

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

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(卷终)

京津冀区域 PM _{2.5} 污染相互输送特征	王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲 (4897)
顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应	许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆 (4905)
基于多源数据的 PM _{2.5} 浓度时空分布预测与制图	肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)
华东区域 PM _{2.5} 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估	郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉 (4924)
南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征	张程, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 林梦凡 (4932)
菏泽市 PM _{2.5} 碳组分季节变化特征	刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 梁丹妮, 马威, 刘保双, 冯银厂, 张勤勤 (4943)
辽宁典型城市道路扬尘 PM ₁₀ 中水溶性无机离子组分特征及来源解析	张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝 (4951)
天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征	姚青, 刘子锐, 韩素芹, 蔡子颖, 刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思 (4958)
高原城市昆明公路隧道大气中 PM _{2.5} 理化特征分析	王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)
2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析	段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜 (4976)
不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响	楼狄明, 张子骏, 刘继凯, 谭丕强, 胡志远 (4983)
ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响	董小芳, 杨华玮, 张杰, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)
我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量	程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷 (5004)
新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征	杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷 (5012)
三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价	卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静 (5020)
三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征	程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 耿音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)
太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程	李艳利, 孙伟, 杨梓睿 (5039)
典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例	连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影 (5047)
缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征	马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇 (5056)
基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法	熊鸿斌, 陈雪, 张斯思 (5063)
北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (5074)
深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征	凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广 (5081)
供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析	刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪 (5090)
低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化	李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平 (5097)
臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨	刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励 (5106)
碱活化过一硫酸盐降解水中环丙沙星	葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖 (5116)
MIL-88A@MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯	王九妹, 关泽宇, 万金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华 (5124)
常温下加装脱硫装置的 MCBMBR 处理高硫酸盐有机废水试验	徐婷, 金艳青, 李勇 (5132)
载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收	成雪君, 王学江, 王浩, 张志昊, 赵建夫 (5139)
不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能	马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊 (5146)
ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化	吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良 (5154)
海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性	周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (5162)
游离氨 (FA) 对氨氧化过程氨逃逸影响试验	孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹 (5169)
西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构	康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾宽宇 (5174)
厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征	汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良 (5184)
SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化	岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽 (5192)
活性污泥中硝化螺菌 (Nitrospira) 的富集及其动力学参数	姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博 (5201)
pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响	张宁博, 李祥, 黄勇 (5208)
接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响	张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅 (5215)
活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比	孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军 (5222)
长期暴露下纳米 TiO ₂ 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响	李慧婷, 崔福义 (5229)
长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征	赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟 (5237)
不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异	张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯 (5247)
有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征	何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强 (5256)
上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价	郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振涛, 薛昱, 高品 (5262)
大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析	宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞 (5272)
工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应	杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成 (5282)
上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险	周雅, 毕春娟, 周泉潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一 (5292)
基施硅肥对土壤微生物有效性及水稻镉累积效应的影响	高子翔, 周航, 杨文弢, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒 (5299)
水稻对气态单质汞的吸收与挥发	尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊, 邓泓 (5308)
麦田 O ₃ 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算	赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清 (5315)
缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果	侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章 (5326)
生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N ₂ O 排放的影响	石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼 (5333)
成都平原不同类型沟渠 CO ₂ 、CH ₄ 和 N ₂ O 排放通量特征及其影响因素	冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏 (5344)
河流 CO ₂ 与 CH ₄ 排放研究进展	王晓峰, 袁兴中, 陈槐, 何奕忻, 罗珍, 刘恋, 何宗茂 (5352)
《环境科学》第 38 卷 (2017 年) 总目录	(5367)
《环境科学》征稿简则 (4950) 《环境科学》征订启事 (5031) 信息 (4923, 5105, 5161)	

京津冀区域 PM_{2.5} 污染相互输送特征

王燕丽, 薛文博*, 雷宇, 王金南, 武卫玲

(环境保护部环境规划院, 北京 100012)

摘要: 基于 CAMx-PSAT 空气质量模型, 对 2015 年京津冀区域 PM_{2.5} 污染及相互输送特征进行定量模拟, 建立了京津冀 13 个城市的 PM_{2.5} 传输矩阵。结果表明, 在年均尺度上京津冀区域 PM_{2.5} 以本地污染源贡献为主 (21.49% ~ 68.74%), 传输贡献为辅, 其中区域内传输贡献约为 13.31% ~ 54.62%, 区外贡献约为 13.32% ~ 45.02%。PM_{2.5} 传输特征呈现显著的时空差异性, 区域中部城市唐山、北京、天津、保定和石家庄 PM_{2.5} 受本地贡献主导, 在冬季尤其明显, 而受传输影响较大的城市多分布在区域边界且在南部集中。区内作为汇的城市有廊坊、衡水、承德、秦皇岛和邢台, 作为源的城市有天津、沧州、唐山、北京、石家庄和邯郸, 张家口和保定对区内城市输出和受区内输入基本持平。典型城市分析证明城市间 PM_{2.5} 污染交互影响, 北京与廊坊、保定、承德、天津和沧州等城市之间, 天津与廊坊、唐山、北京、沧州和保定等城市之间, 石家庄与邢台、衡水、保定、邯郸和廊坊之间均存在显著的 PM_{2.5} 相互输送。

关键词: PM_{2.5}; CAMx-PSAT; 京津冀; 区域传输矩阵; 本地贡献

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-4897-08 DOI: 10.13227/j.hjxk.201703282

Regional Transport Matrix Study of PM_{2.5} in Jingjinji Region, 2015

WANG Yan-li, XUE Wen-bo*, LEI Yu, WANG Jin-nan, WU Wei-ling

(Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China)

Abstract: By coupling particle source apportionment technology (PSAT) with a comprehensive air quality model with extensions (CAMx), the regional transport matrix of PM_{2.5} was built for 13 cities in the Jingjinji Region in 2015. Results showed that the major contributor to PM_{2.5} was local source emissions, contributing 21.49% - 68.74%. The internal transport from in-region sources contributed 13.31% - 54.62% and the external transport from out-region sources contributing 13.32% - 45.02% were also significant. The spatio-temporal distribution of the PM_{2.5} transport matrix was characterized by geographical, meteorological, and source patterns. Local emissions exerted the most significant impact on the central part of Jingjinji in winter, while regional transport contributed more to the southern region in other seasons. By assessing the input/output and activity of PM_{2.5} transport, Langfang, Hengshui, Chengde, Qinhuangdao, and Xingtai were receptors; Tianjin, Cangzhou, Tangshan, Beijing, Shijiazhuang, and Handan were sources, and Zhangjiakou and Baoding had a balanced transportation mode. The seasonal matrix of PM_{2.5} showed significant transport between Beijing and Langfang, Baoding, Chengde, Tianjin, Cangzhou, while the city list for Tianjin and Shijiazhuang differed slightly.

Key words: PM_{2.5}; CAMx-PSAT; Jingjinji Region; regional transport matrix; local source

过去二三十年我国经济发展迅猛, 燃煤、工业、机动车等多源污染叠加^[1-3], 由颗粒物(PM)、SO₂、NO_x等污染物导致的大气复合污染问题日趋严重, 其中细颗粒物 PM_{2.5} 对环境和公众健康的危害尤甚^[4, 5]。PM_{2.5} 粒径小, 在大气环流作用下, 传输距离远、影响范围大, 异地输送特征显著^[6, 7], 是京津冀、长三角、珠三角等重点城市群重污染频发的主要原因。为有效控制 PM_{2.5} 污染, 除了开展精细化源解析研究以靶向控制本地污染排放之外, 还应该打破行政区划限制, 研究网络结构的大气污染空间传导, 指导区域联防联控强化属地管理^[8-10]。已有研究有力证明了 PM_{2.5} 污染跨界传输效应^[11-14], 但多集中于单个重点城市, 而在系统研究区域性传输路径、传输通量及传输强度等方面研究不足^[15, 16]。本研究利用空气质量数值模型 CAMx

的颗粒物溯源技术 PSAT, 对 2015 年京津冀 PM_{2.5} 污染及传输特征进行定量模拟, 通过建立京津冀区域 13 个城市间的 PM_{2.5} 相互传输矩阵, 分析 PM_{2.5} 来源构成和传输矩阵的时空差异分布, 量化各源区对受体城市的贡献, 通过源汇分区, 差异化分配大气污染防治任务, 以期有效治理区域大气污染提供支撑。

1 材料与方法

1.1 CAMx 模型

空气质量数值模型 CAMx 在城市和区域等多种尺度上, 基于“一个大气”的框架, 对气态、颗粒态

收稿日期: 2017-03-31; 修订日期: 2017-06-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0208805)

作者简介: 王燕丽(1986~), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为空气质量模型等, E-mail: wangyl@caep.org.cn

* 通信作者, E-mail: xuewb@caep.org.cn

污染物进行综合模拟^[11],通过求解每个网格中每种污染物的物理化学变化方程来模拟排放、扩散、化学反应及污染物在大气中的去除过程.模型特点包括:双向嵌套及弹性嵌套、网格烟羽(PiG)模块、颗粒物溯源(PSAT)模块、臭氧和其他物质源灵敏性的直接去耦合法(DDM)等.

作为一种耦合在CAMx模型中的敏感性分析和过程分析综合方法,PSAT以示踪的方式获取有关PM_{2.5}及其前体物生消信息,并统计不同地区、不同源类以及边界条件boundary condition(BC)、初始条件initial condition(IC)对PM_{2.5}污染的贡献,其核心功能是模拟污染源与环境受体之间的响应关系.

1.2 模型设置

模拟区域:采用Lambert投影坐标系,中心经度为103°E,中心纬度为37°N,两条平行标准纬度分别为25°N和40°N.水平模拟范围为X方向(-2 690~2 690 km)、Y方向(-2 150~2 150 km),网格间距20 km,共将全国划分为270×216个网格,模拟区域垂直方向共设置14个气压层,层间距自下而上逐渐增大.

气象参数:CAMx模型所需要的气象场由中尺度气象模型WRF提供^[17],WRF模型与CAMx模型采用相同的空间投影坐标系,但模拟范围大于CAMx模拟范围,其水平模拟范围为X方向(-3 600~3 600 km)、Y方向(-2 520~2 520 km),网格间距20 km,共将研究区域划分为360×252个网格.垂直方向共设置30个气压层,层间距自下而上逐渐增大.WRF模型的初始场与边界场数据采用美国国家环境预报中心(NCEP)提供的6 h一次、1°分辨率的FNL全球分析资料^[18],并利用NCEP ADP资料进行客观分析及四维同化^[19],每日初始化一次,spinup时间为6h.CAMx具体模型参数设置和WRF参数化方案见表1和表2^[11].

模拟时段:2015年1、4、7、10月这4个典型

表1 CAMx模型参数设置

Table 1 Parameters used in CAMx

模型参数	CAMx	模型参数	CAMx
模型版本	6.3	垂直扩散方案	隐式欧拉
网格嵌套方式	单层网格	干沉降方案	Wesely89
水平分辨率	20 km	气相化学机制	CB05
垂直分层数	14	气溶胶化学机制	CF
水平平流方案	PPM	光化学速率	In-line
垂直对流方案	隐式欧拉	网格烟羽模块	关
水平扩散方案	显式同步	初始、边界条件	默认

表2 WRF参数化方案

Table 2 Parameterization scheme for WRF

参数化方案	所选方案名称
微物理过程方案	WSM6
长波辐射方案	New Goddard
短波辐射方案	RRTM
近地层方案	Pleim Xiu
边界层方案	ACM2
积云对流方案	Kain-Fritsch

月,分别代表春、夏、秋、冬季,扣除UTC时区差值和CAMx模型的spinup时段,实际模拟时段为每月3号起至月底.

污染源分类:依据城市行政区划,将京津冀区域内北京、天津和石家庄等13个城市划分为13个源区,每个分区代表各城市本地排放源(本地),将京津冀区域内除本城市之外的其它12城市的影响定义为对该城市的区内传输贡献(区内);加上边界场(BC)和京津冀区域外周围省市污染源传输贡献(区外),本研究共计15个有效污染源分区,公式表达为:本地+区内+区外+BC=100%,其中区内、区外、BC皆为传输贡献.

受体城市:本研究区域包括北京、天津和石家庄等13个城市,区内共80个国控空气质量监测点作为受体点,将各个城市辖区内受体点模拟数据取平均值,代表该城市PM_{2.5}浓度水平,京津冀区域地形及城市监测点位分布见图1.

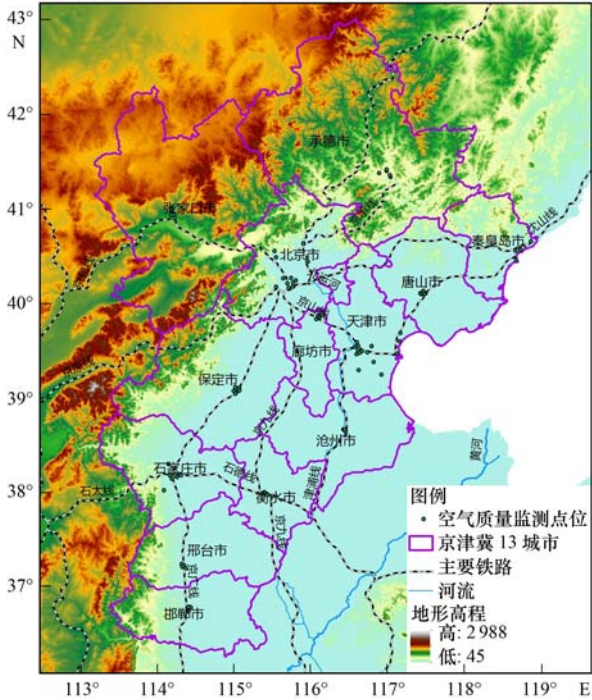


图1 京津冀区域地形及受体城市监测点位分布示意

Fig. 1 Modeling domain and monitoring sites locations in the Jingjinji Region

1.3 排放清单

CAMx 模型所需排放清单的化学物种主要包括 SO₂、NO_x、PM、NH₃ 和 VOCs 等多种污染物,不同物种排放清单的具体处理规则不同:依据全国环境统计数据,对工业源、生活源及移动源排放数据进行空间分配、时间分配与化学分配^[20],建立我国 2013 年 20 km 分辨率人为源 SO₂、NO_x 网格化排放清单;人为源 PM、NH₃、VOCs(含主要组分)等排放数据采用清华大学 MEIC 排放清单^[21],生物源 VOCs 排放数据通过 MEGAN 天然源模型在线计算^[22].

2 模拟效果验证

因为排放源清单的不确定性和反应机理的不完整性,CAMx-PSAT 模型模拟存在一定误差^[11,14],利用环境监测站点同期 PM_{2.5} 日均浓度数据,分 4 个典型月验证本次模型模拟.结果显示模型模拟值与观测值($n = 1\,495$, $P < 0.01$)具有较好的相关性(图 2),标准化平均偏差 NMB 为 -15.56,标准化平均误差 NME 为 41.49,基本满足美国 EPA 关于模型验证的相关要求^[23].综合考虑各项评估指标,本研究所选用的空气质量模型及模拟参数设置等对

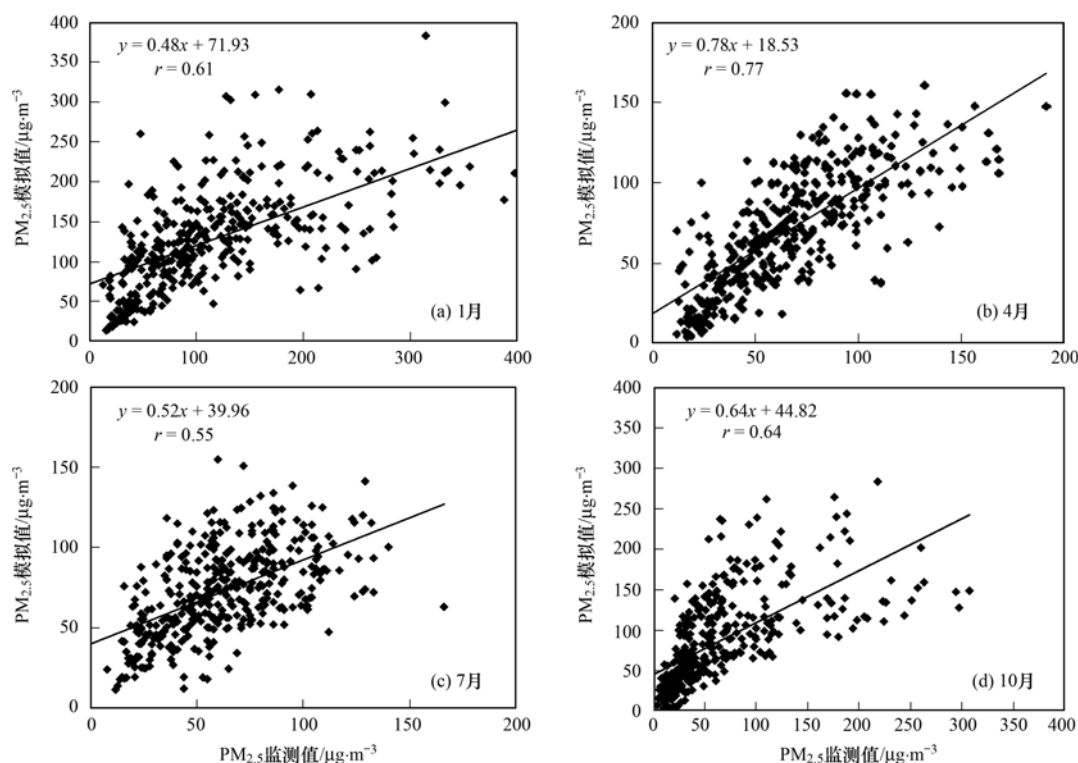


图2 模拟值与监测值对比

Fig. 2 Comparison between modeling data and monitoring data

PM_{2.5}的模拟效果较好,可用于分析京津冀区域 PM_{2.5}污染时空分布特征.

3 结果与讨论

3.1 京津冀区域 PM_{2.5}传输矩阵

基于 CAMx-PSAT 模型模拟,获得 2015 年京津冀区域 13 个城市间 PM_{2.5}相互传输矩阵.如表 3 所示,在年均尺度上,京津冀区域内多数城市 PM_{2.5}以本地污染源贡献为主(21.49% ~ 68.74%),传输贡献为辅,其中区内传输贡献约为 13.31% ~ 54.62%,区外贡献约为 13.32% ~ 45.02%.

京津冀 13 城市中 PM_{2.5}浓度受本地贡献最显著

的是唐山和北京,本地贡献分别为 68.74% 和 66.29%,其次是天津、保定、石家庄,受本地贡献分别为 55.67%、54.22% 和 52.16%;除了本地源贡献的 PM_{2.5},唐山主要受天津、秦皇岛、北京等相邻城市影响,区内贡献合计 13.31%,来自区域外远距离输送超过区内输送,区外贡献了 17.21%;北京主要受区内传输影响,由廊坊、天津、保定等城市对北京的区内合计贡献为 19.85%,而区外传输贡献为 13.32%;天津、保定、石家庄,受区内贡献与区外贡献水平整体相当,均占五分之一左右.其余 8 个城市受传输贡献均超过 50%,其中衡水、秦皇岛、邯郸、邢台的 PM_{2.5}浓度受区外传输影响显著,分别为

45.02%、43.67%、40.18%和37.14%，另外受区内传输贡献分别为29.12%、21.42%、19.86%和28.74%；而廊坊因地理位置特殊，受北京、天津等

夹击，来自区内城市对其的传输贡献显著，区内贡献合计高达54.62%，受区外贡献、本地贡献相对较小，分别为22.77%、21.49%。

表3 京津冀13城市间PM_{2.5}污染传输矩阵

Table 3 Regional transport matrix of PM_{2.5} in the Jingjinji Region in 2015

受体城市	源分区贡献率/%													区外	BC
	北京	天津	石家庄	唐山	秦皇岛	邯郸	邢台	保定	张家口	承德	沧州	廊坊	衡水		
北京	66.29	3.45	0.91	2.22	0.24	0.52	0.49	3.16	1.47	0.42	1.68	4.81	0.49	13.32	0.54
天津	2.23	55.67	0.91	3.55	0.44	0.61	0.56	1.95	0.32	0.34	5.73	3.53	0.75	22.36	0.74
石家庄	0.85	0.88	52.16	0.83	0.16	2.51	4.28	5.16	0.27	0.12	1.69	0.66	1.70	27.72	0.83
唐山	1.24	4.73	0.51	68.74	1.48	0.37	0.32	0.81	0.23	0.89	1.47	0.92	0.33	17.21	0.61
秦皇岛	1.28	2.68	0.72	10.56	33.23	0.54	0.45	0.99	0.30	1.03	1.66	0.76	0.44	43.67	1.35
邯郸	0.71	0.81	3.54	0.76	0.15	38.90	9.06	1.75	0.20	0.11	1.29	0.53	0.96	40.18	0.84
邢台	0.83	0.93	6.64	0.86	0.17	13.20	33.00	2.36	0.24	0.12	1.52	0.63	1.22	37.14	0.91
保定	1.95	1.69	4.22	1.29	0.24	1.26	1.51	54.22	0.66	0.17	5.01	2.15	2.28	22.34	0.84
张家口	3.69	1.59	2.00	1.65	0.25	1.02	0.85	3.90	43.25	0.31	1.67	1.29	0.65	35.25	2.27
承德	4.55	4.97	1.55	11.17	0.87	0.98	0.89	2.55	0.83	35.03	2.46	2.26	0.81	29.15	1.62
沧州	1.57	3.88	1.33	1.69	0.35	0.97	0.96	1.58	0.30	0.25	43.11	2.04	1.76	38.98	1.02
廊坊	15.35	18.28	1.42	4.44	0.47	0.86	0.82	5.45	0.83	0.56	5.12	21.49	1.04	22.77	0.93
衡水	1.22	1.53	4.88	1.26	0.27	2.51	6.40	3.62	0.29	0.18	5.77	1.19	24.54	45.02	1.05

3.2 PM_{2.5}传输矩阵时空差异分析

受城市地理位置、气候季风、经济结构、工业类型和污染源分布等影响，不同城市PM_{2.5}污染程度、来源构成不同^[24,25]，本研究基于京津冀区域PM_{2.5}传输矩阵，分析PM_{2.5}污染由本地贡献、传输贡献占比的时空差异分布。

如图3所示，北京、天津、石家庄、唐山和保定等区域中部城市以本地贡献为主，与已有的源解析结果一致^[26]，PM_{2.5}本地源包括燃煤、工业、机动车等。产业结构偏重、污染排放量大是上述城市PM_{2.5}污染严重的根本原因，再加上受燕山、太行山夹持的山谷地形，大气污染扩散条件较差，受区内、区外传输贡献并不显著。受传输影响超过本地贡献的城市多分布在区域边界

且在南部集中，与京津冀区域内PM_{2.5}污染“南重北轻”格局有关，其中邯郸、邢台、衡水、保定是本次研究CAMx-PSAT模型模拟的高值区，与同期监测结果基本吻合，受区域外围如山东、河南等周边省份的污染物输入影响较大，受区内其它城市的贡献相对较小；廊坊地理上位于北京、天津之间，受其传输影响大，区内传输对其贡献高达54.62%。

传输矩阵空间上的差异分布主要受城市地理和污染源布局影响，而时间上的差异主要受季风等气象条件影响^[24]。京津冀区域不同季节的主导风向、风速不同，污染物传输路径和强度会发生变化，导致各城市PM_{2.5}的来源构成呈现季节差异。从全年尺度看，以本地贡献为主的城市有：北京、天津、石

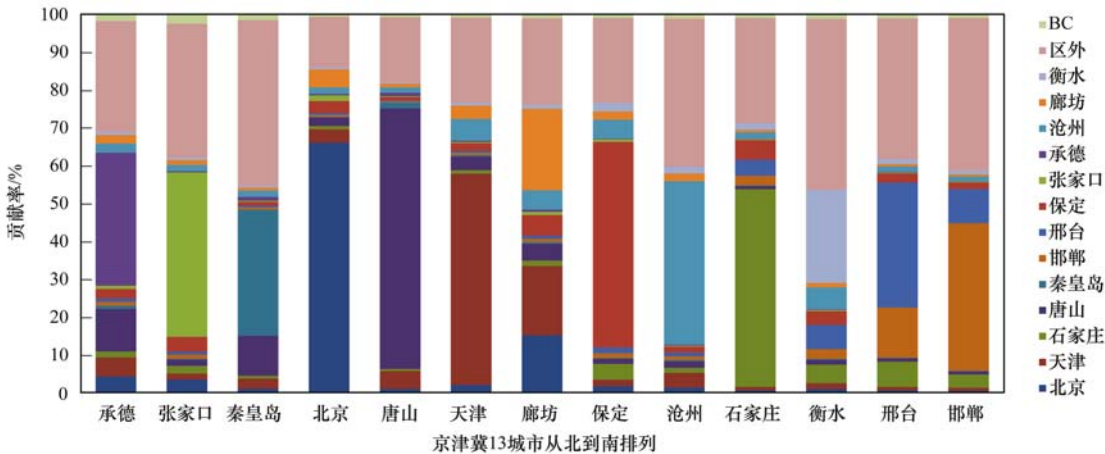


图3 京津冀PM_{2.5}污染传输贡献空间差异

Fig. 3 Spatial difference in the PM_{2.5} transport matrix in the Jingjinji Region

家庄、唐山和保定, 以区内传输贡献为主有廊坊, 以区外传输贡献为主有秦皇岛、衡水; 而邯郸、邢台、张家口、承德和沧州, 由于地处京津冀区域边界, 受季风主导的传输影响变化剧烈, 其 $PM_{2.5}$ 来源构成随季节发生变化。

将本地贡献与区内贡献、区外贡献比较, 分析不同季节的主控单因子。如图 4 所示, 在污染相对

最重的冬季代表月 1 月, 除了秦皇岛、廊坊和衡水其余 10 个城市均以本地贡献为主, 在春季 4 月, 北京、天津、石家庄、唐山、保定和张家口这 6 个城市以本地贡献为主, 夏季 7 月仅承德、廊坊和衡水以传输为主, 以本地贡献为主的城市回升至 10 个, 在秋季 10 月仅北京、天津、石家庄、唐山和保定这 5 个城市以本地为主。

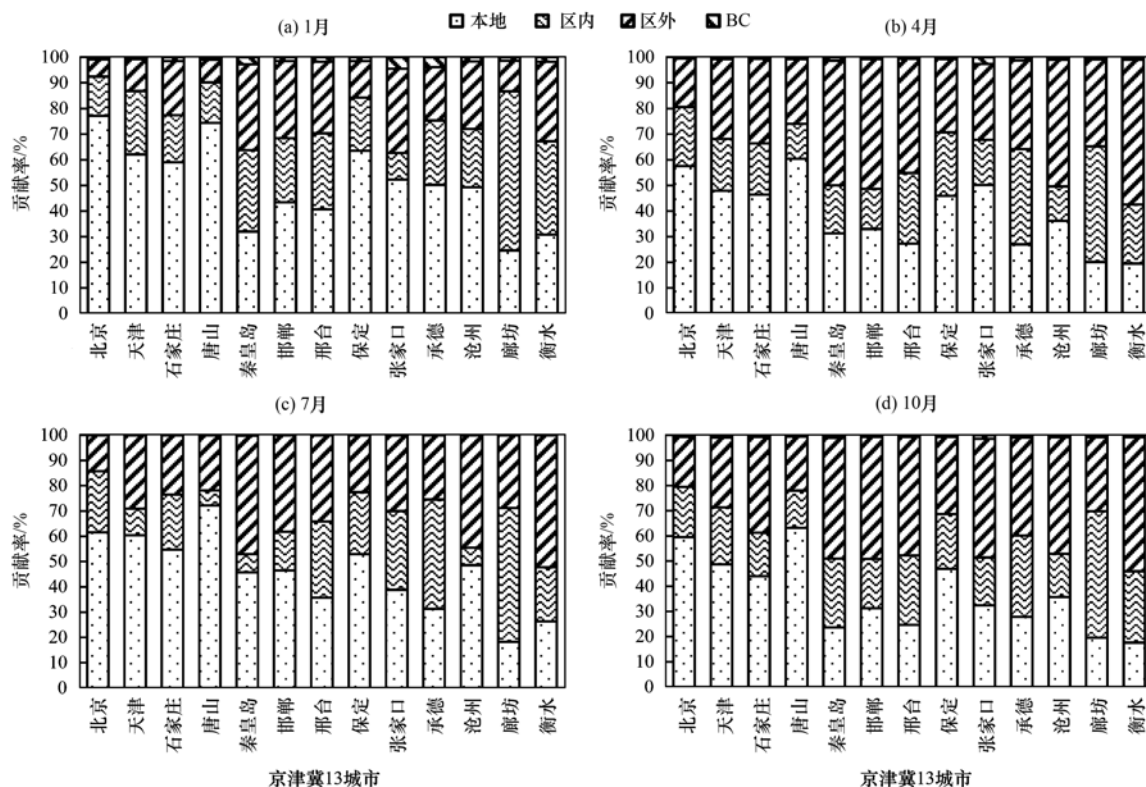


图 4 京津冀 $PM_{2.5}$ 污染传输贡献季节差异

Fig. 4 Seasonal difference in the $PM_{2.5}$ transport matrix in the Jingjinji Region

3.3 京津冀区域内各城市 $PM_{2.5}$ 源汇分区

京津冀区域 $PM_{2.5}$ 传输矩阵表明 13 个城市之间相互输送显著, 但各城市之间交互影响程度不同。本研究根据 $PM_{2.5}$ 传输矩阵计算传输通量, 识别传输通道核心城市, 根据净输出量对区域进行源汇分区, 分析京津冀区域各城市 $PM_{2.5}$ 污染的输入输出平衡性和传输活性。

每个城市既有作为“受体”受到区域范围内其他城市输入 $PM_{2.5}$, 又有作为“排放源”对区域范围内其他城市输出 $PM_{2.5}$ 。各城市输入、输出之和即为该城市传输通量 C_{flux} , 两者之差表示区域对该城市的净输入量 C_{net} , 公式表示如下:

$$C_{flux} = C_{in} + C_{out} \quad (1)$$

$$C_{net} = C_{in} - C_{out} \quad (2)$$

式中, C_{in} 为“受体”城市受到区域范围内其他城市

输入的 $PM_{2.5}$, C_{out} 为“排放源”城市对区域范围内其他城市输出的 $PM_{2.5}$ 。

结果显示(图 5), 传输通量较大的城市有 10 个, C_{flux} 均超过 $35 \mu g \cdot m^{-3}$, 反映京津冀区域内传输效应显著。结合《京津冀大气污染防治强化措施》所列重点管控城市和地理位置、气象场等参数, 可归为三条污染传输通道并估算其传输通量。①东部通道: 唐山; ②东南通道: 沧州、天津、廊坊、北京; ③西南通道: 邯郸、邢台、石家庄、衡水、沧州和保定; 其中西南通道和东南通道是华北平原大气流场中的两个风场辐合带的显性结果。传输通量大, 表明该通道上污染物相互输送显著、积累叠加明显, 应重点对其加大管控力度, 以控制京津冀 $PM_{2.5}$ 污染。

传输通量 C_{flux} 仅反映通道城市传输活性, 要明确其输入输出平衡性还需分析净输入量 C_{net} 。污

染输入城市 $C_{net} > 0$ 即该城市受传输输入大于其作为排放源的输出,即为汇,区内作为汇的城市依次有:廊坊、衡水、承德、秦皇岛和邢台;污染输出城市 $C_{net} < 0$ 即该城市作为排放源的输出大于其受传输贡献输入,即为源,区内作为源的城市依次有天津、沧州、唐山、北京、石家庄和邯郸;张家口和保定 $C_{net} \approx 0$, 表示其对区内城市输出和受区内输入基本持平,但保定的传输通量 C_{flux} 大, 主要与石家庄、衡水、邯郸和邢台相互输送 $PM_{2.5}$, 其对区域空气质量和周边城市的影响不容忽视.

津、沧州、唐山、北京、石家庄和邯郸;张家口和保定 $C_{net} \approx 0$, 表示其对区内城市输出和受区内输入基本持平,但保定的传输通量 C_{flux} 大, 主要与石家庄、衡水、邯郸和邢台相互输送 $PM_{2.5}$, 其对区域空气质量和周边城市的影响不容忽视.

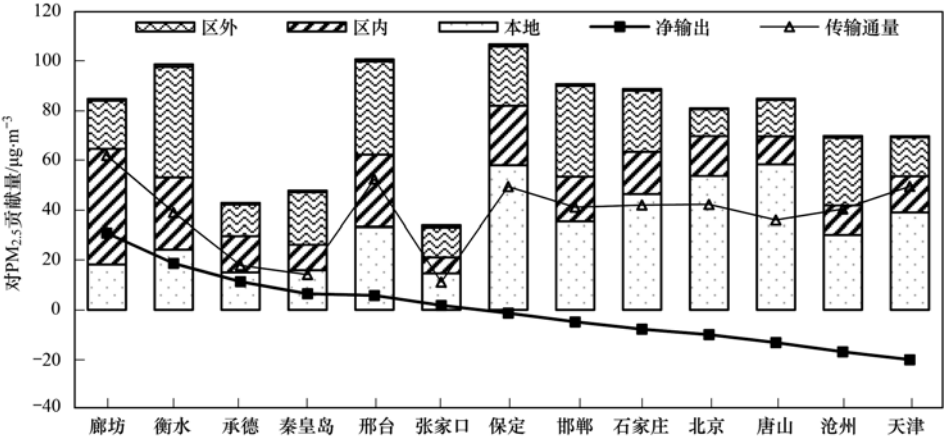


图 5 京津冀区内城市间 $PM_{2.5}$ 传输通量

Fig. 5 Transport fluxes of $PM_{2.5}$ between cities in the Jingjinji Region

3.4 典型城市 $PM_{2.5}$ 传输矩阵分析

选择北京、天津和石家庄这 3 个典型城市, 以典型月份 1、4、7、10 月和全年模拟值分析 $PM_{2.5}$ 季均、年均传输矩阵, 研究其 $PM_{2.5}$ 来源构成季节差异和输入输出平衡性. 结果显示, 北京、天津和石家庄全年均以本地贡献为主, 尤其在冬季本地贡献占绝对主导, 具体贡献率随季节有所波动(表 4).

年均传输矩阵显示, 2015 年北京、天津和石家庄 $PM_{2.5}$ 受本地贡献分别为 66.29%、55.67% 和 52.16%, 模型模拟的 3 个典型城市受本地贡献水平与源解析结果基本吻合(源解析结果显示北京、天津、石家庄的 $PM_{2.5}$ 来源中本地污染排放影响分别占 64% ~ 72%、66% ~ 78%、70% ~ 77%); 传

输部分, 北京主要受廊坊、天津等京津冀区域内城市传输影响, 合计区内贡献 19.85%, 高于区外传输贡献的 13.32%; 区内对天津贡献较大的城市依次有沧州、廊坊、唐山、北京和保定等, 合计贡献 20.92%, 略低于区外传输贡献的 22.36%; 区内对石家庄贡献较大有保定、邢台、邯郸、沧州和衡水等, 合计贡献 19.12%.

季均传输矩阵显示, 本地贡献在冬季最显著, 在 2015 年 1 月分别对北京、天津和石家庄贡献了 77.05%、62.00% 和 58.90%, 同期监测数据显示京津冀区域共发生 4 次大范围重污染, 冬季燃煤取暖等本地污染排放持续积累, 再加上冬季常出现静稳、逆温天气, 导致重污染频发; 在春、夏、秋季,

表 4 典型城市 $PM_{2.5}$ 月均传输矩阵

Table 4 Monthly regional transport matrix of $PM_{2.5}$ in key cities

受体城市		贡献率/%				
		1 月	4 月	7 月	10 月	年均
北京	本地	77.05	57.50	61.57	59.45	66.29
	区内	15.26	23.02	24.23	19.92	19.85
	区外	6.63	18.87	14.17	19.88	13.32
	BC	0.91	0.49	0.02	0.62	0.54
天津	本地	62.00	47.86	60.42	48.62	55.67
	区内	24.63	20.11	10.50	22.71	20.92
	区外	12.48	31.10	29.06	27.63	22.36
	BC	0.68	0.70	0.03	0.90	0.74
石家庄	本地	58.90	46.37	54.70	44.00	52.16
	区内	18.30	19.88	21.80	17.24	19.12
	区外	21.01	32.88	23.45	38.00	27.72
	BC	1.53	0.62	0.04	0.64	0.83

受季风影响,传输贡献显著上升,京津冀区域春季主导西北风向,来自区域外围远距离传输明显增强,夏、秋季主导东南风、南风,天津、唐山、廊坊和保定等区内城市对北京、天津和石家庄 $\text{PM}_{2.5}$ 输入明显。

除了对本地贡献,北京 $\text{PM}_{2.5}$ 主要输出给廊坊、保定、承德、天津和沧州等城市,也受以上城市输入 $\text{PM}_{2.5}$ 影响较大(如图6),北京的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染,既需要加大北京自身管控力度,也需要着力

减少跨界传输影响,比如解决周边地区高架源问题;天津主要与廊坊、唐山、北京、沧州和保定等城市之间传输较显著,石家庄主要与邢台、衡水、保定、邯郸和廊坊等城市相互输送 $\text{PM}_{2.5}$ 。以上关于城市间交互影响程度的传输贡献分析,为京津冀“核心区”6市(北京+廊坊和保定、天津+唐山和沧州)的细化和加强提供指导,在京津冀及周边地区形成治污合力,以实现共同改善区域环境空气质量的目标。

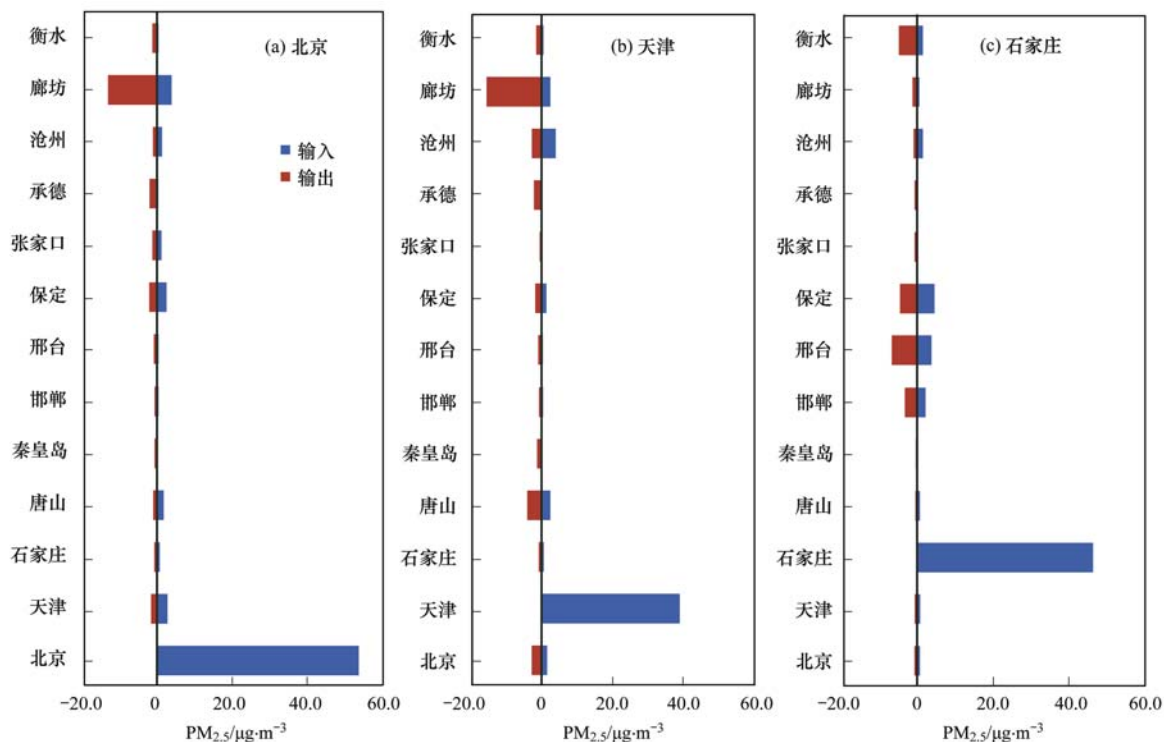


图6 京津冀区内典型源城市 $\text{PM}_{2.5}$ 输入输出平衡分析

Fig. 6 Regional transport matrix of $\text{PM}_{2.5}$ in the Jingjinji Region in 2015

4 结论

(1)在年均尺度上京津冀区域 $\text{PM}_{2.5}$ 以本地污染源贡献为主,传输贡献为辅,其中受本地贡献约为21.49%(廊坊)~68.74%(唐山),区内贡献约为13.31%(唐山)~54.62%(廊坊),区外贡献为13.32%(北京)~45.02%(衡水).受本地贡献超过50%的城市有:唐山、北京、天津、保定和石家庄;受传输贡献超过50%的有秦皇岛、邯郸、邢台、衡水、张家口、沧州、承德和廊坊。

(2) $\text{PM}_{2.5}$ 污染传输矩阵呈现明显的时空分布特征,中部城市多以本地贡献为主,而以传输贡献为主的城市多分布在区域边界且在南部集中;在1月、7月,区域内多数城市 $\text{PM}_{2.5}$ 以本地贡献为主,

在4月、10月,受季风影响区外传输贡献提升显著。

(3) $\text{PM}_{2.5}$ 输入输出平衡性和传输活跃性分析结果显示,区内作为汇的城市有廊坊、衡水、承德、秦皇岛和邢台,作为源的城市有天津、沧州、唐山、北京、石家庄和邯郸,张家口和保定对区内城市输出和受区内输入基本持平。

(4)典型城市北京、天津和石家庄全年均以本地贡献为主,在冬季占绝对主导,具体贡献率随季节有所波动;北京与廊坊、保定、承德、天津和沧州等城市之间 $\text{PM}_{2.5}$ 传输显著,天津主要与廊坊、唐山、北京、沧州和保定等城市相互传输,石家庄主要与邢台、衡水、保定、邯郸和廊坊等城市相互输送 $\text{PM}_{2.5}$ 。

参考文献:

- [1] 谢绍东, 张远航, 唐孝炎. 我国城市地区机动车污染现状与趋势[J]. 环境科学研究, 2000, 13(4): 22-25, 38.
Xie S D, Zhang Y H, Tang X Y. Current situation and trend of motor vehicle exhaust pollution in urban areas of China [J]. Research of Environmental Sciences, 2000, 13(4): 22-25, 38.
- [2] 曹军骥. PM_{2.5}与环境[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
Cao J J. PM_{2.5} and the environment in China [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [3] 贺克斌, 杨复沫, 段凤魁, 等. 大气颗粒物与区域复合污染[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [4] 谢元博, 陈娟, 李巍. 雾霾重污染期间北京居民对高浓度PM_{2.5}持续暴露的健康风险及其损害价值评估[J]. 环境科学, 2014, 35(1): 1-8.
Xie Y B, Chen J, Li W. An assessment of PM_{2.5} related health risks and impaired values of beijing residents in a consecutive high-level exposure during heavy haze days[J]. Environmental Sciences, 2014, 35(1): 1-8.
- [5] 阚海东, 陈秉衡. 我国大气颗粒物暴露与人群健康效应的关系[J]. 环境与健康杂志, 2002, 19(6): 422-424.
Kan H D, Chen B H. Analysis of exposure-response relationships of air particulate matter and adverse health outcomes in China [J]. Journal of Environment Health, 2002, 19(6): 422-424.
- [6] 王自发, 李丽娜, 吴其重, 等. 区域输送对北京夏季臭氧浓度影响的数值模拟研究[J]. 自然杂志, 2008, 30(4): 194-198.
Wang Z F, Li L N, Wu Q Z, et al. Simulation of the impacts of regional transport on summer ozone levels over Beijing [J]. Chinese Journal of Nature, 2008, 30(4): 194-198.
- [7] 王丽涛. 北京地区空气质量模拟和控制情景研究[D]. 北京: 清华大学, 2006. 34-47.
- [8] 孟伟, 高庆先, 张志刚, 等. 北京及周边地区大气污染数值模拟研究[J]. 环境科学研究, 2006, 19(5): 11-18.
Meng W, Gao Q X, Zhang Z G, et al. The numerical study of atmospheric pollution in beijing and its surrounding regions[J]. Research of Environmental Sciences, 2006, 19(5): 11-18.
- [9] 刘华军, 刘传明. 京津冀地区城市间大气污染的非线性传导及其联动网络[J]. 中国人口科学, 2016, (2): 84-95.
- [10] 雷宇, 宁森, 孙亚梅. 建立大气治理长效机制留住“APEC蓝”[J]. 环境保护, 2014, 42(24): 36-39.
Lei Y, Ning M, Sun Y M. Establish long-term effective mechanism of atmospheric governance to keep "APEC Blue" [J]. Environmental Protection, 2014, 42(24): 36-39.
- [11] 薛文博, 付飞, 王金南, 等. 中国PM_{2.5}跨区域传输特征数值模拟研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(6): 1361-1368.
Xue W B, Fu F, Wang J N, et al. Numerical study on the characteristics of regional transport of PM_{2.5} in China[J]. China Environmental Science, 2014, 34(6): 1361-1368.
- [12] 王晓琦, 郎建奎, 程水源, 等. 京津冀及周边地区PM_{2.5}传输规律研究[J]. 中国环境科学, 2016, 36(11): 3211-3217.
Wang X Q, Lang J L, Cheng S Y, et al. Study on transportation of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) and its surrounding area[J]. China Environmental Science, 2016, 36(11): 3211-3217.
- [13] 蔺旭东, 孙颖, 张孟强, 等. 京津冀地区大气污染物来源及异地输送路径分析[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2015, 25(6): 29-34.
Lin X D, Sun Y, Zhang M Q, et al. Analysis on the source and off-site transportation paths of air pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Journal of Environmental Management College of China, 2015, 25(6): 29-34.
- [14] 刘旭艳. 京津冀PM_{2.5}区域传输模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 2015. 59-72.
Liu X Y. Modeling research on the regional transport of PM_{2.5} over Jing-Jin-Ji region[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. 59-72.
- [15] 吕炜, 李金凤, 王雪松, 等. 长距离污染传输对珠江三角洲区域空气质量影响的数值模拟研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(1): 30-41.
Lü W, Li J F, Wang X S, et al. Numerical modeling on the impact of long-range transport of air pollutants on the regional air quality in the Pearl River Delta [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(1): 30-41.
- [16] Steets D G, Fu J S, Jang C J, et al. Air quality during the 2008 Beijing Olympic Games [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(3): 480-492.
- [17] National Center for Atmospheric Research. WRF USERS PAGE [EB/OL]. <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/>.
- [18] National Center for Atmospheric Research. CISM research data archive [EB/OL]. <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>.
- [19] NCEP ADP Global Surface Observational Weather Data [EB/OL]. <http://rda.ucar.edu/datasets/ds461.0/>, 2016.
- [20] 第一次全国污染源普查资料编纂委员会. 污染源普查技术报告[R]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [21] Multi-resolution emission inventory for China [EB/OL]. <http://www.mieimodel.org/>.
- [22] Emissions of atmospheric compounds and compilation of ancillary data [EB/OL]. http://eccad.sedoo.fr/eccad_extract_interface, 2013.
- [23] United States Environmental Protection Agency (USEPA). Clean Air Interstate Rule [EB/OL]. <https://www.epa.gov/sips-md/maryland-sip-clean-air-interstate-rule>, 2013.
- [24] 赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 等. 北京地区冬春PM_{2.5}和PM₁₀污染水平时空分布及其与气象条件的关系[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 418-427.
Zhao C X, Wang Y Q, Wang Y J, et al. Temporal and spatial distribution of PM_{2.5} and PM₁₀ pollution status and the correlation of particulate matters and meteorological factors during winter and spring in Beijing [J]. Environmental Science, 2014, 35(2): 418-427.
- [25] 蒲维维, 石雪峰, 马志强, 等. 大气传输路径对上甸子本底站气溶胶光学特性的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(2): 379-387.
Pu W W, Shi X F, Ma Z Q, et al. Impact of atmospheric pollutants transport pathways on aerosol optical properties at Shangdianzi background station [J]. Environmental Science, 2015, 36(2): 379-387.
- [26] 李璇, 聂滕, 齐琚, 等. 2013年1月北京市PM_{2.5}区域来源解析[J]. 环境科学, 2015, 36(4): 1148-1153.
Li X, Nie T, Qi J, et al. Regional source apportionment of PM_{2.5} in Beijing in January 2013 [J]. Environmental Science, 2015, 36(4): 1148-1153.

CONTENTS

Regional Transport Matrix Study of PM _{2.5} in Jingjinji Region, 2015	WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, <i>et al.</i> (4897)
Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks	XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, <i>et al.</i> (4905)
Space-Time Estimations and Mapping of PM _{2.5} Fine Particulates Based on Multi-source Data	XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, <i>et al.</i> (4913)
Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM _{2.5} in East China	YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, <i>et al.</i> (4924)
Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing	ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (4932)
Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Heze	LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (4943)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM _{2.5} in Selected Cities in Liaoning Province	ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4951)
Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin	YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4958)
Physico-chemical Characteristic Analysis of PM _{2.5} in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming	WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015	DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, <i>et al.</i> (4976)
Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus	LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, <i>et al.</i> (4983)
Influence of ENSO Events on the Hydrogen ($\delta^2\text{H}$) and Oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai	DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (4991)
Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China	CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (5004)
Spatial and Temporal Variability of CO ₂ Emissions from the Xin'anjiang Reservoir	YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, <i>et al.</i> (5012)
Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area	ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, <i>et al.</i> (5020)
Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir	CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, <i>et al.</i> (5032)
Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas; A Case in the Taizi River Basin	LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui (5039)
Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall; A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (5047)
Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain	MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, <i>et al.</i> (5056)
Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model	XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si (5063)
Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (5074)
Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen	LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, <i>et al.</i> (5081)
Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems	LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (5090)
Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (5097)
Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, <i>et al.</i> (5106)
Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water	GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, <i>et al.</i> (5116)
MIL-88A@MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate	WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (5124)
Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature	XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong (5132)
Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolite	CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, <i>et al.</i> (5139)
Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (5146)
Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater	LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (5154)
Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (5162)
Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process	SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, <i>et al.</i> (5169)
Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an	KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (5174)
Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX	WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (5184)
Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms	YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (5192)
Enrichment of <i>Nitrospira</i> in Activated Sludge and Kinetic Characterization	YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, <i>et al.</i> (5201)
Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong (5208)
Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor	ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (5215)
Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitrification in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (5222)
Long-term Impacts of TiO ₂ Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor	LI Hui-ting, CUI Fu-yi (5229)
Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta	ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, <i>et al.</i> (5237)
Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers	ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (5247)
Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir	HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5256)
Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai	GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, <i>et al.</i> (5262)
Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City	SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, <i>et al.</i> (5272)
Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area	YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, <i>et al.</i> (5282)
Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai	ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, <i>et al.</i> (5292)
Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants	GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5299)
Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice	SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, <i>et al.</i> (5308)
Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, <i>et al.</i> (5315)
Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, <i>et al.</i> (5326)
Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N ₂ O Emission in the North China Plain	SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, <i>et al.</i> (5333)
Flux Characteristics of CO ₂ , CH ₄ , and N ₂ O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain	FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, <i>et al.</i> (5344)
Review of CO ₂ and CH ₄ Emissions from Rivers	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, <i>et al.</i> (5352)