

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第10期

Vol.38 No.10

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 徐家平 (3987)
卫星遥感在 NO ₂ 总量控制中的应用	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇 (3998)
京津冀城市群空气污染的模式总结与治理效果评估	王振波, 梁龙武, 林雄斌, 刘海猛 (4005)
南京北郊冬春季气溶胶数浓度变化特征分析	吴丹, 张璠, 刘刚, 吴明, 夏俊荣, 盖鑫磊, 李凤英, 杨孟 (4015)
冬季临安大气本底站气溶胶来源解析及其粒径分布特征	施双双, 王红磊, 朱彬, 林旭, 郭婷, 沙丹丹, 蒋琳, 张玉欣, 师远哲 (4024)
成都市大气颗粒物粒径分布及水溶性离子组成的季节变化特征	陶月乐, 李亲凯, 张俊, 李斯奇, 李晓东 (4034)
泉州市大气 PM _{2.5} 中水溶性离子季节变化特征及来源解析	张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 张棕巍, 许文质 (4044)
2011~2012 年北京大气 PM _{2.5} 中重金属的污染特征与来源分析	周雪明, 郑乃嘉, 李英红, 段菁春, 谭吉华, 张元勋, 贺克斌, 马永亮 (4054)
厦门海沧区 PM _{2.5} 中金属元素污染评价及来源分析	赵莉斯, 于瑞莲, 徐玲玲, 胡恭任, 吴鑫, 陈衍婷 (4061)
道路扬尘 PM _{2.5} 中金属元素污染特征及健康风险评估	张静, 张衍杰, 方小珍, 李凤华, 吴琳, 毛洪钧 (4071)
福建九仙山大气 PM ₁₀ 及部分化学组成的季节变化	魏雅, 林长城, 胡清华, 吴水平 (4077)
北京城区冬季空气污染时期 C2~C6 碳氢化合物含量特征	李月, 魏巍, 杨干, 陈东升, 程水源, 韩力慧 (4084)
2016 年北京市春节大气颗粒物污染特征激光雷达监测分析	石琳琳, 李令军, 李倩, 姜磊, 周一鸣, 李云婷, 刘保献, 张大伟 (4092)
廊坊市夏季臭氧体积分数影响因素及生成敏感性	李磊, 赵玉梅, 王旭光, 刘炜, 佟洁, 宋丽芸, 李怀瑞, 王清川 (4100)
人类活动对漓江地表水体水-岩作用的影响	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (4108)
岩溶区水库冬季溶解有机质组成特征及来源:以桂林五里峡水库为例	卢晓斌, 彭文杰, 李强, 房君佳, 靳振江, 宋昂, 黄炳惠, 于爽 (4120)
岩溶关键带微量元素运移的时空变化:以豫西鸡冠洞为例	梁沙, 杨琰, 张娜, 孙喆, 张萍, 田宁, 凌新有, 任小敏 (4130)
龟石水库夏季富营养化状况与蓝藻水华暴发特征	苟婷, 马千里, 王振兴, 王丽, 姚玲爱, 许振成, 赵学敏, 梁荣昌, 蓝郁 (4141)
阿哈水库叶绿素 a 时空分布特征及其与藻类、环境因子的关系	罗宜富, 李磊, 李秋华, 焦树林, 李红梅, 陈峰峰 (4151)
天目湖沙河水库浮游植物群落结构的时空异质性	孙祥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 史浩辰, 杭心语, 徐涤非 (4160)
程海沉积物重金属时空变化及人为污染与潜在生态风险	于真真, 刘恩峰, 张恩楼, 林琪, 沈吉, 王荣, 李艳玲 (4169)
自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征	左继超, 郑海金, 奚同行, 王凌云, 聂小飞, 刘昭 (4178)
邻苯二甲酸酯在三峡库区消落带非淹水期土壤中污染特征及健康风险	杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4187)
滦河干流水体多环芳烃与有机氯农药季节性分布、组成及源解析	王乙震, 张世禄, 孔凡青, 袁媛 (4194)
潍坊滨海经济技术开发区饮用水中有机磷酸酯的水平及人体暴露风险评估	董政, 马玉龙, 李珺琪, 袁浩东, 金军, 王英 (4212)
道路灰尘中有机磷阻燃剂污染特征及人体暴露	李静, 王俊霞, 许婉婷, 尚荣双, 顾海东, 温耀进, 张丽君 (4220)
居民经手口途径摄入含 PAHs 颗粒物的致癌风险评价	佟瑞鹏, 杨校毅, 张磊, 程蒙召 (4228)
基于空间自相关的地下水脆弱性时空演变	刘宇, 兰双双, 张永祥, 李芳春, 侯树楷 (4236)
Ag-AgI/CN/MA 复合物的制备及其可见光催化性能	张塞, 张丽丽, 胡春 (4245)
凤眼莲对富营养化水体中氨氮化和反硝化微生物的影响	李洁, 蒋丽娟, 王晓琳, 肖琳 (4253)
利用含 Cu(II) 废水强化微生物燃料电池处理含 Cr(VI) 废水	熊晓敏, 吴夏芳, 贾红华, 雍晓雨, 周俊, 韦萍 (4262)
生态高负荷土地快速渗滤系统处理猪场废水的效能及微生态	宿程远, 刘凡凡, 钟余, 黄智, 郑鹏, 农志文, 卢宇翔 (4271)
细菌对城市污水中小球藻生长和油脂积累的影响	涂仁杰, 金文标, 韩松芳, 陈洪一 (4279)
污水处理厂消毒技术对抗生素抗性菌的强化去除	刘亚兰, 马岑鑫, 丁河舟, 邱勇, 李冰, 王硕, 李激 (4286)
AnMBR-A-MBR 和 A ² -MBR 工艺处理焦化废水效果与急性毒性物质特征对比	朱佳迪, 李菲菲, 陈吕军 (4293)
基于实时控制技术的 CANON 工艺稳定性运行	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (4302)
新型硫铁复合填料强化再生水深度脱氮除磷	周彦卿, 郝庆霞, 刘思远, 王雨沙 (4309)
连续流亚硝化中试反应器的启动及其能力提升	朱强, 刘凯, 董石语, 顾澄伟, 王凡, 李祥, 黄勇 (4316)
基于不同接种污泥复合型厌氧氨氧化反应器的快速启动特征	闫刚, 李田, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (4324)
两段式曝气对好氧颗粒污泥脱氮性能的影响	王文啸, 卞伟, 王盟, 阚睿哲, 赵青, 梁东博, 李军 (4332)
醋糟高效厌氧消化体系构建	周云龙, 许之扬, 赵明星, 施万胜, 黄振兴, 何迪, 阮文权 (4340)
基于总量及形态的土壤重金属生态风险评价对比:以龙岩市适中镇为例	王蕊, 陈明, 陈楠, 刘冠男, 张二喜, 刘晓端, 张佳文 (4348)
锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价	陈凤, 董泽琴, 王程程, 韦雪花, 胡宇, 张丽娟 (4360)
三峡库区典型消落带 CH ₄ 排放的变化特征及影响因素	柴雪思, 郝庆菊, 黄哲, 范志伟, 江长胜 (4370)
地膜覆盖对菜地生态系统 N ₂ O 排放的影响	冯迪, 郝庆菊, 张凯莉, 石将来, 石孝均, 江长胜 (4380)
不同用量竹炭对污泥堆肥过程温室气体排放的影响	向秋洁, 杨雨洽, 张成, 相欣奕, 木志坚 (4390)
半固态培养条件下烟曲霉去除土壤中镉	陈耀宁, 汪元南, 黎媛萍, 李辉, 陈艳容, 伍艳馨, 苟宇, 朱福造, 张道利, 刘耀, 曾光明 (4398)
猪粪堆肥过程中金霉素去除及重金属形态变化	温沁雪, 曹永森, 陈志强 (4405)
堆肥-生物强化对重度石油污染土壤的修复作用	吴蔓莉, 陈凯丽, 叶茜琼, 祁燕云, 徐会宁, 王卓, 薛鹏飞, 朱常琳 (4412)
微生物多样性对土壤碳代谢特征的影响	安丽芸, 李君剑, 严俊霞, 李洪建 (4420)
冬小麦田 O ₃ 气孔与非气孔沉降及风险评估	徐静馨, 郑有飞, 赵辉, 储仲芳, 黄积庆, 袁月 (4427)
中国西南酸雨区降水化学特征研究进展	周晓得, 徐志方, 刘文景, 武瑶, 赵童, 蒋浩 (4438)
《环境科学》征稿简则 (4261) 《环境科学》征订启事 (4270) 信息 (4186, 4404, 4446)	

京津冀城市群空气污染的模式总结与治理效果评估

王振波^{1,2}, 梁龙武^{1,2}, 林雄斌³, 刘海猛^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院区域可持续发展与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 北京大学深圳研究生院, 深圳 518055)

摘要: 为探明全国空气污染最严重的京津冀城市群的空气污染防治路径与效果, 系统整理了 2013 年以来国家和地区实施的空气污染防治措施, 提出了分层跨区多向联动的大气污染防治模式, 并基于对比评价 2014~2015 年 13 个城市 112 个监测点的 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 、 CO 等大气主要污染物的监测数据, 评价了大气污染的治理效果. 结果表明, HCML 模式包括由国家-城市群-城市构成的分层纵向联动构架, 协同多个省市行政区的跨区横向联动管治方式以及涉及产业准入、能源结构、绿色交通、跨区援助、监测预警和会商问责等内容的协同多向联动机制. 通过模式实施, 2014~2015 年城市群的空气质量显著改善, 除 O_3 外, 空气污染物浓度显著降低, 高污染范围由北向南显著缩小, 其中 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 和 CO 的年均浓度分别下降 17.84%、14.61%、37.55%、4.82% 和 16.18%; 除 NO_2 外, 污染物全年空气达标天数明显增加. 在今后的治理过程中, HCML 应该转向治理主体多元化轨道; 创新排污监管与问责模式, 完善公众监督机制; 推进京津冀协同立法, 精准打击污染行为; 针对当前大气污染防治的核心问题与需求创新治理路径; 加强科普宣传, 以提升公众环境伦理意识保障源头减排.

关键词: 京津冀; 空气污染; 治理效果; 治理模式

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)10-4005-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201701007

Control Models and Effect Evaluation of Air Pollution in Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration

WANG Zhen-bo^{1,2}, LIANG Long-wu^{1,2}, LIN Xiong-bin³, LIU Hai-meng^{1,2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Controlling air pollution in the Jing-jin-ji urban agglomeration (JJJUA), the most seriously polluted area in China, is related to the integrated development strategy for the region. Based on the national and regional implementation of air pollution control measures in recent years, the hierarchical cross-regional multi-directional linkage (HCML) air pollution prevention and control model was applied in this study. The effect of air pollution control was evaluated by monitoring the pollutants, SO_2 , NO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, O_3 , and CO , at 112 monitoring sites in 13 cities in 2014-2015. The results can be summarized as follows: ① The HCML model is an interrelated framework at the horizontal and vertical level. Under the efforts provided by the central, urban agglomeration, and city governments, this multi-level governance model serves as an effective tool to resolve the issues related to air pollution beyond the borders of municipalities. Environmental regulations on certain industries, energy consumption structure, car ownership and usage, and air quality supervision and warning systems are well established under this governance model. ② The air quality of the JJJUA has improved significantly in the past two years. The concentrations of air pollutants significantly decreased, with the exception of O_3 , and high pollution ranges significantly reduced from north to south. The annual average concentrations of $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_2 , and CO decreased by 17.84%, 14.61%, 37.55%, 4.82%, and 16.18%, respectively. The number of days meeting the air quality standards increased for all pollutants except NO_2 . Based on the current situation and unsolved problems of air pollution, the JJJUA area needs certain measures including diversifying the governance subjects, joint legislation (beyond municipalities) on air pollution to regulate pollution discharge, enhancing public awareness on air pollution and its health impacts, carefully examining sources of air pollution in winter to reduce pollution, and to better understand the sources of ozone and adopt effective control measures.

Key words: Beijing-Tianjin-Hebei region; air pollution; control effect; model summary

近年来, 持续性严重污染事件频发极大地危害着居民的身体健康^[1], 城市群作为中国城市化和工业化的核心区域, 面临着更大的环境压力^[2]. 京津冀城市群 (Jing-jin-ji urban agglomeration, JJJUA) 是中国五大国家级城市群之一, 包括北京、天津和河

北省石家庄、保定、沧州、承德、邯郸、衡水、廊

收稿日期: 2017-01-02; 修订日期: 2017-05-03

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (41590842); 国家自然科学基金重点 (71433008)

作者简介: 王振波 (1980~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为城市与区域规划、城镇化与环境效应, E-mail: wangzb@igsrr.ac.cn

坊、秦皇岛、唐山、邢台、张家口等 13 个地级以上城市, 总面积 21.72 万 km^2 , 占全国总面积的 2.26% (图 1). 2015 年常住人口 1.11 亿, 占全国总人口的 8.19%, 是全国“资源环境与发展矛盾最为尖锐的地区”和“空气污染最严重的区域”^[3]. 2016 年, 京津冀城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度为 $71 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 高于全国平均水平 51.1%^[4], 但已经比 2013 年降低了 33.0%^[5]. 2016 年 5 月, 联合国环境规划署 (UNEP) 发布的有关北京空气污染治理历程的评估报告称, 1998~2013 年北京持续采取的大气污染治理措施对改善北京市的空气质量发挥了积极作用^[6]. 京津冀城市群地区空气质量的快速改善, 得益于国家紧急采取的空气污染防治综合措施. 在空气污染研究领域, 学者更多地关注污染物的时空特征^[7-9]、成分特征与来源解析^[10-12]、影响因素^[13-15]、重污染过程的模拟^[16,17]、空气污染传导^[18]、减排及治理对策等^[19-21], 而系统梳理和总结近年来国家空气污染防治措施和模式的研究较少. 2015 年是《大气污染防治行动计划》实施的中期, 京津冀城市群采取了怎样的大气污染防治模式? 防治效果如何? SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 、CO 等监测污染物时空特征发生了哪些变化? 这些变化又得益于何种政府防治管理模式? 本文基于以上热点问题, 系统整理了国家和部门出台的相关政策文件, 总结了空气污染治理模式, 并借助 2014~2015 年京津冀城市群的小时监测数据, 系统评价 6 种污染物的治理效果, 提出问题与对策, 以期为国家正在实施的大气污染防治行动提供借鉴.

1 分层跨区多向联动 (hierarchical cross-regional multi-directional linkage, HCML) 的大气污染治理模式

面对日益严重的空气污染, 2013 年开始, 中央政府密集出台《大气污染防治行动计划》(《计划》)、《能源行业大气污染治理方案》等强制减排政策, 明确提出全国和重点地区近中远期空气污染治理目标. 京津冀中南部区域处于同一个大气流场, 在区域和局地风场的作用下, 各地排放污染物相互输送、回流混合、传输叠加^[22]. 在传统煤烟型污染尚未得到控制的情况下, 以细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$)、臭氧为特征的区域性复合型大气污染日益突出, 大范围的空气重污染现象频繁发生, 单个城市独自采取行动难以达到治污控霾的效果, 区域联防联控势在必行. 所以, 2013 年 9 月, 环

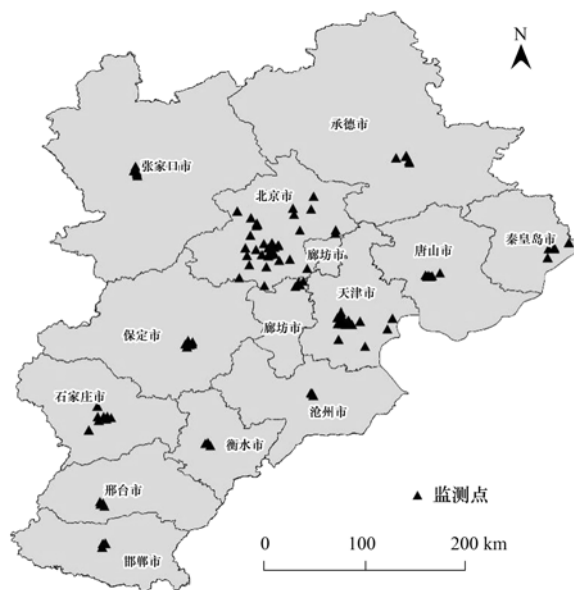


图 1 京津冀城市群范围及 2015 年空气质量监测点位置示意

Fig. 1 Spatial distribution of air quality monitoring sites in the JJUA in 2015

境保护部等相关部门联合出台了《京津冀及周边地区落实大气污染防治行动计划实施细则》(《细则》), 明确提出了到 2017 年底该地区大气污染治理的具体措施、目标与细则. 相继出台的《京津冀协同发展规划纲要》(《纲要》)和全国第一个跨省市行政区的《“十三五”时期京津冀国民经济和社会发展规划》(《规划》)也把大气污染治理作为重点目标. 基于大气污染源和污染扩散的时空属性, 由此, 京津冀城市群地区为先行先试区, 中国逐渐探索出一套全新的分层跨区多向联动 (hierarchical cross-regional multi-directional linkage, HCML) 大气污染防治管理模式, 从直接治理和间接预防两方面, 统筹国家、区域和城市等多个层级, 采取系统、持续的联合应对行动. 该行动使 2015 年主要污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 和 CO 的浓度比 2014 年分别下降 17.84%、14.61%、37.55%、4.82% 和 16.18%, 治理效果明显. 重要的是, 《2015 年中国气候公报》显示, 2015 年超强厄尔尼诺事件导致全国平均气温较常年偏高 0.95°C , 降水增多, 南涝北旱, 冷空气频次减少, 强度偏弱等条件, 为区域空气污染的形成提供了良好的发育环境. 即使如此, 京津冀主要污染物浓度仍然实现了大幅降低, 这也表明国家空气污染治理取得了良好效果.

本文将其概括为“分层跨区多向联动 (HCML)”的大气污染治理模式, 包括以下框架和运行机制.

1.1 模式构架:分层纵向的联动构架

建立了“国家-区域-城市”三层纵向联动的立体防治构架(图2)。第一,国家层面实施顶层机制设计。党中央、国务院高度重视大气污染防治。2013年,国务院出台《大气污染防治行动计划》(国发〔2013〕37号),提出全国大气污染防治的总体要求、奋斗目标和政策举措。第二,区域层面实施任务分解与问责机制。国务院授权环境保护部与各省(区、市)人民政府层层签订大气污染防治目标责任书,把目标任务分解落实到各级政府、部门和企业,构建纵向到底、横向到边的目标任务和责任考核体系。第三,城市层面开展横向减排落实机制。构建城市减排工程体系,包括源头控制、能源结构调整、机动车结构调整、产业结构优化、末端污染治理、城市精细化管理、生态环境建设和空气重污染应急等减排工程,定制“专项责任清单”,明确城市部门的职责分工,规定城市各级政府的属地管理责任。

1.2 模式管理:跨区横向的联动管治

建立了跨区横向联动的防治管理体系。第一,成立跨区域大气污染管理机构。2013年,成立京津冀及周边区域大气污染防治协作小组,针对污染问题组织京津冀鲁晋蒙豫等省市和相关部委主要负责人不定期召开会议。第二,跨区行动计划确定短期防治目标。环境保护部等六部委联合出台的《细则》明确了京津冀及晋鲁蒙等周边地区2017年的细颗粒物年均浓度控制目标、产业与环境准入标准和落后产能淘汰任务。第三,跨区协同规划制定长期防治路径。先后出台的《纲要》和《规划》提出建设生态修复环境改善示范区,明确了京津冀城市群污染防治与绿色发展框架与路径。第四,开创跨区调度令制度。2016年11月,河北省开创并实施调度令经省政府授权,针对大气环境质量目标进度、区域性重污染过程、重大活动及突出的环境问题,根据污染源解析结果和研判,对特定区域的相关工业企业减排、城市扬尘治理、机动车限行、面源污染防治等重点工作进行调度。

1.3 模式保障:协同多向的联动机制

产业结构、能源结构以及交通格局是当前京津冀城市群空气污染的决定性因素。基于此,城市群各级政府制定了以下联动对策。

第一,产业准入联动机制。京津冀及鲁晋蒙等周边地区不得审批钢铁、水泥、电解铝、平板玻璃、船舶、炼焦、有色、电石、铁合金等过剩和新增产

能项目。北京不再审批劳动密集型的一般制造业新增产能项目,现有的逐步向外转移。京津、石家庄等13个城市建设火电、钢铁、石化、水泥、有色、化工等六大行业以及燃煤锅炉项目,要严格执行大气污染物排放限值。设定各省淘汰高污染企业清单和产能目标。

第二,能源结构调整联动机制。实行煤炭消费总量控制计划,2017年压减总量8300万t;实施清洁能源替代计划,提升天然气等清洁能源使用比重,北京煤炭占能源比重下降到10%以下;推进煤炭清洁利用计划,扩大高污染燃料禁燃区范围,推动高效清洁化供热,推广太阳能热水系统;优化区域产业空间布局,2017年底完成城市主城区钢铁、石化、化工等重污染企业的搬迁与改造。

第三,绿色交通联动机制。优化城市群城际综合交通体系,实施公交优先战略,提高绿色交通出行比例,规划2017年京津公共交通出行比例60%以上;控制机动车保有量,京津和廊坊同步实施机动车总量控制及车牌尾号限时、限区域联动机制;2017年底全部淘汰黄标车,并提升燃油品质达到国家第五阶段标准;推广新能源汽车,京津和省会城市年增或更新公交车中新能源和清洁燃料车达60%。

第四,跨区援助联动机制。依据《细则》“七省联动、共同保障”的要求,北京、天津和河北三地环境保护厅(局)共同签订《京津冀区域环境保护率先突破合作框架协议》,在实施区内行动计划的同时,开展京津援助河北重点城市联合治污模式,在沧州市燃煤锅炉综合治理、散煤洁净化治理、民用燃煤洁净煤替代等领域对特定城市进行对口援助。

第五,监测预警联动机制。在地级以上城市建成统一的国家空气质量监测网,完善污染源在线监测体系,建成机动车排污监控平台;构建重污染天气监测预警系统,各级政府组织编制应急预案,构建区域性重污染天气应急响应机制,实行联防联控。

第六,会商问责联动机制。联合省市自治区和相关部委协调解决突出环境问题,组织实施环评会商、联合执法、信息共享、预警应急等措施;国务院、省市、城市和企业分别签订大气污染防治目标责任书,层层落实目标任务;建立政府考核为主、兼顾第三方评估的考核体系,对上年治理情况进行考核,结果向国务院报告,并向社会公布。

1.4 模式实施:共享互助的联合行动

2013年以来,HCML大气污染治理模式在京津

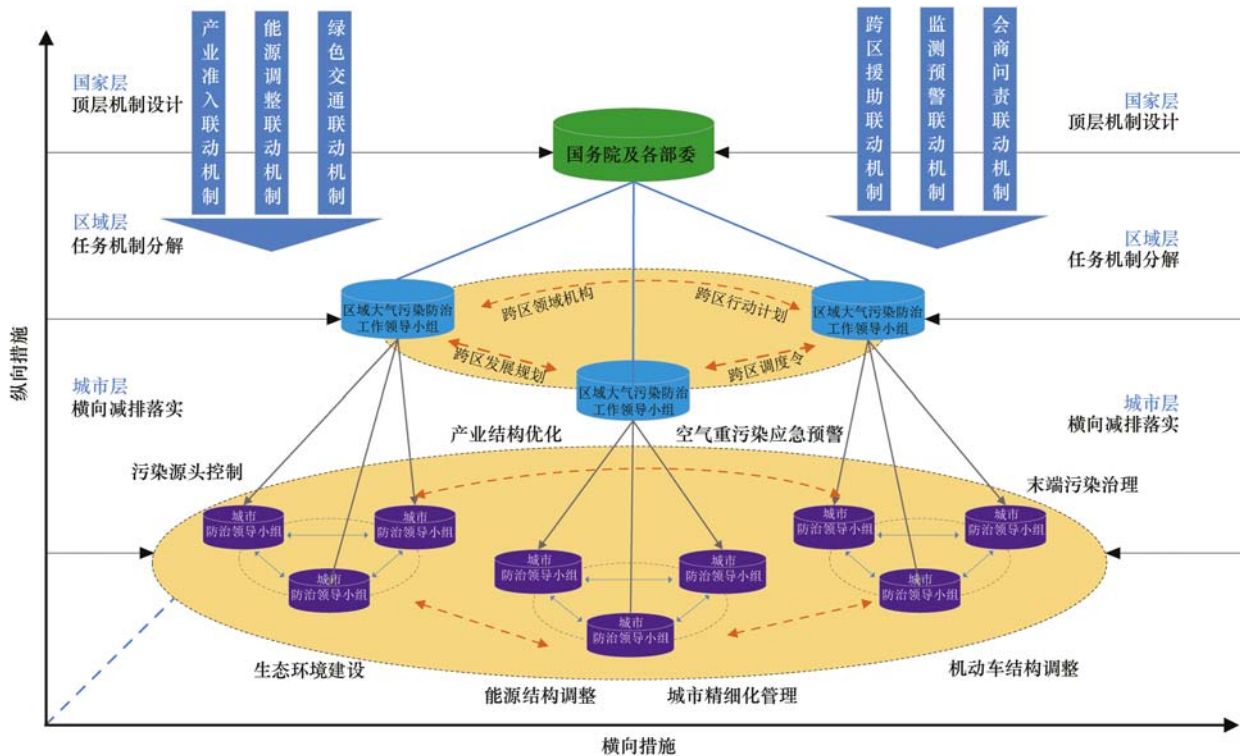


图2 京津冀城市群大气污染 HCML 防治模式

Fig. 2 Regional HCML model of air pollution in JJJUA

冀城市群地区全面实施。①产业准入联动:从2014~2015年京津冀三地相互投资的行业来看,北京产业结构正在转向于科技创新行业,天津则主打先进制造研发基地和金融创新运营示范区,河北正在建设产业转型升级试验区。2015年三地相互投资额为1948.75亿元,是2014年的3.2倍,表明国家支持的先进产业正在京津冀快速兴起。②能源结构调整联动:2013年以来,京津冀三地煤改电、减煤换煤两条主线同步推进。北京持续控制能源消费总量与燃煤量,优质能源消费比重达88%;天津至2016年为止已消减燃煤消费总量1000万t,不断提高外输电比例和清洁能源开发利用;河北省前所未有地密集出台控煤政策,努力调整能源结构,非化石能源占一次能源比重年均上升5%左右。③绿色交通联动:交通运输部协同京津冀在补齐基础设施网络短板,加快推进重大铁路干线、城际铁路等建设,以及提升北京交通枢纽功能和促进综合运输服务与管理的一体化方面开展了大量工作,如2016年京台高速京冀段的通车,延崇高速公路北京段的开工建设,首都地区环线高速公路的开工,京津冀互通卡的启用等。④跨区域援助联动:2014年,北京市提供4.6亿元补偿廊坊、保定开展联合治污,共减少燃煤77万t,年均减

排二氧化硫6000余t;2016年,天津市将投入4亿元专项基金对口支援沧州与唐山的大气污染治理项目。⑤监测预警联动:三地建立了空气质量预报信息共享机制,完善了空气重污染预警会商和应急联动机制。在历次重污染天气过程中,三地环保监测中心与中国环境监测总站空气质量预警中心及时就京津冀区域重污染天气预报预警、空气质量变化趋势等进行会商研判,推进区域重污染天气预警预报、会商及应急相应联动,为采取及时、高效、准确的应急措施提供了决策依据。⑥会商问责联动:在重大活动和遇极端不利气象条件期间,三地统一监测,每日开展空气质量实时联合视频会商,并且同步采取应急减排与问责措施,减缓区域空气污染积累程度。2016年,环保部共计对空气质量恶化明显的7个城市政府主要负责同志进行公开约谈,并对空气质量改善进度缓慢的省份和城市及时实施预警。

2 材料与方法

京津冀城市群范围空气质量主要污染物 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 、CO研究数据来源于中国环境监测总站的城市空气质量实时发布平台监测数据^[23]。2014年,城市群有监测点82个,2015年

增至 112 个。根据 GB 3095-2012^[24]对大气污染物浓度数据有效性要求,参考王振波等^[4]的研究成果,对监测数据进行了质量控制。因城市检测点的数量和日数据的有效时间点各异,本文对数据进行平均值处理,得到 2014~2015 年 13 个城市 6 种污染物的日均浓度值。本文将城市群视为国家二类环境功能区,即居住区、商业交通居民混合区、文化区、工业区和农村地区,污染物的年平均和日平均浓度限值参考 GB 3095-2012 标准。“日平均值”指一个自然日 24 h 平均浓度的算术平均值,“月平均值”指一个日历月内各日平均浓度的算术平均值,“季平均值”指一个日历季内各日平均浓度的算术平均值,“年平均值”指一个历年内各日平均浓度的算术平均值^[24];另外,春季为 3~5 月,夏季为 6~8 月,秋季为 9~11 月,冬季为 1~2 月和 12 月。

3 2014~2015 年京津冀城市群空气污染的治理效果评估

3.1 污染物浓度变化评估

近两年来,中国跨区域的大气综合治理使京津冀城市群空气质量明显改善。除 O_3 外,其他污染物浓度显著下降,其中 SO_2 的下降幅度最大,表明火电和有色金属冶炼排放得到了有效控制。从年均浓度来看(图 3),2014~2015 年, $PM_{2.5}$ 浓度下降 $16 \mu g \cdot m^{-3}$,降幅 17.84%; PM_{10} 下降 $21 \mu g \cdot m^{-3}$,降幅 14.61%; SO_2 下降 $14 \mu g \cdot m^{-3}$,降幅 37.55%; NO_2 下降 $2 \mu g \cdot m^{-3}$,降幅 4.82%;CO 下降 $0.28 mg \cdot m^{-3}$,降幅 16.18%;只有 O_3 上升 $3 \mu g \cdot m^{-3}$,升高幅度 3.25%。

分季度来看,2014~2015 年, $PM_{2.5}$ 浓度四季均呈下降趋势,其中秋季下降 $29 \mu g \cdot m^{-3}$,降幅最大,其次为春夏和冬季; PM_{10} 相似,秋季浓度下降最多,为 31.13%,其次为春夏,冬季稍有增加(0.78%); SO_2 浓度四季均有下降,冬季下降最多,为 $23 \mu g \cdot m^{-3}$ (32.91%),春季次之,但下降比率最大,为 53.04%,夏秋降幅 33% 左右; O_3 浓度除夏季下降 $10 \mu g \cdot m^{-3}$ (5.87%)之外,春秋冬均有所上升,其中冬季上升 $19 \mu g \cdot m^{-3}$,比率最高(54.40%); NO_2 浓度除冬季上升 $2 \mu g \cdot m^{-3}$,其他季节均呈下降趋势,其中春季下降 $8 \mu g \cdot m^{-3}$,降幅最大(32.91%),夏秋降幅在 4%~5% 之间;CO 浓度四季均有下降,其中春冬降幅较大,分别为 0.21

$mg \cdot m^{-3}$ (15.72%)和 $0.66 mg \cdot m^{-3}$ (21.40%),夏秋较小,分别为 $0.09 mg \cdot m^{-3}$ (9.01%)和 $0.15 mg \cdot m^{-3}$ (10.16%)。

逐月来看,2015 年 1~11 月空气污染较 2014 年同期均有较大改善。其中 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度均在 10 月出现最大降幅($50 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $61 \mu g \cdot m^{-3}$)。 SO_2 浓度全年下降,1~4 月和 11~12 月降幅较大。 O_3 浓度 1~4 月和 9~10 月出现上升,其中 1~2 月上升幅度均达到 120% 以上;下降的月份中,8 月、11~12 月下降幅度均在 10% 以上。 NO_2 浓度 8~9 月和 12 月出现上升,其他月份均有所降低,其中 2~4 月和 11 月下降幅度均在 11% 以上。CO 浓度 1 月稍有上升,其他月份有所下降;除 6 月、8~9 月和 11 月外,其他月份的下降幅度均在 10% 以上,其中 12 月下降幅度 38.90%($1.84 mg \cdot m^{-3}$)。2015 年 12 月,受冬季燃煤和华北多次强降雪天气导致大范围的高湿度、低风速、强逆温的气象条件影响,城市群发生了多次严重污染,其中保定和衡水等城市出现了连续 8 天的重度及以上污染天气,使当月 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 NO_2 浓度较 2014 年 12 月大幅提升。

逐日来看,2014~2015 年城市群污染物日均浓度呈现下降趋势。但两年内 6 种污染物逐日浓度所呈现的脉冲型周期性规律并无明显改变, O_3 的年变化趋势为“n”型,其余 5 种污染物年变化趋势整体呈现出“U”型。各污染物春冬季波动周期较短,约为 5~7 d,夏秋季周期较长,约为 10~15 d;除此之外,6 种污染物的波幅呈现出明显的季节差异,春冬季各污染物浓度的日变化振幅较大,而夏秋季则较小。

3.2 污染物达标天数变化评估

根据 GB 3095-2012,二类区域 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 O_3 、 NO_2 、CO 的日限值分别为 $75 \mu g \cdot m^{-3}$ 、 $150 \mu g \cdot m^{-3}$ 、 $150 \mu g \cdot m^{-3}$ 、 $160 \mu g \cdot m^{-3}$ 、 $80 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $4 mg \cdot m^{-3}$ 。以此为依据,通过计算近两年来京津冀城市群空气污染物的超标天数,揭示空气质量变化情况。2014~2015 年城市群主要污染物的达标天数除 NO_2 减少之外,其他均有所增加。其中, $PM_{2.5}$ 的达标天数从 175 d 增加到 212 d,增加了 37 d,增长率为 21.14%。 PM_{10} 和 O_3 分别增加了 42 d 和 6 d,分别增长 19.72% 和 2.08%。 SO_2 、CO、 NO_2 的全年污染较轻,但前两类达标天数实现 3 d(0.86%)和 15 d(4.57%)的增长, NO_2 则减少了 7 d(-2.08%),呈加重趋势(表 1)。

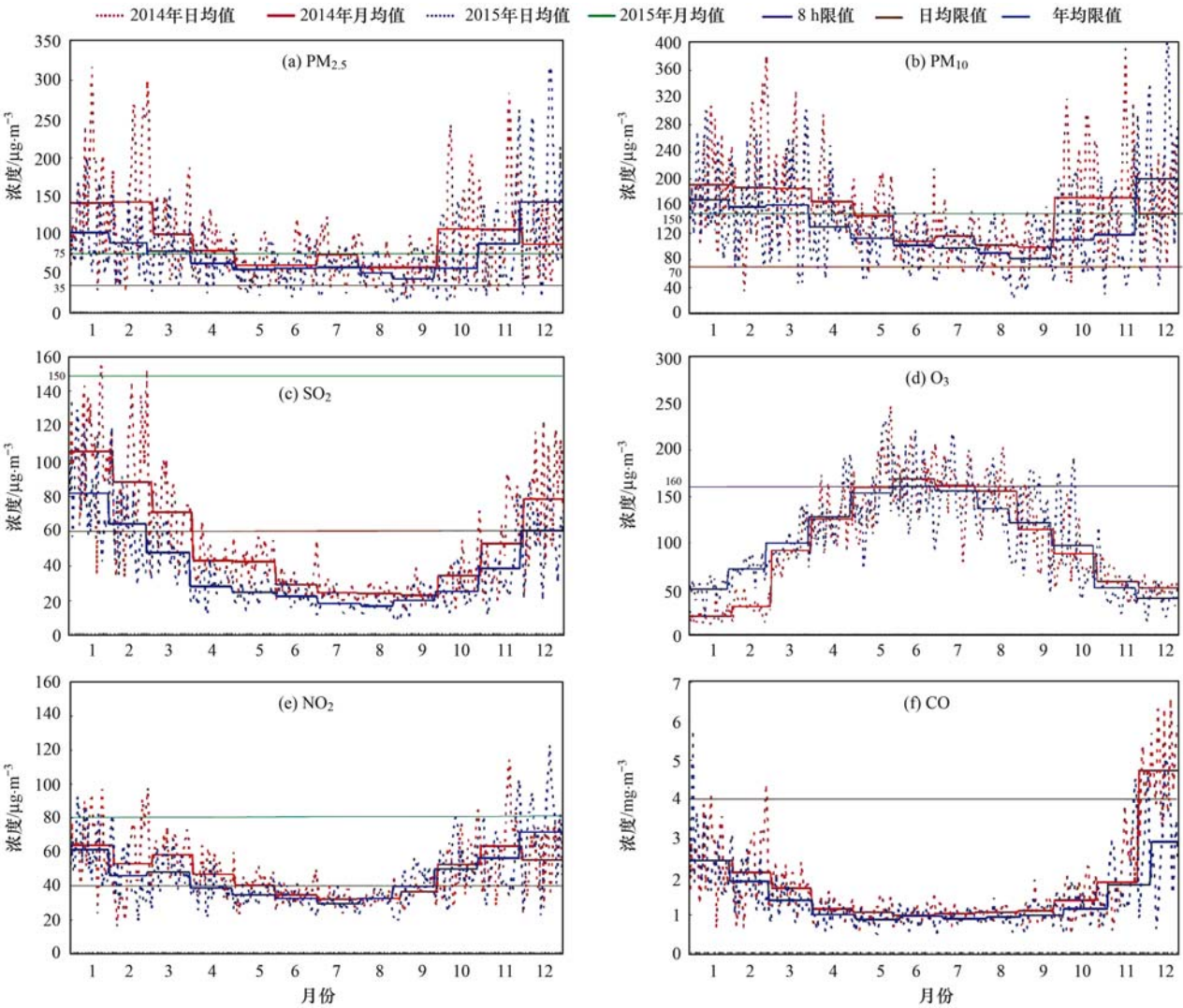


图3 2014~2015年京津冀城市群主要污染物浓度逐日、逐月变化规律

Fig. 3 Daily and monthly variations in the regularity of major pollutant concentrations in JJUA, 2014-2015

表1 2014~2015年京津冀城市群主要污染物达标天数统计

Table 1 Statistics for days meeting air quality standards for major pollutants in the JJUA, 2014-2015

污染物	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	O ₃	NO ₂	CO
2014 达标天数/d	175	213	350	288	337	328
2015 达标天数/d	212	255	353	294	330	343
增减天数/d	37	42	3	6	-7	15
增长率/%	21.14	19.72	0.86	2.08	-2.08	4.57

从季节和逐月来看, 2014~2015年PM_{2.5}达标天数增幅春秋多于夏冬. 春秋均增加18 d, 4月和10月均增加10 d以上; 夏季各月起伏较大, 总量增加2 d; 冬季因12月减少6 d, 总量减少了1 d. PM₁₀达标天数中, 春秋增加, 夏冬减少. 春季4~5月增加28 d, 秋季增加17 d, 月均增长5~6 d; 冬夏浮动较大, 各减少1~2 d. SO₂达标天数除夏季减少6 d之外(8月减少8 d), 春秋冬均增加1~4

d. O₃达标天数春夏增加, 秋冬减少. 夏季增加12 d, 其中7月增加9 d; 春季4~5月浮动较大, 总量增加2 d; 秋冬分别减少6 d和2 d. NO₂达标天数春秋增加, 夏冬减少, 总量减少7 d, 主要集中在1、8和12月. CO夏季减少6 d, 其中8月减少8 d; 春秋冬均有增加, 12月增加17 d. 两年来看, 1~11月空气质量明显好转, 但12月受复杂燃煤与气象条件的影响^[25], 容易出现大规模和长时段的污染事件(如2014年12月的CO污染和2015年12月的PM_{2.5}、PM₁₀和NO₂污染), 并且对全年的空气质量平均水平产生较大的负面影响.

3.3 污染物空间范围变化评估

2014~2015年京津冀城市群监测的6种空气污染物中, 有5种污染物高污染范围由城市群北部向南部明显缩小, 只有O₃污染范围向北扩散. 2015年, 京津冀城市群全域PM_{2.5}浓度较2014年整

体下降 $16 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (降幅 17.8%), 污染较为严重的南部地区, 其污染物浓度降幅明显大于北部地区. 2015 年, 城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度仍然呈现南高北低的格局, 但年均浓度 $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (国家年均限值) 以上的高污染地区已经退至京津以南 [图 4(a) 和图 4(b)]. 其中, 石家庄年均浓度降低最大, 为 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (降幅 28.8%), 邢台、邯郸、沧州和承德降幅均在 20% 以上, 京津分别降低 11.2% 和 13.9%, 张家口空气质量优良, 降幅最小. 分季节看, 城市群秋季降幅最大 (31.4%), 8 个城市降幅 30% 以上, 秦皇岛和石家庄降幅高于 40%; 其次为春季 (18.4%), 邢台降幅 35.7%, 沧州等 4 个城市降幅 20% 以上; 夏季空气质量较好, 平均降幅 13.8%, 其中承德、北京等 4 个城市降幅 20% 以上; 冬季空气污染最严重, 整体降幅全年最小 (9.9%), 但张家口和石家庄降幅高于 20%, 保定、衡水和天津则出现浓度升高现象. 逐月来看, 1~11 月均呈现下降趋势, 10 月降幅最大 (46.3%), 12 月浓度则上升 61.1%, 而浓度起伏较大的区域主要集中在城市群中部的北京、天津、衡水、廊坊和保定地区, 表明以京津为核心的城市群中心区域 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染治理具有更大的难度^[26].

2015 年的 PM_{10} 年均浓度较 2014 年下降 $22 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (降幅 14.6%), 与 $\text{PM}_{2.5}$ 相似, 南部高污染地区浓度降幅较北部地区更为显著, 但整个城市群地区浓度均高于国家年均限值 $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [图 4(c) 和 4(d)]. 其中石家庄浓度降低 $62 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (降幅 30.2%), 其次为邢台, 降低 $55 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (降幅 24.5%), 北京、承德降幅也在 20% 以上; 张家口和邯郸浓度反而上升. 分季节看, 秋季 PM_{10} 浓度降幅最大 ($47 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 14.6%), 其中保定浓度降低最大 ($93 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 降幅高达 62%, 北京及以南 8 个城市降幅也在 30% 以上; 其次为春季 ($32 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 19.3%) 和夏季 ($11 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 10.0%), 冬季浓度有所升高, 中南部的北京、保定等 8 个城市浓度均有上升. 分月来看, 1~11 月均呈现下降趋势, 10 月和 11 月下降幅度均大于 30%, 12 月浓度增长 $51 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (34.7%). 张家口和邯郸 PM_{10} 浓度分别有 10 个月和 5 个月呈上升趋势, 表明两个城市污染正在加重.

SO_2 浓度两年间下降了 $14 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (27.3%). 2014 年南部的邢台、保定、石家庄和东部的唐山年均浓度均高于国家限值 $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 2015 年所有城市均降至国家限值以下, 仍显示南高北低的空间格

局 [图 4(e) 和 4(f)]. 季节上, 两年间春季 SO_2 浓度降幅最大 (34.7%), 其中京津和张家口降幅均在 40% 以上, 保定降幅最小 (5.9%); 夏、秋、冬季降幅均在 24%~25% 之间. 月份上, 3~5 月降幅在 30% 以上, 其中 5 月下降 40.5%; 9 月降幅最小 (13.1%), 其余月份均在 22%~30% 之间. 整体来看, 京津以北地区降幅较以南地区更显著.

O_3 是城市群唯一浓度升高的污染物, 两年内年均浓度提高了 $3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (提升 3.3%). 空间上看, 衡水是城市群 O_3 污染的核心地区. 城市群南部的沧州、邢台、邯郸、衡水、张家口、石家庄、天津浓度降低, 北部的其他城市浓度提升, 其中张家口 O_3 浓度提高 $41 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (58.6%), 为城市群最高 [图 4(g) 和 4(h)]. 分季节看, 城市群夏季浓度降低 (5.9%), 春、秋、冬季浓度升高, 分别提高 1.4%、5.1% 和 54.4%. 其中春夏升高区域集中在北部的张家口和承德, 秋冬季则是南部地区升高幅度更大. 逐月来看, 1~4 月和 9~10 月浓度提升, 其中 1~2 月 ($>120\%$) 南部地区贡献较大, 其他月份 ($<10\%$) 北部地区贡献较大. 5~8 月和 11~12 月浓度下降, 12 月降幅最大 (21.6%), 天津及以南的石家庄、保定等城市贡献较大.

城市群 NO_2 浓度两年内下降了 $2.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (降幅 4.8%). 沧州和衡水浓度分别升高 $6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (18.7%)、 $2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (4.5%), 成为南部 NO_2 污染中心, 导致城市群南部地区 NO_2 浓度超国家限值 ($40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的区域面积明显增大. 除两市之外, 其他城市均呈下降趋势. 唐山浓度虽然有所降低, 但因浓度基数较高 (两年均高于 $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 仍然是北部污染中心; 下降幅度较大的城市为京 (9.6%)、津 (22.7%) 和承德 (12.4%) [图 4(i) 和 4(j)]. 分季节看, 冬季城市群整体浓度升高, 污染源主要位于秦皇岛、衡水、北京、唐山等中部 6 市, 其他城市浓度有所下降; 春夏秋季浓度下降, 春季降幅最大, 只有沧州浓度提升; 夏秋浓度降低主要归功于京津和石家庄等中部城市 NO_2 浓度的大幅下降. 逐月来看, 8~9 月和 12 月浓度升高, 北京以南地区贡献较大; 其他月份浓度降低, 京津、张家口等中部地区贡献较大.

城市群的 CO 浓度全年降低 $0.28 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (降幅 16.2%). 虽然衡水、承德、廊坊和邢台浓度有所上升, 但京津、张家口和保定等中部城市较大的降幅保持了城市群整体浓度的下降趋势. 其中京津分别下降 67.4% 和 25.1%, 位于前列 [图 4(k) 和 4

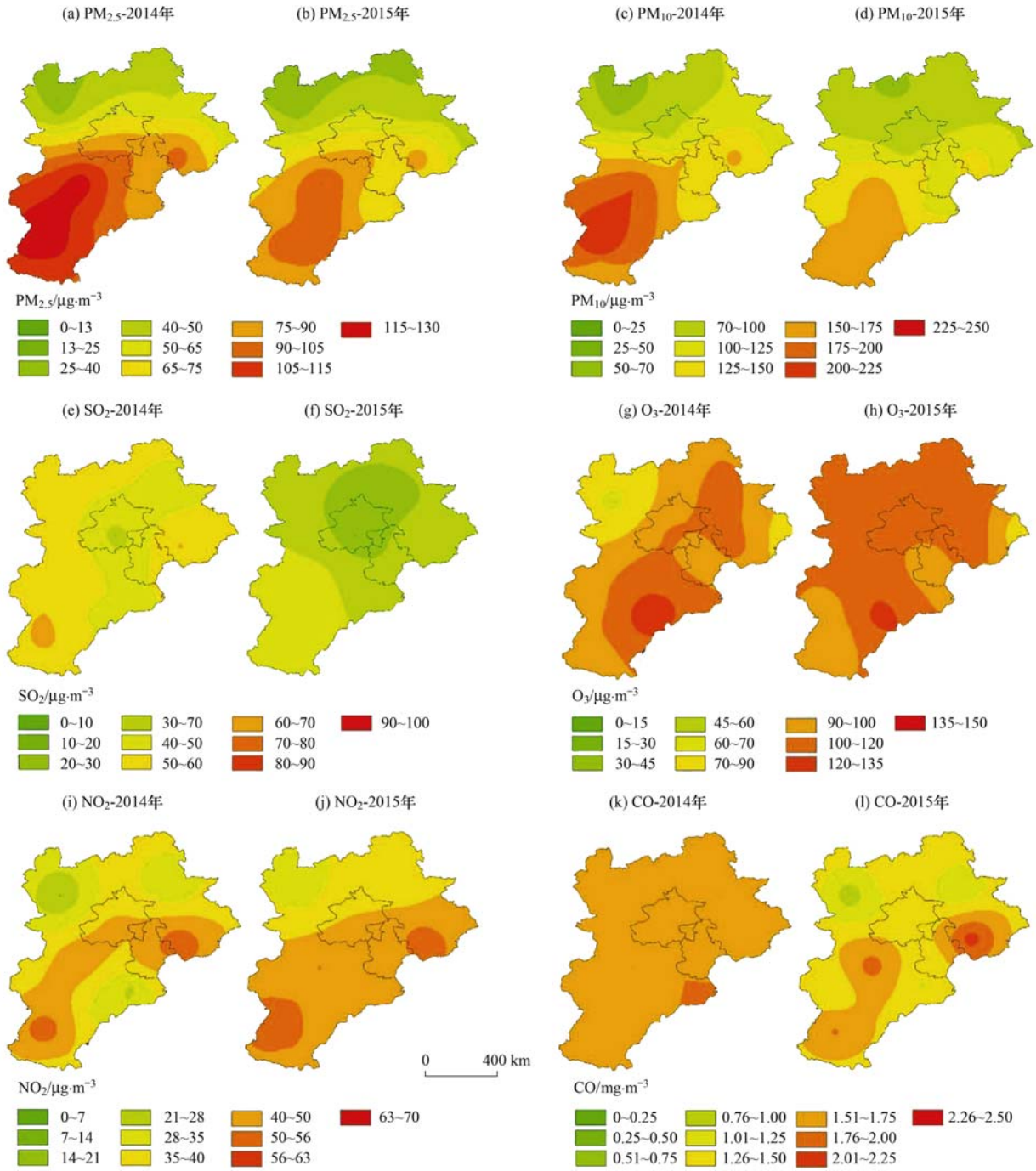


图 4 2014 ~ 2015 年京津冀城市群主要污染物空间分布变化

Fig. 4 Variations in the spatial distribution of major pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region in 2014 and 2015

(1)]. 分季节看, 两年内四季均呈下降趋势, 其中冬季降幅最大(21.4%), 北京、张家口和唐山贡献较大; 春季次之(降幅 15.7%), 城市群南部地区贡献较大; 夏秋季降幅分别为 9.0% 和 10.2%, 保定、天津、张家口和秦皇岛等中北部地区贡献较大. 逐月来看, 1 月浓度略有上升(0.7%), 其他月份均呈下降趋势, 其中 12 月降幅最大, 主要受益于北京和秦皇岛下降幅度较大; 其他月份均在 20% 以下, 其

中京津、张家口 CO 浓度大幅下降对整个城市群带动效应明显.

4 结论

(1) 近年来, 国家对京津冀城市群等地区的大气污染采取了分层跨区多向联动的防治模式, 该模式由国家-城市群-城市构成的分层纵向联动构架, 协同多个省市行政区的跨区横向联动管治方式以及

涉及产业准入、能源结构、绿色交通、跨区援助、监测预警和会商问责等内容的协同多向联动机制。

(2) 分层跨区多向联动大气污染防治模式的实施使京津冀城市群的空气质量显著改善。2014 ~ 2015 年, 城市群的空气质量显著改善, 除 O_3 外, 空气污染物浓度显著降低, 高污染范围由北向南显著缩小, 其中 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 和 CO 的年均浓度分别下降 17.84%、14.61%、37.55%、4.82% 和 16.18%; 除 NO_2 外, 污染物全年空气达标天数明显增加。

(3) 冬季是京津冀城市群大气污染最严重的季节。2014 和 2015 年, $PM_{2.5}$ 冬季污染天数比重均大于 70% (60 d), 分别占全年污染天数的 34.8% 和 43.3%, 其中重度以上污染天数的全年比重分别为 54.2% 和 82.6%。所以, 亟待开展冬季燃煤期重霾污染的溯源与过程研究, 特别是针对民用散煤清洁化、燃煤小锅炉和“散小乱污”企业等问题开展防治模式创新。

(4) 京津冀城市群 O_3 污染呈现加重趋势, 重点防治季节为夏季, 重点防治区域为以衡水为中心的城市群南部地区。

(5) HCML 模式仍处于碎片化阶段, 政府仍为单一治理主体。随着京津冀一体化进程的深入, 民众和社会组织在城市群公共问题治理中的作用尚未完全发挥, HCML 模式需要参与主体的多元化和治理手段的多样化。

(6) 面向京津冀城市群中小企业数量庞大、布局分散、偷排造假, 以及环保部门执法压力大等问题, HCML 模式需要采取多部门、多主体的统一排污监管机制和落实职责的联合监管与问责模式, 完善公众监督机制。

(7) 当前京津冀大气污染防治法律体系难以对接匹配, 当务之急是建立京津冀协同立法、审议与公众参与机制, 一方面借鉴、融合与匹配各地的相关条例; 另一方面建立跨区域法院并出台相应规范性文件, 以解决跨区域司法纠纷。

参考文献:

- [1] Xie Y, Dai H C, Dong H J, *et al.* Economic impacts from $PM_{2.5}$ pollution-related health effects in China: a provincial-level analysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50** (9): 4836-4843.
- [2] Zhao Z Y, Chang R D, Zillante G. Challenges for China's energy conservation and emission reduction[J]. *Energy Policy*, 2014, **74**: 709-713.
- [3] 国家发展与改革委员会, 环境保护部. 京津冀协同发展生态环境保护规划[Z]. 北京, 2015-12-30.
- [4] 王振波, 方创琳, 许光, 等. 2014 年中国城市 $PM_{2.5}$ 浓度的时空变化规律[J]. *地理学报*, 2015, **70**(11): 1720-1734. Wang Z B, Fang C L, Xu G, *et al.* Spatial-temporal characteristics of the $PM_{2.5}$ in China in 2014 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, **70**(11): 1720-1734.
- [5] 李珊珊, 程念亮, 徐峻, 等. 2014 年京津冀地区 $PM_{2.5}$ 浓度时空分布及来源模拟[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(10): 2908-2916. Li S S, Cheng N L, Xu J, *et al.* Spatial and temporal distributions and source simulation of $PM_{2.5}$ in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2014 [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(10): 2908-2916.
- [6] 王浩, 高健, 李慧, 等. 2007-2014 年北京地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化特征[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(6): 783-790. Wang H, Gao J, Li H, *et al.* Variation of $PM_{2.5}$ mass concentration in Beijing area during 2007-2014 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(6): 783-790.
- [7] 杨俊益, 辛金元, 吉东生, 等. 2008 ~ 2011 年夏季京津冀区域背景大气污染变化分析[J]. *环境科学*, 2012, **33**(11): 3693-3704. Yang J Y, Xin J Y, Ji D S, *et al.* Variation analysis of background atmospheric pollutants in North China during the summer of 2008 to 2011 [J]. *Environmental Sciences*, 2012, **33**(11): 3693-3704.
- [8] 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 2013 年北京市 $PM_{2.5}$ 的时空分布[J]. *地理学报*, 2015, **70**(1): 110-120. Wang Z S, Li Y T, Chen T, *et al.* Spatial-temporal characteristics of $PM_{2.5}$ in Beijing in 2013 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, **70**(1): 110-120.
- [9] 周磊, 武建军, 贾瑞静, 等. 京津冀 $PM_{2.5}$ 时空分布特征及其污染风险因素[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(4): 483-493. Zhou L, Wu J J, Jia R J, *et al.* Investigation of temporal-spatial characteristics and underlying risk factors of $PM_{2.5}$ pollution in Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(4): 483-493.
- [10] Zhang F, Cheng H R, Wang Z W, *et al.* Fine particles ($PM_{2.5}$) at a CAWNET background site in Central China: chemical compositions, seasonal variations and regional pollution events [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **86**: 193-202.
- [11] 郑晓霞, 李令军, 赵文吉, 等. 京津冀地区大气 NO_2 污染特征研究[J]. *生态环境学报*, 2014, **23**(12): 1938-1945. Zheng X X, Li L J, Zhao W J, *et al.* Spatial and temporal characteristics of atmospheric NO_2 in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(12): 1938-1945.
- [12] 高文康, 唐贵谦, 辛金元, 等. 京津冀地区严重光化学污染时段 O_3 的时空分布特征[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(5): 654-663. Gao W K, Tang G Q, Xin J Y, *et al.* Spatial-temporal variations of ozone during severe photochemical pollution over the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(5): 654-663.
- [13] Lin G, Fu J Y, Jiang D, *et al.* Spatio-temporal variation of $PM_{2.5}$ concentrations and their relationship with geographic and socioeconomic factors in China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2014, **11**(1): 173-186.

- [14] Huang F F, Li X, Wang C, *et al.* PM_{2.5} spatiotemporal variations and the relationship with meteorological factors during 2013-2014 in Beijing, China[J]. PLoS One, 2015, **10**(11): e0141642.
- [15] 廖晓农, 张小玲, 王迎春, 等. 北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2031-2044.
Liao X N, Zhang X L, Wang Y C, *et al.* Comparative analysis on meteorological condition for persistent haze cases in summer and winter in Beijing[J]. Environmental Science, 2014, **35**(6): 2031-2044.
- [16] 樊梦, 朱蓉, 朱克云, 等. 2015 年 11 月京津冀持续重污染过程模拟研究[J]. 高原山地气象研究, 2016, **36**(1): 7-14.
Fan M, Zhu R, Zhu K Y, *et al.* Numerical simulation study on lasting heavy air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region in November 2015 [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2016, **36**(1): 7-14.
- [17] 吴健生, 王茜, 李嘉诚, 等. PM_{2.5} 浓度空间分异模拟模型对比: 以京津冀地区为例[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2191-2201.
Wu J S, Wang X, Li J C, *et al.* Comparison of models on spatial variation of PM_{2.5} concentration: a case of Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2191-2201.
- [18] 潘慧峰, 王鑫, 张书宇. 重雾霾污染的溢出效应研究——来自京津冀地区的证据[J]. 科学决策, 2015, (2): 1-15.
Pan H F, Wang X, Zhang S Y. Severe haze pollution spillover effect: evidence from Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Scientific Decision Making, 2015, (2): 1-15.
- [19] Ebenstein A, Fan M Y, Greenstone M, *et al.* Growth, pollution, and life expectancy: China from 1991-2012 [J]. American Economic Review, 2015, **105**(5): 226-231.
- [20] 吴文景, 常兴, 邢佳, 等. 京津冀地区主要排放源减排对 PM_{2.5} 污染改善贡献评估[J]. 环境科学, 2017, **38**(3): 867-875.
Wu W J, Chang X, Xing J, *et al.* Assessment of PM_{2.5} pollution mitigation due to emission reduction from main emission sources in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Environmental Science, 2017, **38**(3): 867-875.
- [21] Wang Y S, Yao L, Wang L L, *et al.* Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China[J]. Science China Earth Sciences, 2014, **57**(1): 14-25.
- [22] Hu J L, Wang Y G, Ying Q, *et al.* Spatial and temporal variability of PM_{2.5} and PM₁₀ over the North China Plain and the Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Environment, 2014, **95**: 598-609.
- [23] Wang Z B, Fang C L. Spatial-temporal characteristics and determinants of PM_{2.5} in the Bohai Rim Urban Agglomeration [J]. Chemosphere, 2016, **148**: 148-162.
- [24] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [25] 李梦, 唐贵谦, 黄俊, 等. 京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 1935-1943.
Li M, Tang G Q, Huang J, *et al.* Characteristics of winter atmospheric mixing layer height in Beijing-Tianjin-Hebei Region and their relationship with the atmospheric pollution [J]. Environmental Science, 2015, **36**(6): 1935-1943.
- [26] 王跃思, 宋涛, 高文康, 等. 北京市大气污染治理现状及面临的机遇与挑战[J]. 中国科学院院刊, 2016, (9): 1082-1087.
Wang Y S, Song T, Gao W K, *et al.* The challenge and opportunity on preventing and controlling air pollution of Beijing [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, (9): 1082-1087.

CONTENTS

Correlation Analysis of the Urban Heat Island Effect and Its Impact Factors in China	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3987)
Application of Satellite Remote Sensing in NO _x Emission Control	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (3998)
Control Models and Effect Evaluation of Air Pollution in Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration	WANG Zhen-bo, LIANG Long-wu, LIN Xiong-bin, <i>et al.</i> (4005)
Pollution Characteristics of Aerosol Number Concentration in Winter and Spring in a Northern Suburb of Nanjing	WU Dan, ZHANG Fan, LIU Gang, <i>et al.</i> (4015)
Source Apportionment and Size Distribution of Aerosols at Lin'an Atmosphere Regional Background Station During Winter	SHI Shuang-shuang, WANG Hong-lei, ZHU Bin, <i>et al.</i> (4024)
Seasonal Variations in Particle Size Distribution and Water-soluble Ion Composition of Atmospheric Particles in Chengdu	TAO Yue-le, LI Qin-kai, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4034)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Quanzhou City	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4044)
Chemical Characteristics and Sources of Heavy Metals in Fine Particles in Beijing in 2011-2012	ZHOU Xue-ming, ZHENG Nai-jia, LI Ying-hong, <i>et al.</i> (4054)
Pollution Assessment and Source Analysis of Metals in PM _{2.5} in Haicang District, Xiamen City, China	ZHAO Li-si, YU Rui-lian, XU Ling-ling, <i>et al.</i> (4061)
Characteristics and Health Risk Assessment of Metallic Elements in PM _{2.5} Fraction of Road Dust	ZHANG Jing, ZHANG Yan-jie, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4071)
Seasonal Variations in PM ₁₀ and Associated Chemical Species in Jiuxian Mountain in Fujian Province	WEI Ya, LIN Chang-cheng, HU Qing-hua, <i>et al.</i> (4077)
Characteristics of C2-C6 Hydrocarbons During the Winter Air Pollution Period in Beijing Urban Area	LI Yue, WEI Wei, YANG Gan, <i>et al.</i> (4084)
Analysis of Atmospheric Particulate Matter Pollution Characteristics by LIDAR in Beijing During Spring Festival, 2016	SHI Lin-lin, LI Ling-jun, LI Qian, <i>et al.</i> (4092)
Influence Factors and Sensitivity of Ozone Formation in Langfang in the Summer	LI Lei, ZHAO Yu-mei, WANG Xu-guang, <i>et al.</i> (4100)
Impact of Human Activities on Water-Rock Interactions in Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (4108)
Distinguishing the Properties and Sources of the Dissolved Organic Matter in Karst Reservoir Water During Winter Using Three-Dimensional Fluorescence Spectrum Technology: A Case Study in Wulixia Reservoir of Guangxi Province	LU Xiao-xuan, PENG Wen-jie, LI Qiang, <i>et al.</i> (4120)
Analysis of Temporal and Spatial Variations in Trace Element Migration in Karst Critical Zone: An Example of Jiguan Cave, Henan	LIANG Sha, YANG Yan, ZHANG Na, <i>et al.</i> (4130)
Eutrophication and Characteristics of Cyanobacteria Bloom in the Summer in Guishi Reservoir	GOU Ting, MA Qian-li, WANG Zhen-xing, <i>et al.</i> (4141)
Spatial and Temporal Distribution of Chlorophyll a and Its Relationship to Algae and Environmental Factors in Aha Reservoir	LUO Yi-fu, LI Lei, LI Qiu-hua, <i>et al.</i> (4151)
Spatio-temporal Variations in Phytoplankton Community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4160)
Spatio-temporal Variations, Contamination and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in the Sediments of Chenghai Lake	YU Zhen-zhen, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (4169)
Characteristics of Phosphorus Output Through Runoff on a Red Soil Slope Under Natural Rainfall Conditions	ZUO Ji-chao, ZHENG Hai-jin, XI Tong-hang, <i>et al.</i> (4178)
Occurrence, Distribution and Health Risk of the Phthalate Esters in Riparian Soil in the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (4187)
Seasonal Distribution, Composition, and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in the Main Stream of the Luanhe River	WANG Yi-zhen, ZHANG Shi-lu, KONG Fan-qing, <i>et al.</i> (4194)
Occurrence and Human Exposure Risk Assessment of Organophosphate Esters in Drinking Water in the Weifang Binhai Economic-Technological Development Area	DONG Zheng, MA Yu-long, LI Jun-qi, <i>et al.</i> (4212)
Contamination Characteristics and Human Exposure to Organophosphate Flame Retardants in Road Dust from Suzhou City	LI Jing, WANG Jun-xia, XU Wan-ting, <i>et al.</i> (4220)
Cancer Risk of Human Intake of PAH-Contaminated Particles Based on Hand-to-Mouth Activities	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (4228)
Spatio-temporal Evolution of Groundwater Vulnerability Based on Spatial Autocorrelation	LIU Yu, LAN Shuang-shuang, ZHANG Yong-xiang, <i>et al.</i> (4236)
Preparation of Ag-AgI/CN/MA Composites and Their Visible-light Photocatalytic Performance	ZHANG Sai, ZHANG Li-li, HU Chun (4245)
Effect of <i>Eichhornia crassipes</i> on Ammonification and Denitrification Microorganisms in Eutrophic Freshwaters	LI Jie, JIANG Li-juan, WANG Xiao-lin, <i>et al.</i> (4253)
Utilization of Copper (II) Wastewater for Enhancing the Treatment of Chromium (VI) Wastewater in Microbial Fuel Cells	XIONG Xiao-min, WU Xia-yuan, JIA Hong-hua, <i>et al.</i> (4262)
Efficiency and Microecology of a Soil Infiltration System with High Hydraulic Loading for the Treatment of Swine Wastewater	SU Cheng-yuan, LIU Fan-fan, ZHONG Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effects of Bacteria on the Growth of and Lipid Accumulation in <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivated in Municipal Wastewater	TU Ren-jie, JIN Wen-biao, HAN Song-fang, <i>et al.</i> (4279)
Enhanced Antibiotic Resistant Bacteria Removal from Wastewater Treatment Plant by Different Disinfection Technologies	LIU Ya-lan, MA Cen-xin, DING He-zhou, <i>et al.</i> (4286)
Coking Wastewater Treatment Efficiency and Comparison of Acute Toxicity Characteristics of the AnMBR-A-MBR and A ² -MBR Processes	ZHU Jia-di, LI Fei-fei, CHEN Li-jun (4293)
Stability of the CANON Process Based on Real-Time Control Technologies	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (4302)
Improving Nitrogen and Phosphorus Removal from Reclaimed Water Using a Novel Sulfur/Iron Composite Filler	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (4309)
Start-up and Capacity Enhancement of a Partial Nitrification Pilot Reactor in Continuous Flow	ZHU Qiang, LIU Kai, DONG Shi-yu, <i>et al.</i> (4316)
Quick Start-up Performance of Combined ANAMMOX Reactor Based on Different Inoculated Sludge Types	LÜ Gang, LI Tian, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (4324)
Effect of Two-Stage Aeration on Nitrogen Removal Performance of Aerobic Granular Sludge	WANG Wen-xiao, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (4332)
Construction of a High Efficiency Anaerobic Digestion System for Vinegar Residue	ZHOU Yun-long, XU Zhi-yang, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (4340)
Comparison of Ecological Risk Assessment Based on the Total Amount and Speciation Distribution of Heavy Metals in Soil: A Case Study for Longyan City, Fujian Province	WANG Rui, CHEN Ming, CHEN Nan, <i>et al.</i> (4348)
Heavy Metal Contamination of Soils and Crops near a Zinc Smelter	CHEN Feng, DONG Ze-qin, WANG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4360)
Characteristics and Influencing Factors of CH ₄ Emissions from the Drawdown Area of the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (4370)
Effects of Plastic Film Mulching on Nitrous Oxide Emissions from a Vegetable Field	FENG Di, HAO Qing-ju, ZHANG Kai-li, <i>et al.</i> (4380)
Effects of Bamboo Biochar on Greenhouse Gas Emissions During the Municipal Sludge Composting Process	XIANG Qiu-jie, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4390)
Removal of Cd from Soil by <i>Aspergillus fumigatus</i> in a Semi-solid Culture	CHEN Yao-ning, WANG Yuan-nan, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4398)
Removal of Chlortetracycline and Morphological Changes in Heavy Metals in Swine Manure Using the Composting Process	WEN Qin-xue, CAO Yong-sen, CHEN Zhi-qiang (4405)
Remediation of Petroleum-Contaminated Soil Using a Bioaugmented Compost Technique	WU Man-li, CHEN Kai-li, YE Xi-qiong, <i>et al.</i> (4412)
Effects of Microbial Diversity on Soil Carbon Mineralization	AN Li-yun, LI Jun-jian, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4420)
Ozone Deposition and Risk Assessment for a Winter Wheat Field; Partitioning Between Stomatal and Non-stomatal Pathways	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (4427)
Progress in the Studies of Precipitation Chemistry in Acid Rain Areas of Southwest China	ZHOU Xiao-de, XU Zhi-fang, LIU Wen-jing, <i>et al.</i> (4438)