

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期
Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM _{2.5} 污染防治的健康效益评估	张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震 (513)
区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估	武文琪, 张凯山 (523)
2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估	姚森, 张哈宇, 王晓琦, 杨书申 (534)
广州市2020年春节期间烟花爆竹燃放对空气质量的影响	裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅 (546)
长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性	夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青 (556)
南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析	张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗 (564)
天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征	丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂 (574)
输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析	张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖 (584)
洛阳市秋冬季PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价	齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青 (595)
郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析	王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩 (604)
基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案	李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦 (616)
汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析	叶露, 邵菁菁, 俞华明 (624)
兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估	郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强 (634)
2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析	李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政 (643)
珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价	王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩 (653)
乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险	史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新 (663)
乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系	王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴 (673)
张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响	王维, 李叙勇 (681)
三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因	杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷 (688)
巢湖沉积物氮磷分布及污染评价	王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平 (699)
巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策	杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌 (712)
氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响	徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇 (723)
降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响	陈敏, 许浩震, 王雪竹, 肖尚斌 (732)
典型喀斯特河流-水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素	刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂飞, 刘文胜 (740)
江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状	王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶 (749)
尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征	黄福义, 朱永官, 苏建强 (761)
涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析	郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生 (766)
天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析	何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良 (776)
秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响	张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏 (786)
环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性	张丽娟, 徐杉, 赵峰, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟 (796)
浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响	黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强 (808)
松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应	于宗灵, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟 (819)
汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测	韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅 (831)
两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物	李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢慧君, 胡振, 张建 (842)
人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除	周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕 (850)
紫外氯胺组消毒供水系统中病毒微生物的分布特征	韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧 (860)
高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除	孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江 (867)
胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性	汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靛, 祝建中 (874)
电凝聚氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析	谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康 (883)
微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制	陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒 (891)
河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌 (900)
南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价	陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗 (909)
复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果	丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江 (917)
石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田	李光辉, 成晴, 陈宏 (925)
叶面喷施纳米MnO ₂ 对水稻富集镉的影响机制	周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣 (932)
典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞 (941)
辣椒果实高中低镉累积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较	邵晓庆, 贺章味, 徐卫红 (952)
4种草本植物对镉的富集特征	陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄 (960)
不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征	熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王鑫燕, 王子芳, 高明 (967)
降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响	高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎 (977)
水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征	林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (988)
铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响	葛艺, 徐民氏, 徐绍辉, 徐艳 (996)
臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响	李品, 周慧敏, 冯兆忠 (1004)
颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述	李源遽, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷 (1013)
《环境科学》征订启事 (522)	
《环境科学》征稿简则 (722)	
信息 (748, 899, 924)	

2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估

姚森¹, 张晗宇², 王晓琦², 杨书申¹

(1. 中原工学院能源与环境学院, 郑州 450007; 2. 北京工业大学环境与能源工程学院, 区域大气复合污染防治北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要: 基于大气环境监测数据和 WRF-CAMx 模式, 分析了 2016 年 1 月京津冀城市的大气污染特征, 开展了 PM_{2.5} 跨界传输量化评估研究. 结果表明, 2016 年 1 月京津冀地区 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂ 和 CO 的平均浓度分别为 89.5 μg·m⁻³、135.61 μg·m⁻³、57.55 μg·m⁻³、60.79 μg·m⁻³ 和 2.12 mg·m⁻³, 其中 PM_{2.5} 污染较为严峻. 研究期间, 京津冀城市近地面 PM_{2.5} 以本地排放为主, 贡献率为 45.4%~69.9%; 区域传输贡献为辅, 其中来自京津冀区域内和区域外的传输贡献率分别为 4.8%~49.7% 和 4.9%~29.6%. 高风速会促进本地 PM_{2.5} 污染的扩散, 同时位于其上风向污染较高的城市, 在高风速和强下风向频率和的作用下, 会进一步增强对下风向城市的区域传输贡献. 北京(石家庄) PM_{2.5} 总流入、流出和净通量(t·d⁻¹) 分别为 1 582.96(2 036.89)、-1 171.09(-1 879.12) 和 411.87(157.77), 表明两城市接受外来输入影响均高于向外传输的影响. PM_{2.5} 净通量呈现显著的垂直分布特征, 离地 1 782 m 高度范围内北京和石家庄 PM_{2.5} 总净通量强度范围分别是 17.86~64.18 t·d⁻¹ 和 -2.95~134.81 t·d⁻¹, 均在距地面 817 m 左右达到峰值, 强度分别为 64.18 t·d⁻¹ 和 134.81 t·d⁻¹, 而张家口和山西的净流入通量的显著增加是导致两城市 PM_{2.5} 总净通量强度达到峰值的主要原因.

关键词: 大气污染特征; 气象-空气质量模式(WRF-CAMx); PM_{2.5} 传输矩阵; PM_{2.5} 传输通量; 京津冀地区

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0534-12 DOI: 10.13227/j.hjkk.202006042

Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016

YAO Sen¹, ZHANG Han-yu², WANG Xiao-qi², YANG Shu-shen¹

(1. School of Energy and Environment, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China; 2. Key Laboratory of Beijing on Regional Air Pollution Control, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Based on atmospheric monitoring data and the WRF-CAMx model, this study analyzed the characteristics of air pollution and performed a quantitative assessment of PM_{2.5} cross-border transport in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region in January 2016. The results showed that the average concentrations of PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂, and CO were 89.5 μg·m⁻³, 135.61 μg·m⁻³, 57.55 μg·m⁻³, 60.79 μg·m⁻³, and 2.12 mg·m⁻³, respectively, indicating severe PM_{2.5} pollution. During the study period, surface-level PM_{2.5} in each city of BTH region was dominated by local emissions, which accounted for 45.4% to 69.9%. The regional transport contribution was supplemented by transport from within and outside of the BTH region, accounting for 4.8% to 49.7% and 4.9% to 29.6%, respectively. In addition, high wind speeds promoted the diffusion of local PM_{2.5} pollution and cities with high upwind pollution enhance regional-scale transport to downwind cities. The total inflow, outflow, and net flux of PM_{2.5} in Beijing (Shijiazhuang) in January 2016 were 1 582.96 t·d⁻¹ (2 036.89 t·d⁻¹), -1 171.09 t·d⁻¹ (-1 879.12 t·d⁻¹), and 411.87 t·d⁻¹ (157.77 t·d⁻¹), respectively, indicating that PM_{2.5} inputs from surrounding cities per unit time were higher than external inputs to the surrounding cities. Furthermore, net PM_{2.5} flux showed notable vertical evolution; the total net flux of PM_{2.5} in Beijing and Shijiazhuang below 1 782 m ranged from 17.86 to 64.18 t·d⁻¹ and -2.95 to 134.81 t·d⁻¹, respectively, and both peaked 817 m above the ground at 64.18 and 134.81 t·d⁻¹. Moreover, a significant increase the net PM_{2.5} inflow flux in Zhangjiakou and Shanxi explained the observed net flux peaks in these two cities.

Key words: air pollution characteristics; meteorology-air quality coupling model system (WRF-CAMx); PM_{2.5} transport matrix; PM_{2.5} transport flux; Beijing-Tianjin-Hebei region

随着我国国民经济的高速发展、能源消耗日趋增长以及城市化进程的加快,多种大气污染物排放量显著增加,导致我国大气污染形势日益严峻,对大气能见度^[1]、人体健康^[2]、国民经济发展^[3]以及气候变化^[4,5]都造成了极大的威胁. 由于 PM_{2.5} 在大气中可以稳定存在数天至数周时间,能随着大气传输

至数百公里以外^[6],因此某一城市或区域的大气 PM_{2.5} 污染既包括本地排放生成,同时也包括周边地

收稿日期: 2020-06-04; 修订日期: 2020-08-02

基金项目: 中国博士后科学基金项目(71005011201901); 国家自然科学基金项目(41375145)

作者简介: 姚森(1990~),男,博士,讲师,主要研究方向为大气环境规划管理与污染防治, E-mail: yaosen0030@foxmail.com

区的外来传输贡献,具有显著的区域性、复合型污染特征^[7],引起了国内外研究学者的广泛关注. 如何定量识别 $\text{PM}_{2.5}$ 污染跨界传输规律,也成为有效改善区域空气质量和实现大气污染联防联控的当务之急.

目前,用于开展大气 $\text{PM}_{2.5}$ 传输量化研究的方法主要有立体观测和数值模型模拟两种. Lv 等^[8] 在 2016 年 10 月 5 日采用车载激光雷达开展了北京五环的走航观测实验,发现来自上风向(西北方向)的高海拔输入通量强度 [$95 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$] 高于近地面强度 [$64 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$],气团向西南方向输出明显. Yang 等^[9] 基于后向轨迹模型对北京市一次重污染过程进行了气团轨迹的定性分析,发现 500 m 高度处的气团对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度影响最大,1 500 m 高度主要表现为长距离传输,而 3 000 m 高度的气团对此次重污染影响很小. 薛文博等^[10] 采用 CAMx-PSAT 来源示踪法定量模拟了全国 $\text{PM}_{2.5}$ 跨界传输规律,结果显示,京津冀、长三角、珠三角地区和成渝城市群外来源传输对本地 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的贡献达到 14% ~ 37%,浙江、江苏、吉林和海南 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度受外来源贡献超过 45%,北京、天津和石家庄等典型城市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度受外来源贡献达 33% ~ 42%,表明跨界传输对我国多个城市群和区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度贡献显著. Zhang 等^[11] 采用 WRF-CAMx 跨边界传输通量法定量模拟了 2015 年 10 月北京与周边城市 $\text{PM}_{2.5}$ 传输通量特征,发现北京流入通量主要来自保定和廊坊,而流出通量主要去往承德. Chen 等^[12] 利用 CMAQ 模式中 ISAM 模块 (integrated source apportionment method) 对山东省德州市进行了来源解析研究,结果表明,本地排放对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度贡献仅为 15.4%,周边相邻城市贡献 28.1%,远距离传输贡献 31.6%. Wang 等^[13] 基于 MM5-CMAQ 模式中的强力削减法 (BFM) 对北京、石家庄和邯郸 $\text{PM}_{2.5}$ 的空间来源进行了分析,结果表明,2013 年 1 月区域传输对 3 个城市的贡献为 27.5% ~ 28.6%,其中北京、天津及河北北部地区是主要的外来源贡献者;石家庄 $\text{PM}_{2.5}$ 污染有 4.2% 来自邢台和邯郸,而邢台 $\text{PM}_{2.5}$ 污染有 19.5% 来自石家庄和邯郸,邯郸 $\text{PM}_{2.5}$ 污染有 14.6% 来自石家庄和邢台. Lu 等^[14] 采用 NAQPMS 模式定量评估了 2014 年两次重污染武汉受区域传输的影响,其研究表明,第一次短期重污染武汉 $\text{PM}_{2.5}$ 受长距离传输贡献为 60.6%,远高于武汉局地 and 近周边的贡献 (32.7%); 第二次长期重污染武汉 $\text{PM}_{2.5}$ 受长距离和短距离传输贡献分别为 24.8% 和 29.2%,表明区域传输对武汉重污染形成至关重要. 但是,目前已有的 $\text{PM}_{2.5}$ 跨界传输规律研

究多局限于近地面,缺乏基于不同传输定量评估方法开展的 $\text{PM}_{2.5}$ 近地面和高空多尺度跨界输送量化规律研究,尚难以为我国重点地区大气污染的联防联控提供有效的技术支撑.

京津冀地区是我国的“首都经济圈”,同时也是 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的“重灾区”,尤其是秋冬季,京津冀多个城市频繁出现 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染事件^[15,16],给自然和社会环境带来了巨大影响. 而 $\text{PM}_{2.5}$ 污染与区域跨界输送密切相关,定量分析 $\text{PM}_{2.5}$ 跨界传输规律是开展大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染防治的有效手段. 因此,本文以 2016 年 1 月冬季代表月为研究时段,基于大气环境监测数据,分析京津冀地区大气污染特征. 同时,采用 WRF-CAMx 模式,从近地面和高空两个方面对 $\text{PM}_{2.5}$ 传输进行定量模拟评估,建立了近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 传输矩阵,并分析了北京、石家庄与各自相邻城市的行政边界处 $\text{PM}_{2.5}$ 传输通量的垂直演变特征,以期为我国区域大气复合污染联防联控的有效实施提供重要的科学依据.

1 材料与方法

1.1 模型设置

本研究气象场模拟采用 WRF v3.5.1^[17],空气质量模式采用美国 ENVIRON 公司在 UAM-V 模式基础上开发的 CAMx v6.3.0^[18],以此开展 $\text{PM}_{2.5}$ 多时空尺度传输特征研究. 模拟时段为 2016 年 1 月 1 ~ 30 日,模拟结果输出时间间隔为 1 h. CAMx 模式采用 Lambert 投影坐标系,中心经纬度坐标为 39.02°N , 116.47°E ,设置三层嵌套,分辨率分别为 $36 \text{ km} \times 36 \text{ km}$ 、 $12 \text{ km} \times 12 \text{ km}$ 和 $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$,如图 1 所示. 其中第一层 (Domain1) 覆盖中国东部和中部大部分地区,第二层 (Domain2) 覆盖京津冀区域、山东省、山西省、河南省以及部分内蒙古自治区、辽宁省、陕西省、湖北省、安徽省、江苏省、浙江省和上海市,第三层 (Domain3) 覆盖京津冀 13 个地级及以上的城市以及周边相邻城市的部分地区. 基于 CAMx-PSAT 来源示踪模块,建立京津冀地区城市 $\text{PM}_{2.5}$ 传输矩阵. 共设置 13 个受体,即京津冀地区 13 个地级及以上城市; 18 个源体,包括京津冀地区 13 个地级及以上城市、山东省、山西省、河南省、内蒙古自治区和模拟区域内除上述 17 个分区外的其他区域.

WRF 模式采用的模拟时段、投影坐标系和两层嵌套网格的分辨率均与 CAMx 模式相同,模拟范围大于 CAMx 的模拟范围. 垂直方向上,两种模式均设置为 28 个气压层,采用相同的 δ 坐标,各气压层从低到高对应的 δ 坐标分别为: 1.000、0.994、

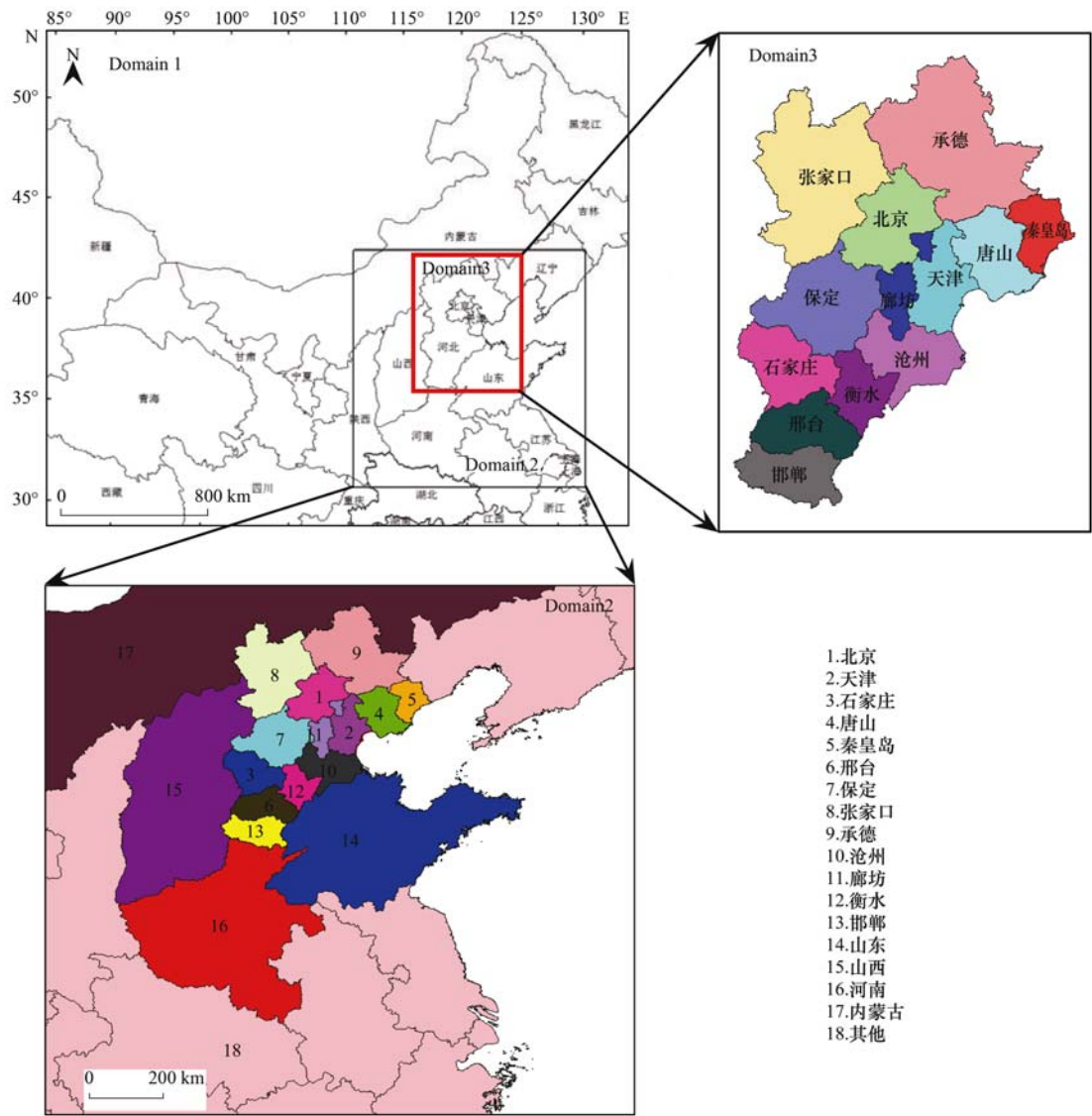


图 1 CAMx 模式三层嵌套区域示意

Fig. 1 Schematic diagram of three nested domains of the CAMx model

0.988、0.981、0.969、0.956、0.944、0.926、0.902、0.881、0.852、0.828、0.796、0.754、0.704、0.648、0.589、0.546、0.495、0.445、0.387、0.287、0.187、0.136、0.091、0.061、0.020和0.000. CAMx 模型中的气相和气溶胶化学反应机制分别选用 CB05 和 CF 机制,水平平流方案选用 PPM,计算方法调用欧拉反向迭代法 EBI. WRF 模型中的参数化设置如表 1 所示.

表 1 WRF 模式的参数化方案

Table 1 Parameterization schemes of the WRF model

参数化过程	对应参数变量	设置
微物理方案	mp_physics	Lin
长波辐射方案	ra_lw_physics	RRTM
短波辐射方案	ra_sw_physics	Dudhia
陆面过程方案	Sf_surface_physics	Noah
积云参数化方案	cu_physics	Grell-3D
边界层方案	bl_pbl_physics	YSU

1.2 数据来源

本研究采用的京津冀城市大气污染物 (PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂ 和 CO) 质量浓度数据来自中国空气质量在线监测分析平台 (<https://www.aqistudy.cn/historydata>), 用于京津冀区域大气污染特征研究与模型模拟结果验证. 北京和石家庄两城市的温度、相对湿度和风速等常规气象数据来自中国气象局发布的 MICAPS 气象数据^[19]. 初始气象场和边界条件采用美国国家环境预报中心 (NCEP) 提供的 6 h 1° × 1° 分辨率的全球对流层分析数据. CAMx 模式所需的大气污染源排放清单物种主要包括 SO₂、CO、NO_x、NH₃、VOCs、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 等污染物, 其中京津冀地区采用课题组自下而上建立的高分辨率污染源排放清单^[20], 京津冀以外地区采用清华大学 MEIC 排放清单^[21].

1.3 传输通量计算

$\text{PM}_{2.5}$ 传输通量定义为单位时间内通过某一垂直截面 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量^[22,23], 用来开展目标城市与周边相邻城市跨边界 $\text{PM}_{2.5}$ 传输通量研究. 由于 CAMx 属于欧拉三维网格模式, 每个网格具有固定的三维位置, 模式可以分别提供各个网格内的气象数据和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据. 因此, 本研究选取模型垂直分层中 12 层以下的高度 (离地约 1 800 m) 作为垂直空间传输通量研究范围, 以北京和石家庄为目标城市, 其中与北京相邻的城市为张家口、保定、廊坊、天津和承德, 与石家庄相邻的省市为保定、山西省、邢台和衡水. 在此基础上, 只需将各相邻垂直截面处的网格单元进行离散化, 根据传输通量的计算公式 (1), 计算各网格单元内风速、浓度和面积的数量积, 再对整个截面进行积分, 即可得到通过整个垂直截面 $\text{PM}_{2.5}$ 的传输通量. 传输通量计算如下:

$$\text{Flux} = \sum_{k=1}^h \sum_l L \cdot H_k \cdot c \cdot v \cdot n \times 8.64 \times 10^{-8} \quad (1)$$

式中, Flux 为 $\text{PM}_{2.5}$ 传输通量 ($\text{t} \cdot \text{d}^{-1}$), h 为垂直方向研究的最高层, 即第 10 层, l 为两个毗邻城市的边界线 (无量纲), L 为模拟网格分辨率 (m), H_k 为在垂直层 k 和 $k+1$ 层间的高度差 (m), c 为 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), v 为风向 ($^\circ$) 和风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), n 为通过垂直截面的法向量 (无量纲). 单位时间周边城市向目标城市流入 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量为 $\text{PM}_{2.5}$ 流入通量, 用“+”表示; 单位时间由目标城市流向周边城市 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量为 $\text{PM}_{2.5}$ 流出通量, 用“-”表示; $\text{PM}_{2.5}$ 流入与流出通量的矢量和为 $\text{PM}_{2.5}$ 净通量.

2 结果与讨论

2.1 京津冀区域大气污染特征

2016 年 1 月京津冀各城市大气污染物月均浓度如图 2 所示. 结果表明, 2016 年 1 月京津冀区域 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、CO 和 O_3 的平均浓度分别为 $89.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $135.61 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $57.55 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $60.79 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $2.12 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $42.49 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 除 $\text{PM}_{2.5}$ 月均浓度超过了国家二级日均浓度标准的 18.73% 外, 其余污染物均达到国家二级日均浓度标准. 以 $\text{PM}_{2.5}$ 为例, 污染最严重的前 3 位城市为保定、衡水和石家庄, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布为 149.26、133.68 和 $130.77 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 秦皇岛、张家口和承德污染较轻, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均在 $45 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下.

图 3 统计了 2016 年 1 月京津冀各城市大气污染物达标率及优良天与重污染天数, 结果显示: 2016 年 1 月京津冀区域 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 和 CO 日均浓度达标率分别为 55.83%、67.74%、98.51%、

78.19% 和 100%. 以达标率最低的 $\text{PM}_{2.5}$ 为例, 秦皇岛、张家口和承德达标率均在 90% 以上, 北京、天津、唐山、沧州和廊坊达标率在 50%~70% 之间, 而石家庄、邯郸、保定、邢台和衡水达标率均不足 40%. 根据《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 评价, 各城市达到或优于二级的优良天数平均为 17.31 d, 占比 55.84%; 重污染及以上天数平均为 13.69 d, 占比为 44.16%. 秦皇岛、承德和张家口的优良天数均不少于 28 d, 而衡水、邢台、保定和石家庄重污染及以上天数均在 20d 以上. 以上结果表明, 河北省中部和南部城市 $\text{PM}_{2.5}$ 污染较严重, 且沿着邯郸-邢台-石家庄-保定-北京呈带状污染分布, 与太行山脉和燕山山脉连线一致, 这与河北省中南部城市较高的污染物排放量和地理位置有关^[24,25].

2.2 气象与空气质量模型验证

选取北京和石家庄等两个典型城市的污染与气象观测数据, 将模式模拟的气象要素 (包括距地面 2 m 的温度 T_2 、相对湿度 RH 和距地面 10 m 的风速 WS) 以及 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与观测数据进行对比分析, 验证模式的模拟性能, 如图 4 所示.

另外, 本研究参考 EPA (Environmental Protection Agency) 评价标准, 引入标准化平均偏差 (NMB)、标准化平均误差 (NME) 和相关系数 (COR) 等 3 个统计指标^[26], 评估 WRF-CAMx 模式的模拟效果, 如表 2 所示. 从中可知, 北京和石家庄的 3 种气象要素模拟值与观测值二者的变化趋势较为一致, 存在显著的正相关性, 相关性系数均在 0.6 以上. 详细来讲, 北京和石家庄 T_2 模拟值略高于观测值, 相关性系数分别为 0.96 和 0.83, NMB 和 NME 值均在 0.50% 以内; RH 模拟值与观测值的相关性系数分别为 0.85 和 0.81, 石家庄比北京的模拟偏差更大一些, NMB 和 NME 分别为 -21.59% 和 26.92%; 对 WS 来讲, 模拟与观测值的相关性系数相对较低, 但仍达到 0.62 和 0.78, 模拟值普遍高于观测值, 北京和石家庄两地 WS 模拟 NMB 值分别为 29.19% 和 27.70%, NME 值分别为 39.73% 和 31.66%.

北京和石家庄 $\text{PM}_{2.5}$ 的模拟值与观测值的演变趋势较为一致, 二者的相关性系数均在 0.85 以上, 但前者普遍低于后者. 然而, 两城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的 NMB 值分别为 -18.11% 和 -24.57%, NME 值分别为 32.17% 和 34.70%, 标准化平均偏差和标准化平均误差相对于气象要素模拟较大, 这主要是由于重污染期间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度存在低估, 尤其是 2016 年 1 月 1~3 日的重污染过程, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度存在严重低估, 这种现象与国内外许多重污染模拟效果相似^[27]. 造成重污染期间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度低估的原因主要包括以下 4

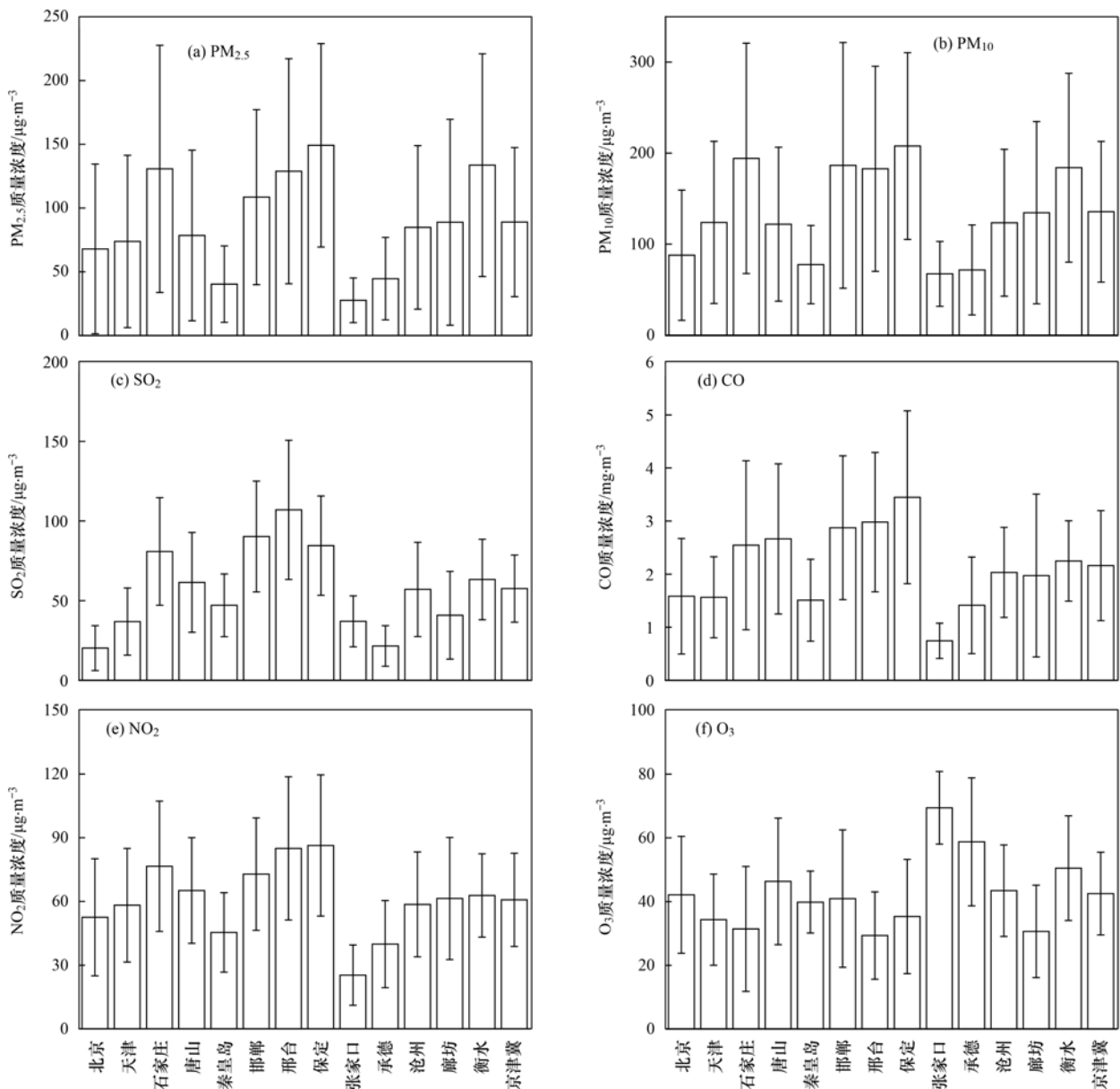


图 2 2016 年 1 月京津冀城市大气污染物月均浓度

Fig. 2 Monthly concentrations of atmospheric pollutants in each city of the Beijing-Tianjin-Hebei region in January 2016

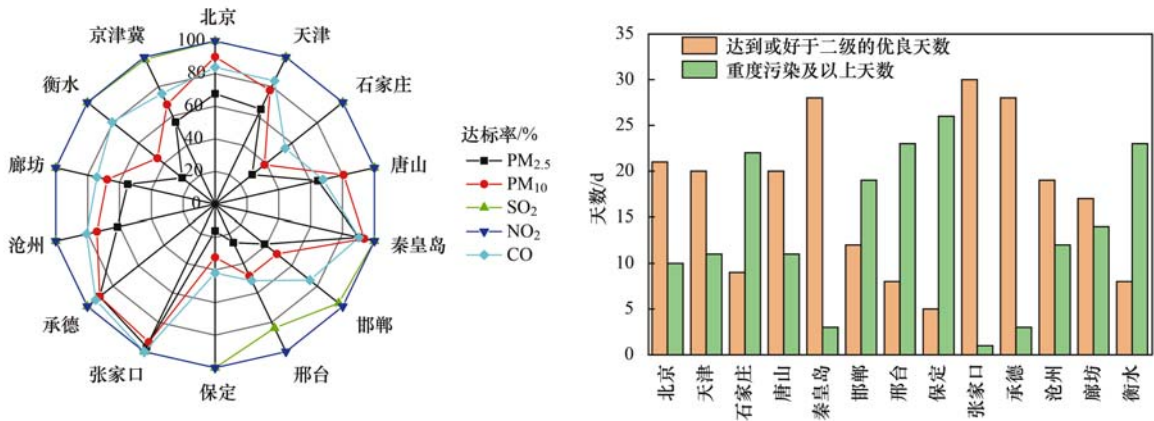


图 3 2016 年 1 月京津冀各城市污染物日均值达标率及优良天与重污染天数分布

Fig. 3 Daily compliance rates of pollutants in each city of the Beijing-Tianjin-Hebei region and distribution of fine days and heavy pollution days in January 2016

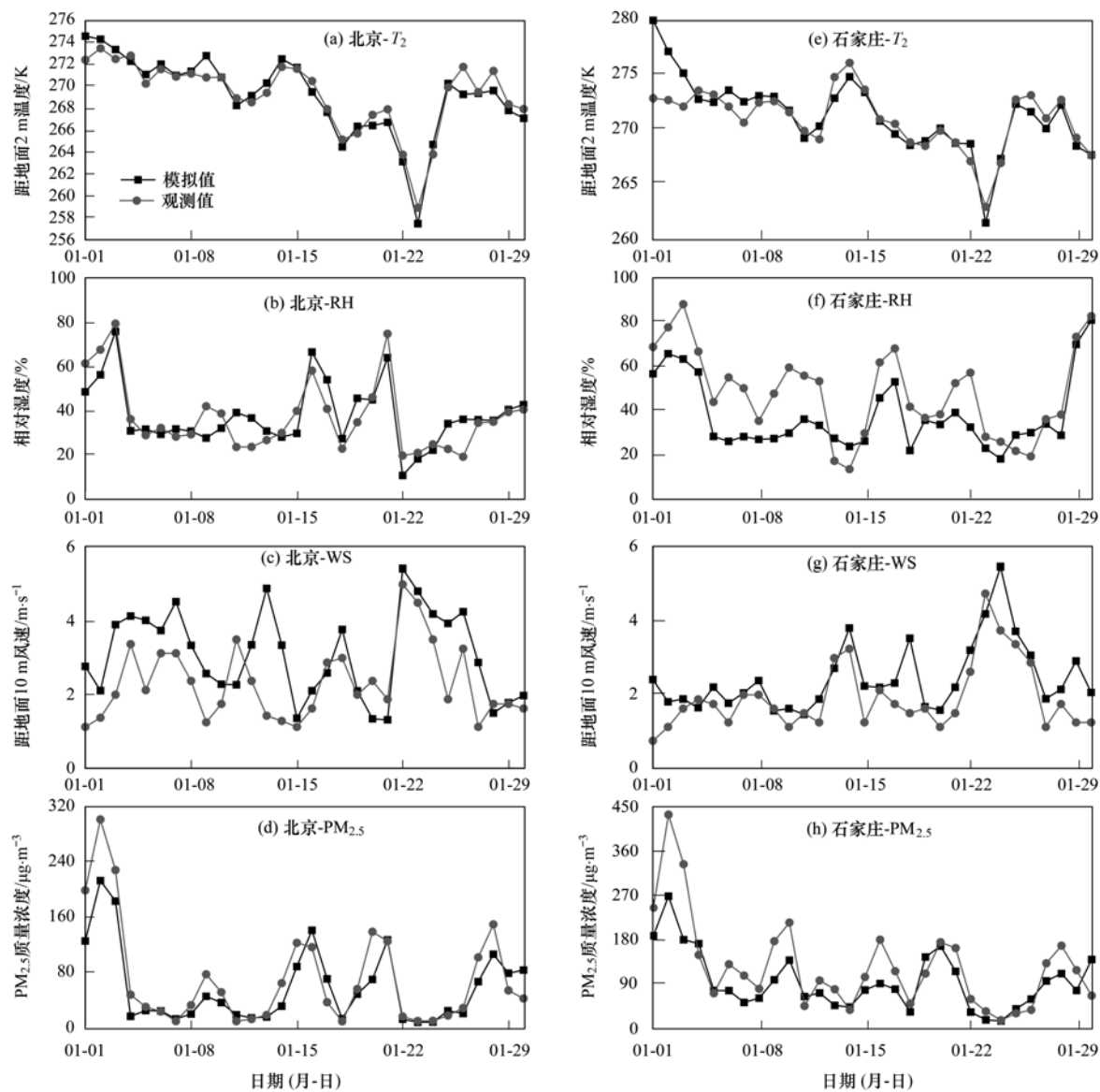


图 4 2016 年北京和石家庄地面 2 m 温度、相对湿度、风速和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度模拟与观测值的逐日变化对比

Fig. 4 Daily comparison of simulated and observed temperature, relative humidity, wind speed, and $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in Beijing and Shijiazhuang in 2016

表 2 模拟值与观测值统计指标对比

Table 2 Comparison of statistical indicators between simulated and observed data						
城市	指标	模拟均值	观测均值	COR	NMB/%	NME/%
北京	T_2/K	269.21	269.13	0.96	-0.02	0.31
	RH/%	38.17	37.64	0.85	1.41	18.31
	$\text{WS}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	2.92	2.31	0.62	29.19	39.73
	$\text{PM}_{2.5}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	59.10	72.17	0.93	-18.11	32.17
石家庄	T_2/K	271.24	270.90	0.83	0.13	0.44
	RH/%	37.80	48.24	0.81	-21.59	26.92
	$\text{WS}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	2.46	1.82	0.78	27.70	31.66
	$\text{PM}_{2.5}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	95.30	126.33	0.87	-24.57	34.70

点^[28,29]:①气象模式产生的模拟误差会进一步影响空气质量模式模拟,如:高估的风速会促进 $\text{PM}_{2.5}$ 污染物扩散,在一定程度上造成 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度低估;②污染源排放清单的不确定性;③水平与垂直分辨率的影响;④空气质量模式针对重污染时段二次污染物

转化机制有所欠缺,不能完全表征 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和二次有机气溶胶的反应过程,造成 $\text{PM}_{2.5}$ 模拟浓度的低估. 详细地说,不充分的模拟氧化剂或缺失的化学反应可能低估光化学氧化过程将气态前体转化为二次污染物的过程^[30]. 综合考虑各项验证指标,本研

究采用的 WRF 和 CAMx 模式对气象条件和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的模拟效果较好,误差在可接受范围内,可以用于下一步 $\text{PM}_{2.5}$ 多时空尺度传输规律的模拟研究。

2.3 近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 传输量化分析

2.3.1 $\text{PM}_{2.5}$ 城市传输矩阵研究

图 5 展示了 2016 年 1 月京津冀区域各城市 $\text{PM}_{2.5}$ 本地排放和区域传输贡献率和贡献浓度矩阵。从中可知,除廊坊外,京津冀城市均以本地贡献为主,本地贡献率和贡献浓度范围是 50.4%~69.9% 和 16.5~87.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 而廊坊市传输贡献率和贡献浓度为 54.6% 和 39.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。13 个城市受京津冀区域内传输贡献率和贡献浓度范围分别是 4.8%~49.7% 和 0.2~6.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,京津冀区域传输贡献率和贡献浓度范围分别是 4.9%~29.6% 和 0.1~6.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

北京、天津、石家庄、唐山、保定和张家口 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度受本地贡献较为显著,贡献率分别为 65.2%、60.9%、61.4%、69.9%、63.2% 和 65.6%,均超过 60%。这主要是由于冬季采暖燃煤、机动车发动机内燃烧过程不充分等原因导致各项污染物排放量增加;另外,冬季稳定的大气层、低风速、多重或单层逆温等不利气象条件,使得本地污染物浓度持续积累,最终导致本地贡献较大。其次本地排放贡献较高的是秦皇岛、邢台、承德、沧州、衡水和邯郸,贡献率范围是 50.4%~58.6%。

相比之下,张家口、承德和秦皇岛 $\text{PM}_{2.5}$ 污染区外传输高于区内传输,区外传输贡献率分别高达 29.6%、28.4% 和 26.3%,尤其是内蒙古自治区对张家口和承德的传输贡献分别高达 25.7% 和 13.8%。一方面与位于河北省北部边界的特殊地理位置有关,另一方面也归因于城市本地污染排放量低,在冬季季风气候的影响下,城市北部的区外传输贡献由此增强。其余城市 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的区内传输贡献均高

区外传输,尤其是邢台、廊坊和衡水这 3 地,京津冀区域内传输对其贡献分别高达 32.8%、49.7% 和 30.6%。此外,与山东省相邻的沧州、衡水、邢台和邯郸等城市受到来自山东省传输贡献也不容忽视,贡献率分别高达 10.1%、12.9 和 6.5%。

同时还发现,相邻城市间的相互传输影响比较明显,京津冀中部城市如北京主要受唐山(4.5%)、天津(3.2%)和保定(2.7%)影响,天津主要受唐山(6.5%)、北京(5.1%)和廊坊(3.5%)影响,廊坊主要受保定(13.1%)、天津(13.0%)和北京(9.9%)影响;京津冀南部城市如石家庄主要受保定(8.6%)、衡水(3.6%)和邢台(3.4%)影响,其中保定向石家庄传输 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度贡献为 9.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。而邢台和邯郸两城市存在明显的相互传输现象,邢台月均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度受邯郸贡献 12.3%,而邯郸 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度受邢台贡献 13.4%。综上所述,1 月京津冀多数城市以本地贡献为主,其中北部城市受区外传输影响较大,中部和南部城市相互有较强的传输,区内传输贡献显著。

2.3.2 风场对区域传输的影响

区域大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染跨界输送除了受地理位置、下垫面的影响之外,气象条件也是影响区域传输的重要因素。风速与风向的协同作用对区域大气污染传输影响显著,低风速或静风会使污染物持续积累,一般会导致重污染天气;高风速则有利于污染物扩散稀释,若上风向地区污染物浓度较低,清洁气团的输入会稀释本地的大气污染物,导致本地污染物浓度下降,若上风向地区污染物浓度较高,则会导致更多的污染物传输到本地,造成污染物浓度上升^[31]。

选取北京和天津作为典型城市,基于风场气象数据获取了 1 月两城市的风向玫瑰图(图 6),并进一步分析了风速和风向对 $\text{PM}_{2.5}$ 区域传输的影响。图 6(a)显示了北京市的主导风向为西北风、北风和

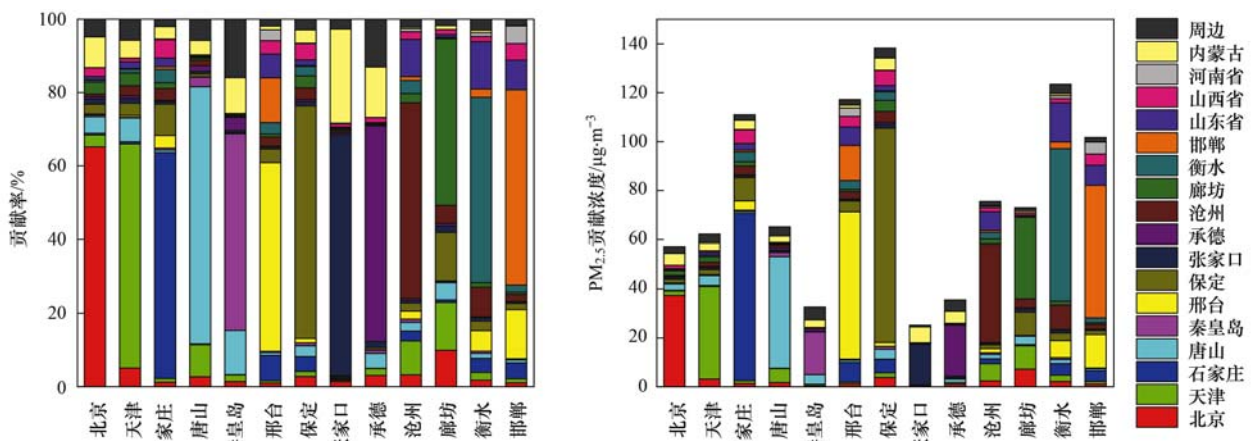


图 5 2016 年 1 月京津冀 13 个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 传输贡献率与贡献浓度

Fig. 5 $\text{PM}_{2.5}$ transport contribution rates and contribution concentration of 13 cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region in January 2016

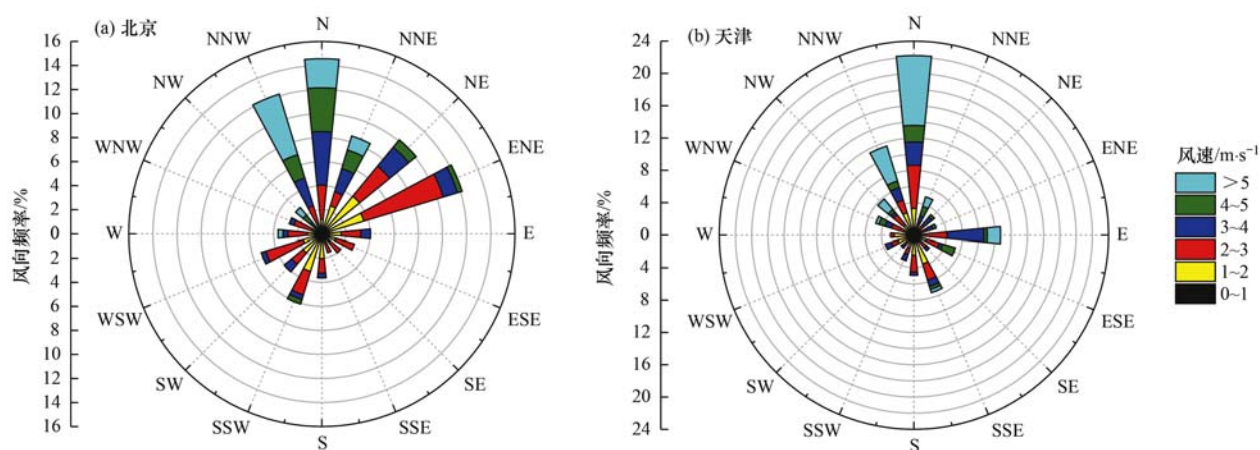


图 6 1 月北京和天津风玫瑰图

Fig. 6 Windrose plots for Beijing and Tianjin in January

东北风,风向在西北至东北偏东方向之间的频率为 60.3%。因此,位于北京以北的内蒙古自治区对其传输影响较大,贡献率为 8.4%;虽然张家口和承德也位于北京北部,且与北京接壤,但由于两城市污染排放较小,是京津冀地区污染较轻的两个城市,因此对北京的污染传输贡献仅为 1.4% 和 0.6%。位于北京西南方向的保定对北京的传输贡献为 2.7%,这是由于西南偏南至西南偏西的风向频率为 15.4%,且保定是京津冀地区 1 月 $\text{PM}_{2.5}$ 污染最严重的城市,在小风等稳定的气象条件下,对北京存在污染输送。图 6(b) 显示了天津地区 1 月的主导风向为北风,其次为东风,风向频率分别为 22.2% 和 10.7%,其中高于 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的北风和东风频率为 13.6% 和 6.6%。一方面使天津受北京和唐山传输影响较大,分别为 5.1% 和 6.5%,同时也促进了天津本地污染物的扩散,本地贡献为 60.9%。

观测与模拟数据均显示,2016 年 1 月 1~3 日京津冀多个城市出现了 $\text{PM}_{2.5}$ 污染。为定量研究风场对区域传输的影响,本研究选取北京和天津作为典型受体城市,将重污染时段两城市的空间来源解析结果与风速和风频相结合并进行对比分析,如图 7 所示。结果显示,重污染时段北京盛行风向为南风、东北风和东北偏东风,风向频率百分比分别为 20.83%、16.67% 和 20.83%,明显高于整月对应的风向频率,即 3.64%、9.31% 和 11.74%。上述 3 种风向中风速高于 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的频率和为 29.17%,尤其是东北偏东, $2 \sim 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速频率百分比为 16.67%。由于北京位于保定、廊坊和唐山的下风向,重污染期间较高的风频使得上述城市对北京的传输贡献明显增加,贡献率分别为 4.20%、5.10% 和 5.90%,是月均贡献率的 1.58、1.56 和 1.31 倍。对于天津来讲,重污染时段主要盛行北风、东南偏南风、南风和东风,风向频率百分比分别为 16.67%、

20.83%、16.67% 和 12.50%,均高于整月平均对应风向的频率占比。受北风与偏北风影响,北京和廊坊位于天津上风向,虽然重污染时段正北风频率较高,但仍低于整月期间的偏北风频率和(西北偏北+正北+东北偏北),所以重污染期间北京和廊坊对天津的传输贡献率(8.45%)与月均贡献率(8.54%)相当。值得注意的是,重污染时段天津东南偏南与南风的频率和明显增加,占比高达 37.50%,其中风速高于 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的频率占比为 29.17%。一方面促进了位于其上风向的沧州对天津传输的影响,另一方面,也使得来自山东省的跨海传输贡献有所增加,二者传输贡献率分别为 5.91% 和 2.89%,是月均贡献率的 2.15 和 1.61 倍。因此,风场对 $\text{PM}_{2.5}$ 跨界传输贡献发挥着重要的作用。

2.4 $\text{PM}_{2.5}$ 跨边界传输通量

2.4.1 $\text{PM}_{2.5}$ 总传输通量特征

图 8 展示了北京和石家庄与各自相邻城市 $\text{PM}_{2.5}$ 总流入、流出和净通量的变化情况。对北京来讲,2016 年 1 月 $\text{PM}_{2.5}$ 总流入、流出和净通量分别为 1915.38 、 -1417.01 和 $498.36 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$,总流入通量高于总流出通量,表明北京 1 月受周边城市传输影响高于自身对周边城市的传输贡献。总流入通量中,主要来自张家口和保定,通量强度分别为 $867.94 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $425.48 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 。其中来自张家口较强的流入通量主要是由于受冬季季风影响,京津冀地区盛行较强西北风,因此,虽然张家口 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较低,但较高的风速也会造成较强的流入通量^[32]。而保定流入通量较高是受到京津冀冬季西南-东北污染传输通道和本地 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高的共同影响所致。总流出通量中,北京主要向廊坊和承德输出 $\text{PM}_{2.5}$ 污染,通量强度分别为 $-554.21 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $-311.02 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$,这也正与冬季季风气候和西南-东北传输通

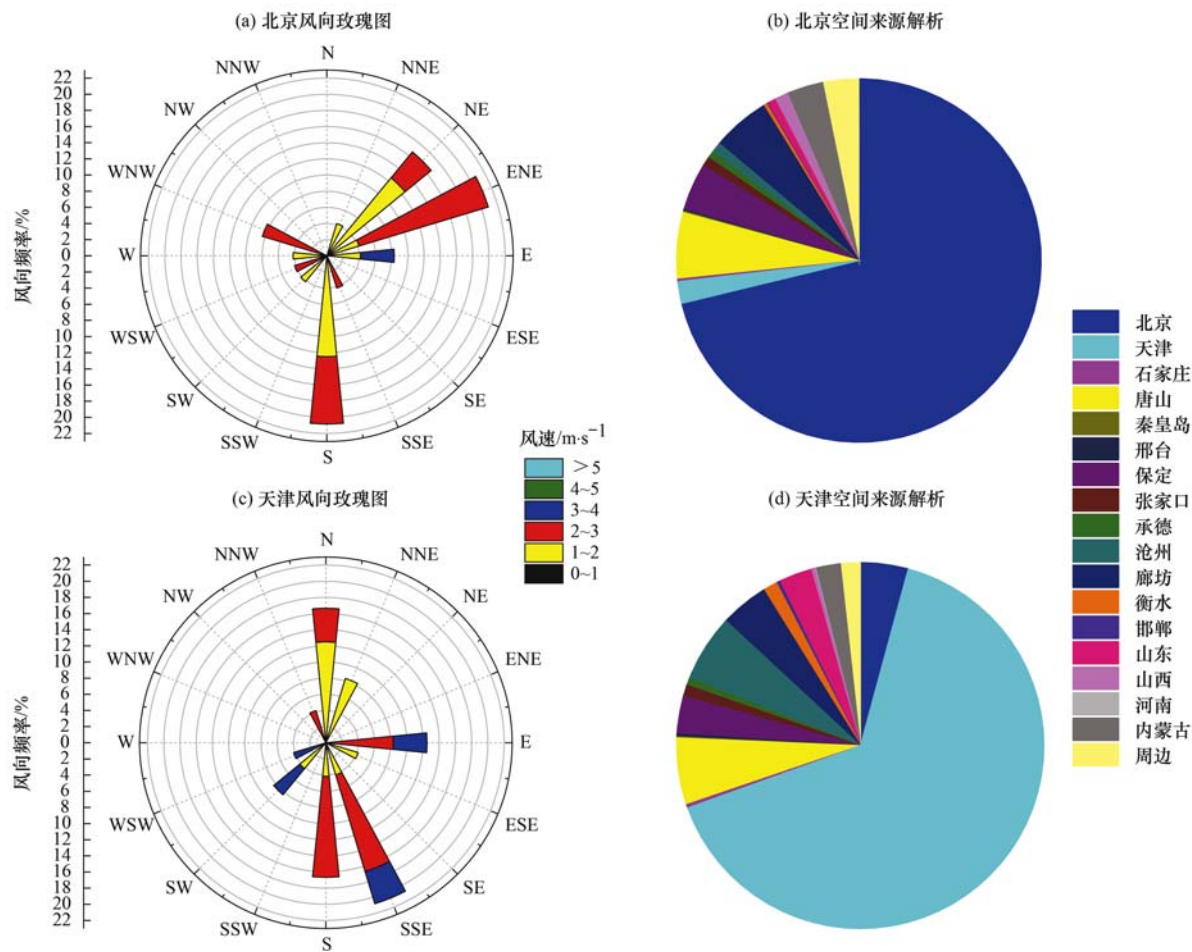


图 7 重污染时段北京和天津的风玫瑰图与空间来源解析结果

Fig. 7 Windrose plots and spatial source analysis results for Beijing and Tianjin during heavy pollution periods

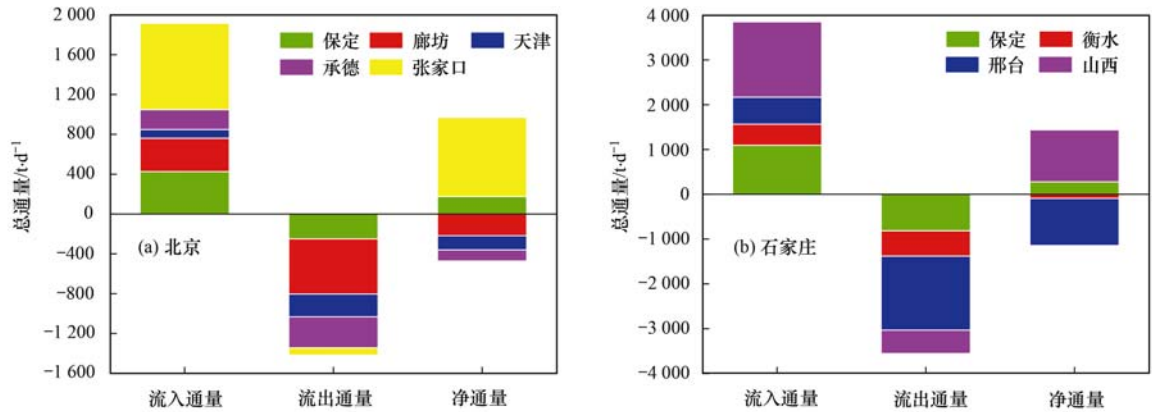


图 8 北京和石家庄与周边城市 $PM_{2.5}$ 总流入、流出和净通量变化

Fig. 8 Variations in $PM_{2.5}$ inflows, outflows, and net fluxes between Beijing and Shijiazhuang and their surrounding areas

道相呼应。总净通量中,北京主要向廊坊和天津净流出,总净通量分别为 $-218.57 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $-141.59 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$,而主要接收张家口和保定的净流入,总净通量分别为 $794.86 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $175.71 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

对石家庄来讲,2016 年 1 月 $PM_{2.5}$ 总流入、流出和净通量分别为 $3\,849.73$ 、 $-3\,551.54$ 和 $298.19 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$,分别是北京总流入、流出和净通量的 2.01、2.51 和 0.60 倍。总净通量为正值,这表明周边省市

对石家庄传输影响要高于石家庄对周边的传输影响。总流入通量中,主要来自山西省和保定市,通量强度分别为 $1\,681.62 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $1\,095.27 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$;总流出通量中,石家庄主要向邢台和保定输出,通量强度分别为 $-1\,651.70 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $-815.40 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 。总净通量中,石家庄主要对邢台净流出,流出通量为 $-1\,050.75 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$,主要接收来自山西的净流入,通量强度为 $1\,160.46 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 。与北京相比,石家庄总净

通量较弱,这主要是由于总流入和流出通量强度的绝对值相差较小,二者相互抵消,但较强的总流入和流出通量仍表明石家庄与周边省市存在较强的相互传输效应。

2.4.2 $PM_{2.5}$ 净通量的垂直分布特征

图9为2016年1月北京和石家庄 $PM_{2.5}$ 净通量的垂直分布特征。结果表明 $PM_{2.5}$ 净通量强度随离地高度的不同而不同。对北京来讲,不同离地高度 $PM_{2.5}$ 总净通量表现为正值,表明周边城市单位时间向北京输入 $PM_{2.5}$ 的质量高于北京向周边城市的输出质量。值得注意的是, $PM_{2.5}$ 总净通量从近地面至152 m处逐渐增加,在152~1261 m保持较高强度,并在离地817 m处, $PM_{2.5}$ 总净通量强度最大,达到 $57.04 t \cdot d^{-1}$ 。这主要是因为受冬季西伯利亚高原的影响,低空和高空均盛行较强的西北风,且高空风速更大。通过计算各个离地高度处的流入与流出通量,在817 m处来自张家口的流入通量显著增加,而流出通量相对较小,导致张家口的净通量增幅明显高于其他城市的净通量。总体来讲,在817 m处来自张家口和保定的净流入通量与去向承德和天津的

净流出通量的矢量和则高于其他离地高度,所以北京 $PM_{2.5}$ 总净通量在817 m处强度最高。自此高度之后, $PM_{2.5}$ 总净通量强度逐渐降低,但仍在 $22 t \cdot d^{-1}$ 以上,这也说明高空传输对北京与周边邻近城市大气污染的影响较为突出。各周边城市净通量总体上随高度增加而呈现增长的趋势,其中张家口在整个垂直方向净通量贡献均为正值,强度范围是 $24.43 \sim 112.13 t \cdot d^{-1}$,表明张家口对北京呈较强的净流入,这主要受较高的风速所致。在距地面611 m以上的高度,净流出通量主要来自承德和天津,净流入通量主要来自保定,三城市净通量强度均在1782 m达到最高值,分别为 -45.16 、 -48.28 和 $41.86 t \cdot d^{-1}$ 。对保定和承德来讲,两城市与北京之间产生的净通量在低空和高空表现相反;以承德为例,在离地611 m以下承德对北京表现为较弱的净流入,强度范围介于 $0.85 \sim 6.89 t \cdot d^{-1}$,而离地611 m以上北京对承德表现为较强的净流出,强度范围介于 $-2.62 \sim -45.16 t \cdot d^{-1}$,这与高空与低空下的风向逆转、风速大小和 $PM_{2.5}$ 浓度等多种因素密切相关。

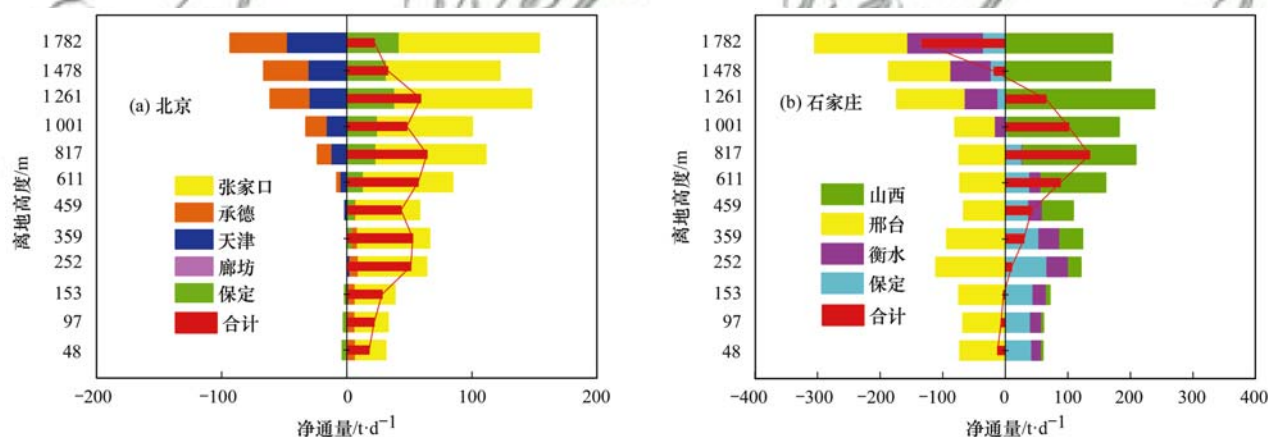


图9 北京和石家庄与周边城市 $PM_{2.5}$ 净通量的垂直分布

Fig. 9 Vertical distribution of $PM_{2.5}$ net fluxes between Beijing and Shijiazhuang and their surrounding areas

对石家庄来讲, $PM_{2.5}$ 总净通量距地面153 m以下为负值,表明近地面单位时间石家庄向周边城市输出 $PM_{2.5}$ 的质量高于周边向自身输入的质量。从离地153~1261 m, $PM_{2.5}$ 总净通量转变为正值且逐渐增加,说明高空单位时间周边城市对石家庄输送 $PM_{2.5}$ 的质量高于石家庄向外输出的量;在离地817 m处, $PM_{2.5}$ 总净通量强度达到峰值,为 $134.81 t \cdot d^{-1}$ 。这主要是由于在离地1001 m以下,净流出通量主要来自邢台,强度变化幅度较小,介于 $-63.34 \sim -111.14 t \cdot d^{-1}$,而净通量主要来自山西和保定,其中离地611 m以下保定净流入贡献最为显著($37.34 \sim 66.49 t \cdot d^{-1}$),但在该高度范围内净流入与净流出通量强度相差较小,导致二者矢量和相互

抵消,总净通量强度较小。在离地611~1001 m高度范围内,受偏西风影响,山西较高的 $PM_{2.5}$ 浓度输入到石家庄,使得山西的净流入通量显著增加,尤其是817 m处通量强度最大,而此时净流出强度变化较小,所以在817 m处,净流入与净流出二者的矢量和叠加最大, $PM_{2.5}$ 总净通量强度最高。在离地1261 m处,虽然山西的净流入通量继续增加,但由于邢台和衡水的净流出通量增加显著,抵消了大部分的净流入通量,使得在离地817~1261 m范围内 $PM_{2.5}$ 总净通量逐渐下降。离地1481~1782 m, $PM_{2.5}$ 总净通量再次转变为负值,说明高空石家庄对周边城市的传输影响仍不容小觑。尤其在离地1782 m处,总净通量为 $-133.12 t \cdot d^{-1}$,其中石家庄

对邢台和衡水的净流出通量均达到峰值,分别为 $-147.25 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $-128.08 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

3 结论

(1)2016 年 1 月京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染较为严重,月均浓度为 $89.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,其中保定、衡水和石家庄 $\text{PM}_{2.5}$ 污染最重,月均浓度高于 $130 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,而秦皇岛、张家口和承德 $\text{PM}_{2.5}$ 污染最轻,月均浓度低于 $45 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

(2)京津冀城市近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 以本地贡献为主,贡献率为 $45.4\% \sim 69.9\%$; 外来传输贡献中,京津冀区域内和区域外贡献率分别为 $4.8\% \sim 49.7\%$ 和 $4.9\% \sim 29.6\%$,尤其是张家口和承德受内蒙古贡献高达 25.7% 和 13.8% ,衡水和沧州受山东省贡献高达 12.9% 和 10.1% 。

(3)北京(石家庄)与其相邻城市存在明显的传输效应,总流入和流出通量分别为 $1915.38 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ ($3849.73 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$) 和 $-1417.01 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ ($-3551.54 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$),两城市接受外来输入影响均高于向外传输的影响,且 $\text{PM}_{2.5}$ 净通量呈现显著的垂直分布特征,离地 1782 m 高度范围内 $\text{PM}_{2.5}$ 总净通量强度范围分别是 $17.86 \sim 64.18 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $-2.95 \sim 134.81 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

(4)北京和石家庄 $\text{PM}_{2.5}$ 总净通量均在离地 817 m 处达到峰值,强度分别为 $64.18 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $134.81 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$,其中北京由于来自西伯利亚高原的季风气候带来了较强的西北风,引起张家口净流入通量显著增加,而石家庄是受偏西风影响,导致来自山西高浓度的 $\text{PM}_{2.5}$ 传输至本地,引起了山西的净流入通量显著增加,以上是导致两城市 $\text{PM}_{2.5}$ 总净通量在离地 817 m 达到峰值的主要原因。

参考文献:

- [1] Zheng G J, Duan F K, Su H, *et al.* Exploring the severe winter haze in Beijing: the impact of synoptic weather, regional transport and heterogeneous reactions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(6): 2969-2983.
- [2] Qi M, Zhu X, Du W, *et al.* Exposure and health impact evaluation based on simultaneous measurement of indoor and ambient $\text{PM}_{2.5}$ in Haidian, Beijing [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **220**: 704-712.
- [3] 王桂林, 张炜. 中国城市扩张及空间特征变化对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3447-3456.
Wang G L, Zhang W. Effects of urban expansion and changes in urban characteristics on $\text{PM}_{2.5}$ pollution in China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3447-3456.
- [4] Song S K, Shon Z H, Park Y H. Diurnal and seasonal characteristics of the optical properties and direct radiative forcing of different aerosol components in Seoul megacity[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **599-600**: 400-412.
- [5] Zhang H Y, Cheng S Y, Li J B, *et al.* Investigating the aerosol mass and chemical components characteristics and feedback effects on the meteorological factors in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **244**: 495-502.
- [6] 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 等. 京津冀区域 $\text{PM}_{2.5}$ 污染相互输送特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 4897-4904.
Wang Y L, Xue W B, Lei Y, *et al.* Regional transport matrix study of $\text{PM}_{2.5}$ in Jingjinji region, 2015 [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 4897-4904.
- [7] Chang X, Wang S X, Zhao B, *et al.* Contributions of inter-city and regional transport to $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei region and its implications on regional joint air pollution control[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **660**: 1191-1200.
- [8] Lv L H, Liu W Q, Zhang T S, *et al.* Observations of particle extinction, $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration profile and flux in north China based on mobile lidar technique [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **164**: 360-369.
- [9] Yang W L, Wang G C, Bi C J. Analysis of long-range transport effects on $\text{PM}_{2.5}$ during a short severe haze in Beijing, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, **17**(6): 1610-1622.
- [10] 薛文博, 付飞, 王金南, 等. 中国 $\text{PM}_{2.5}$ 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 $\text{PM}_{2.5}$ in China [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(6): 1361-1368.
- [11] Zhang H Y, Cheng S Y, Wang X Q, *et al.* Continuous monitoring, compositions analysis and the implication of regional transport for submicron and fine aerosols in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **195**: 30-45.
- [12] Chen D S, Liu X X, Lang J L, *et al.* Estimating the contribution of regional transport to $\text{PM}_{2.5}$ air pollution in a rural area on the North China Plain [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **583**: 280-291.
- [13] Wang L T, Wei Z, Yang J, *et al.* The 2013 severe haze over southern Hebei, China: model evaluation, source apportionment, and policy implications [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(6): 3151-3173.
- [14] Lu M M, Tang X, Wang Z F, *et al.* Source tagging modeling study of heavy haze episodes under complex regional transport processes over Wuhan megacity, Central China [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **231**: 612-621.
- [15] 吕喆, 魏巍, 周颖, 等. 2015~2016 年北京市 3 次空气重污染红色预警 $\text{PM}_{2.5}$ 成因分析及效果评估 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 1-10.
Lü Z, Wei W, Zhou Y, *et al.* Cause and effect evaluation of $\text{PM}_{2.5}$ during three red alerts in Beijing from 2015 to 2016 [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 1-10.
- [16] 朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 等. 京津冀及周边区域 $\text{PM}_{2.5}$ 叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 574-586.
Zhu Y Y, Gao Y X, Chai W X, *et al.* Heavy pollution characteristics and assessment of $\text{PM}_{2.5}$ predicted model Results in Beijing-Tianjin-Hebei region and surrounding areas during November 23 to December 4, 2018 [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 574-586.
- [17] Yang X W, Cheng S Y, Wang G, *et al.* Characterization of volatile organic compounds and the impacts on the regional ozone at an international airport [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **238**: 491-499.

- [18] 张冲, 郎建奎, 程水源, 等. 2016 年京津冀地区红色预警时段 $PM_{2.5}$ 污染特征与浓度控制效果[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3397-3404.
Zhang C, Lang J L, Cheng S Y, *et al.* Characteristics of $PM_{2.5}$ pollution and the efficiency of concentration control during a red alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016 [J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3397-3404.
- [19] Wang G, Cheng S Y, Wei W, *et al.* Characteristics and emission-reduction measures evaluation of $PM_{2.5}$ during the two major events: APEC and Parade [J]. Science of the Total Environment, 2017, **595**: 81-92.
- [20] Zhou Y, Xing X F, Lang J L, *et al.* A comprehensive biomass burning emission inventory with high spatial and temporal resolution in China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, **17**(4): 2839-2864.
- [21] 中国多尺度清单排放模型 MEIC [EB/OL]. <http://www.meicmodel.org/>, 2017-02-26.
- [22] Zhang H Y, Cheng S Y, Yao S, *et al.* Multiple perspectives for modeling regional $PM_{2.5}$ transport across cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region during haze episodes [J]. Atmospheric Environment, 2019, **212**: 22-35.
- [23] 张晗宇, 程水源, 姚森, 等. 2016 年 10 ~ 11 月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 1999-2009.
Zhang H Y, Cheng S Y, Yao S, *et al.* Pollution characteristics and regional transport of atmospheric Particulate matter in Beijing from October to November, 2016 [J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 1999-2009.
- [24] Li H Y, Zhang Q, Zhang Q, *et al.* Wintertime aerosol chemistry and haze evolution in an extremely polluted city of the North China Plain: significant contribution from coal and biomass combustion[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, **17**(7): 4751-4768.
- [25] 李霞, 贾健. 复杂地形多尺度气流对城市大气污染影响的研究进展[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, **10**(6): 1-10.
Li X, Jia J. Research of the influences of the air flows on multiple scales on the transport and diffusion mechanisms of urban air pollution over the complex terrains [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2016, **10**(6): 1-10.
- [26] Lu M, Tang X, Wang Z, *et al.* Source tagging modeling study of heavy haze episodes under complex regional transport processes over Wuhan megacity, central China [J]. Environmental Pollution, 2017, **231**: 612-621.
- [27] Wang X Q, Wei W, Cheng S Y, *et al.* Characteristics and classification of $PM_{2.5}$ pollution episodes in Beijing from 2013 to 2015[J]. Science of the Total Environment, 2018, **612**: 170-179.
- [28] Gao M, Carmichael G R, Wang Y, *et al.* Modeling study of the 2010 regional haze event in the North China Plain [J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2015, **15**(16): 22781-22822.
- [29] Liu Y M, Hong Y Y, Fan Q, *et al.* Source-receptor relationships for $PM_{2.5}$ during typical pollution episodes in the Pearl River Delta city cluster, China[J]. Science of the Total Environment, 2017, **596-597**: 194-206.
- [30] Kasibhatla P, Chameides W L, St. John J. A three-dimensional global model investigation of seasonal variations in the atmospheric burden of anthropogenic sulfate aerosols[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1997, **102**(D3): 3737-3759.
- [31] Kang H Q, Zhu B, Gao J H, *et al.* Potential impacts of cold frontal passage on air quality over the Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, **19**(6): 3673-3685.
- [32] Chang X, Wang S X, Zhao B, *et al.* Assessment of inter-city transport of particulate matter in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18**(7): 4843-4858.

CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, YANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangsuhai Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangsuhai	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)