAN Xiu-lei, ZOU Ye-feng, LIU Jia-qiang, <i>et al.</i> (1901)
Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water	WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, <i>et al.</i> (1913)
Seasonal Effects of Influent Ammonia Oxidizing Bacteria of Municipal Wastewater Treatment Plants on Activated Sludge System	YU Li-fang, WANG Yu, HUA Si-si, <i>et al.</i> (1923)
Analysis of Performance and Microbial Diversity of ANAMMOX Sludge Based on Particle Size Differentiation	WANG Xiao-tong, YANG Hong (1930)
Effects of Chlorine Dioxide Disinfection on the Profile of the Super Antibiotic Resistance Genes in a Wastewater Treatment Plant	CHENG Chun-yan, LI Hai-bei, LIANG Yong-bing, <i>et al.</i> (1939)
Effects of PES and 2,4-DCP on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge	LIN Xu-meng, SU Cheng-yuan, WU Shu-min, <i>et al.</i> (1946)
Characteristics of Sludge and Associated Risk Assessment of Urban Sewage Treatment Plants	LI Juan, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan (1956)
Effects of Climate Warming on the Key Process and Index of Black Soil Carbon and Nitrogen Cycle During Freezing Period	WANG Zi-long, LIU Chuan-xing, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i> (1967)
Effects of Combined Application of Biogas Slurry and Straw on the Migration and Fractions of Soil Heavy Metals in Rice-wheat Rotation System in Coastal Reclamation Areas	WANG Wei, ZHOU Jun-nan, TANG Yi-fan, <i>et al.</i> (1979)
Geochemical Survey Method of Land Quality in Land Parcel Scale City: A Case Study of the Initial Area of the Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, GUO Zhi-juan, LIU Fei, <i>et al.</i> (1989)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, YANG Zhi-bin, WANG Qiao-lin, <i>et al.</i> (2003)
Cadmium Accumulation Characteristics and Impacting Factors of Different Rice Varieties Under Paddy Soils with High Geological Backgrounds	DAI Zi-wen, FANG Cheng, SUN Bin, <i>et al.</i> (2016)
Effects of Different Exogenous Selenium Species Application on Growth and Cadmium Uptake of Pak Choi in Cadmium Contaminated Soil	LIU Yang, QI Ming-xing, WANG Min, <i>et al.</i> (2024)
Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops	CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, <i>et al.</i> (2031)
Effects of Different Exogenous Plant Hormones on the Antioxidant System and Cd Absorption and Accumulation of Rice Seedlings Under Cd Stress	ZHANG Sheng-nan, HUANG Yi-zong, LI Yan, <i>et al.</i> (2040)
Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice	LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, <i>et al.</i> (2047)
Soil Fungal Community Structure and Functional Diversity in a Copper Tailing Dam and Its Surrounding Areas	CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (2056)
Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Biochar, and Combined Amendment on Sandy Soil Improvement Driven by Microbial Community	ZHANG Zhe-chao, YANG Jiu-yang, HAO Bai-hui, <i>et al.</i> (2066)
Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables	ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, <i>et al.</i> (2080)
Establishment and Application of Performance Evaluation and Obstacle Diagnosis Model for Regional Water Ecological Civilization Construction	WAN Bing-tong, BAO Xue-ying, ZHAO Jian-chang, <i>et al.</i> (2089)