

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

肆秩芳华担使命 踔厉扬帆向未来  
——庆祝厦门大学环境学科创立40周年



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年11月

第43卷 第11期  
Vol.43 No.11

目次

厦门大学环境学科创立40周年专栏

新污染物共排放对生态环境监测和管理的挑战 ..... 王佩, 黄欣怡, 曹致纬, 吴朝阳, 吕永龙(4801)

河口-近海环境新污染物的环境过程、效应与风险 ..... 王新红, 于晓璇, 王思权, 殷笑晗, 钱韦旭, 林晓萍, 吴越, 刘畅(4810)

海水痕量营养盐和金属的分子光谱分析方法研究进展 ..... 袁东星, 黄勇明, 王婷(4822)

环境水体中硫化物的分析方法:从实验室分析到原位监测 ..... 李鹏, 林坤德, 袁东星(4835)

环境水体中无机砷现场分析方法研究进展 ..... 薄光永, 陈钊英, 弓振斌, 马剑(4845)

海洋痕量元素采样技术和分析方法的发展及展望:厦门大学痕量元素平台建设进展 ..... 黄勇明, 周宽波, 陈耀瑾, 张楠, 杨俊波, 戴民汉, 曹知勉, 蔡毅华(4858)

聚乙烯微塑料的微生物降解研究进展 ..... 骆苑蓉, 钱义谦, 齐雅楠(4869)

水稻土中氮素对微生物固砷的扰动及效应机制 ..... 王锋, 张静, 周少余, 王鸿辉, 李建, 赵聪媛, 黄鹏, 陈铮(4876)

中国海洋生态毒理学研究中的毒性测试生物 ..... 史天一, 洪海征, 王明华, 谭巧国, 史大林(4888)

中国油气系统甲烷逸散排放估算 ..... 陈春赐, 吕永龙, 贺桂珍(4905)

2015~2020年厦漳泉地区大气氨排放清单及分布特征 ..... 李香, 吴水平, 姜炳祺, 刘怡靖(4914)

九龙江口微塑料与抗生素抗性基因污染分布特征 ..... 程宏, 陈荣(4924)

厦门湾沙滩沉积物微塑料污染特征 ..... 姚蕊, 刘花台, 李永玉, 刘潇雅, 吴海波, 王新红(4931)

九龙江口-厦门湾海域中溶解态痕量金属的时空分布特征与影响机制 ..... 戚柳倩, 岳新利, 钟灏文, 王棋, 王德利, 陈能汪(4939)

福建省流域-近海溶解氧时空格局与低氧调控机制 ..... 杨艾琳, 杨芳, 李少斌, 余其彪, 陈能汪(4950)

厦门西溪河口沉积物活性磷的分布特征及迁移转化机制 ..... 潘峰, 蔡宇, 郭占荣, 王新红(4961)

改性生物炭固定床对模拟湖水体中  $Mn^{2+}$  的吸附 ..... 赵浩, 叶志隆, 王佳妮, 蔡冠竟(4971)

基于表面增强拉曼光谱技术的饮用水中痕量恩诺沙星和环丙沙星快速检测 ..... 徐婧, 郑红, 卢江龙, 刘国坤(4982)

紫外驱动高级氧化法降解水体中的磷酸三苯酯 ..... 徐子文, 印红玲, 熊远明, 宋娇娇, 谯扬(4992)

研究报告

2019年秋季海南省4次臭氧污染过程特征及潜在源区分析 ..... 符传博, 陈红, 丹利, 徐文帅(5000)

伊犁河谷夏季  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  中水溶性无机离子浓度特征和形成机制 ..... 陈巧, 谷超, 徐涛, 周春华, 张国涛, 赵雪艳, 吴丽萍, 李新琪, 杨文(5009)

城区与郊区  $PM_{2.5}$  污染及传输特征差异性 ..... 齐鹏, 周颖, 程水源, 白伟超(5018)

南京北郊 BTEX 特征及健康风险评估 ..... 冯悦政, 安俊琳, 张玉欣, 王俊秀(5030)

我国陆域水体系统表层水中微塑料生态风险评估 ..... 孙晓楠, 陈浩, 贾其隆, 朱弈, 马长文, 叶建锋(5040)

东江流域不同空间尺度景观格局对水质影响分析 ..... 陈优良, 邹文敏, 刘星根, 曾金凤, 李丹, 郑汉奕(5053)

长江与黄河源丰水期地表水中汞的分布特征、赋存形态及来源解析 ..... 刘楠涛, 吴飞, 袁巍, 王训, 王定勇(5064)

青藏高原湖泊水环境特征及水质评价 ..... 刘智琦, 潘保柱, 韩语, 李刚, 王韬轶(5073)

基于水化学与硫同位素的卡林型金矿区岩溶水地球化学特征及控制因素 ..... 查学芳, 吴攀, 李学先, 陈世万, 黄家琰, 李清光, 陈思睿(5084)

丹江口水库真核浮游植物群落分布特征及其与环境因子的关系 ..... 贺玉晓, 买思婕, 任玉芬, 李卫国, 赵同谦, 马寅男(5096)

镉沸石对磷和重金属的吸附与底泥钝化性能 ..... 王哲, 朱俊, 李雯, 闫德馨, 董雯, 刘玉玲, 李家科(5106)

基于宏基因组与宏转录组分析石化废水生物处理系统脱氮功能菌群 ..... 章旭, 周佳佳, 周珉, 罗西子, 严新杰, 刘勇弟, 厉巍(5115)

寒冷地区 IFAS + 磁混凝污水厂菌群结构和抗生素抗性基因分析 ..... 杜文琰, 姚俊芹, 马辉英, 胡渊鑫, 张春雷, 陈银广(5123)

中国旱作农田一氧化氮排放及减排:Meta分析 ..... 田政云, 吴雄伟, 吴媛媛, 魏佳楠, 白鹤, 顾江新(5131)

硝化抑制剂对我国蔬菜生产产量、氮肥利用率和氧化亚氮减排效应的影响:Meta分析 ..... 刘发波, 马笑, 张芬, 梁涛, 黎亮武, 王军杰, 陈新平, 王孝忠(5140)

不同施肥措施对热带地区稻菜轮作体系土壤  $CH_4$  和  $N_2O$  排放的影响 ..... 邵晓辉, 汤水荣, 孟磊, 伍延正, 李金秋, 缙广林(5149)

不同水分条件下土地利用方式对我国热带地区土壤硝化过程及  $NO$  和  $N_2O$  排放的影响 ..... 唐瑞杰, 胡煜杰, 赵彩悦, 赵炎, 袁新生, 汤水荣, 伍延正, 孟磊(5159)

基于文献计量分析的长江经济带农田土壤重金属污染特征 ..... 刘孝严, 樊亚男, 刘鹏, 吴秋梅, 胡文友, 田康, 黄标(5169)

基于 EBK 插值预测和 GDM 模型的襄州区耕地土壤重金属时空分布及来源变化分析 ..... 高浩然, 周勇, 刘甲康, 程晓明, 郭嵩, 江衍, 谭恒鑫(5180)

基于 GIS 对宁夏某铜银矿区周边土壤重金属来源解析 ..... 张扣扣, 贺婧, 钟艳霞, 魏琪琪, 陈锋(5192)

老化作用对生物炭钝化白云鄂博矿区碱性土壤中  $Cd^{2+}$  的影响 ..... 王哲, 程俊丽, 卞园, 郑春丽, 王维大, 姜庆宏(5205)

磁性氧化铁/桑树杆生物炭的制备及其对砷污染土壤溶解性有机碳和砷形态的影响 ..... 芦琳, 颜利玲, 梁美娜, 成官文, 朱宗强, 朱义年, 王敦球(5214)

牡蛎壳粉和石灰改良酸性水稻土对磷有效性、形态和酶活性的影响 ..... 赵丽芳, 黄鹏武, 杨彩迪, 卢升高(5224)

磷、锌和镉交互作用对小白菜生长和镉累积的影响 ..... 帅祖革, 刘汉燧, 崔浩, 魏世强(5234)

重庆开州区菜地土壤抗生素污染特征及潜在生态环境风险评估 ..... 方林发, 叶莘莘, 方标, 范晓霞, 高坤鹏, 李士洋, 陈新平, 肖然(5244)

基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应 ..... 侯建坤, 陈建军, 张凯琪, 周国清, 尤号田, 韩小文(5253)

黄土丘陵区不同恢复植被类型的固碳特征 ..... 许小明, 张晓萍, 何亮, 郭晋伟, 薛帆, 邹亚东, 易海杰, 贺洁, 王浩嘉(5263)

土壤多功能性对微生物多样性降低的响应 ..... 陈桂鲜, 吴传发, 葛体达, 陈剑平, 邓扬悟(5274)

氮添加对不同坡度退化高寒草甸土壤真菌多样性的影响 ..... 苏晓雪, 李希来, 李成一, 孙华方(5286)

碳减排背景下我国与世界主要能源消费国能源消费结构与模式对比 ..... 李辉, 庞博, 朱法华, 孙雪丽, 徐静馨, 王圣(5294)

中国能源消费碳排放的空间化与时空动态 ..... 郝瑞军, 魏伟, 刘春芳, 顾斌斌, 杜海波(5305)

京津冀及周边地区“2+26”城市结构性调整政策的  $CO_2$  协同减排效益评估 ..... 杨添祺, 王洪昌, 张辰, 朱金伟, 崔宇韬, 谭玉玲, 束樞(5315)

我国塑料污染防治政策分析与建议 ..... 李欢, 朱龙, 沈茜, 贺亚楠, 邓义祥, 安立会(5326)

《环境科学》征订启事(4821) 《环境科学》征稿简则(5213) 信息(5052, 5191, 5273)

# 城区与郊区 PM<sub>2.5</sub> 污染及传输特征差异性

齐鹏, 周颖, 程水源\*, 白伟超

(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:** 基于云高仪激光雷达、飞机 AMDAR 数据和常规站点等多源观测数据, 并与数值模拟 (CAMx-PSAT 模型) 相结合, 以京津冀典型城市——北京城区与郊区 (密云) 和石家庄城区与郊区 (平山) 为案例研究区域, 对城区和郊区边界层高度差异 ( $\Delta PBLH$ )、地面 PM<sub>2.5</sub> 浓度差异 ( $\Delta Surf\_PM_{2.5}$ )、高空 PM<sub>2.5</sub> 浓度差异 ( $\Delta Vert\_PM_{2.5}$ ) 和传输通量强度及高度分布特征差异进行分析。结果表明, 由于人为热源、短波辐射和热力湍流等因素, 导致城区年均边界层高度 (PBLH) 较郊区高 8%~29%, 且不同季节下城区 PBLH 月均较郊区高 2% (石家庄 4 月)~47% (北京 7 月)。由于人为排放、逆温和大气湍流等共同作用, 在 0~1 260 m 之间等高度城区年均  $\rho(PM_{2.5})$  较郊区高 0.1 (石家庄)~29.7 (北京)  $\mu g \cdot m^{-3}$ , 随高度增加而减小。城区年均总净通量强度远大于郊区, 城区表现为流出, 郊区表现为流入, 是由于城区低压和郊区高压, 形成城郊热力环流。北京城区和郊区与周边的年均总净通量强度之和 ( $44.77 t \cdot d^{-1}$ ) 大于石家庄 ( $34.44 t \cdot d^{-1}$ )。受风速和 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响, 在 0~1 260 m 之间, 城区和郊区与周边的净通量随离地高度的增加通量强度呈现明显增大趋势, 其中 1 月城区和 4 月郊区与周边的传输交换对环境影响最为明显。不同季节下城区和郊区最大净通量的强度差异明显, 两者相差 2.23~4.48 倍; 但最大净通量强度的高度特征差异较小, 主要位于 611~1 260 m。

**关键词:** 边界层高度; PM<sub>2.5</sub>; 传输特征; 城区; 郊区

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)11-5018-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202201227

## Difference in PM<sub>2.5</sub> Pollution and Transport Characteristics Between Urban and Suburban Areas

QI Peng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan\*, BAI Wei-chao

(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 multi-source observation data, such as lidar ceilometer, aircraft AMDAR, and conventional sites, combined with numerical simulation (CAMx-PSAT), this study took the typical cities of the Beijing-Tianjin-Hebei region—Beijing (BJ) urban area and suburbs (Miyun) and Shijiazhuang (SJZ) urban area and suburbs (Pingshan) as the case study areas. The differences in boundary layer height between urban areas and suburbs ( $\Delta PBLH$ ), surface PM<sub>2.5</sub> mass concentration ( $\Delta Surf\_PM_{2.5}$ ), vertical PM<sub>2.5</sub> mass concentration ( $\Delta Vert\_PM_{2.5}$ ), and transmission flux intensity and height distribution characteristics were analyzed. The results showed: due to factors such as anthropogenic heat sources, short-wave radiation, and thermal turbulence, the annual average planetary boundary layer height in urban areas was 8%~29% higher than that in the suburbs, and in different seasons, the monthly average planetary boundary layer height in urban areas was 2% (April in SJZ)-47% (July in BJ) higher than that in the suburbs. Due to the combined effects of anthropogenic emissions, inversions, and atmospheric turbulence, the annual average  $\rho(PM_{2.5})$  in urban areas between 0-1260 m was higher than that in suburbs by 0.1 (SJZ)-29.7 (BJ)  $\mu g \cdot m^{-3}$  and decreased with the increase in height. The annual average total net flux intensity in urban areas was much greater than that in suburbs, with outflows in urban areas and inflows in suburbs; due to the urban low pressure and the suburban high pressure, suburban thermal circulation was formed. The annual average total net flux intensity in BJ ( $44.77 t \cdot d^{-1}$ ) was greater than that in SJZ ( $34.44 t \cdot d^{-1}$ ). Affected by wind speed and PM<sub>2.5</sub> mass concentration, between 0-1260 m, the fluxes in urban areas and suburbs and surrounding areas showed an obvious trend of increasing net flux intensity with the increase in height above the ground. Furthermore, the transmission exchange between urban areas and suburbs and surrounding areas in January and April had the most obvious impact on the environment. The intensity of the maximum net flux in the lower urban areas and the suburbs in different seasons was significantly different, and the difference between the two was 2.23-4.48 times; however, the height characteristic difference in the intensity of the maximum net flux was small, mainly located at 611-1260 m.

**Key words:** boundary layer height; PM<sub>2.5</sub>; transport characteristics; urban areas; suburbs

随着环境治理进程不断深入, 治理手段从点到面, 再到区域联防联控, 城区环境质量普遍持续改善, 但远离城区的郊区环境问题也随之暴露出来<sup>[1-3]</sup>。在关注人群密集的城区环境问题的同时, 也应对气象、地形和排放源结构等方面均与城区有不同特征的郊区加强关注<sup>[4]</sup>, 以便开展区域协同治理, 全面推进城郊环境质量整体改善, 优化经济结构。因此分析城区和郊区污染特征和差异, 既要关注城郊气象条件差异, 又要理清 PM<sub>2.5</sub> 污染和传输特征差异<sup>[5]</sup>。气象条件可以影响 PM<sub>2.5</sub> 的聚集、扩散和输

送过程<sup>[6-8]</sup>, 从而对污染物的浓度产生影响。有研究表明风速和湿度对 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响至关重要<sup>[9]</sup>。Chen 等<sup>[10]</sup>发现京津冀地区气象条件和污染的关系密切。史旭荣等<sup>[11]</sup>对比不同年北京气象, 发现气象转差可使 PM<sub>2.5</sub> 同比上升约 3.66%。郭滢超等<sup>[12]</sup>在北京市 PM<sub>2.5</sub> 周期性变化特征与影响机制中发现, 大

收稿日期: 2022-01-22; 修订日期: 2022-03-23

作者简介: 齐鹏(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境规划管理与污染防治, E-mail: qipeng0714@emails.bjut.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: chengsy@bjut.edu.cn

气边界层过程是 PM<sub>2.5</sub> 日变化的主要影响机制, 导致 PM<sub>2.5</sub> 浓度白天低和夜间高; 有研究证明边界层结构可以影响 PM<sub>2.5</sub> 聚集、扩散和输送等<sup>[6~8]</sup>, 但是关于城区和郊区边界层结构差异的研究较少. 在 PM<sub>2.5</sub> 污染特征方面, 目前研究主要集中在城市 PM<sub>2.5</sub> 污染时空分布等方面. 杨龙等<sup>[5]</sup> 对北京秋冬季近地层 PM<sub>2.5</sub> 浓度垂直分布特征进行研究, 发现秋冬两季 PM<sub>2.5</sub> 的垂直分布随高度增加而呈对数递减的规律. 安欣欣等<sup>[13]</sup> 认为北京冬季日变化曲线均呈单峰分布特征, 且与冬季燃烧源排放时间集中在夜间和夜间边界层下降有关. 京津冀地区郊区燃煤源对本地贡献较大, 尤其是冬季<sup>[14]</sup>. 有研究发现城区 PM<sub>2.5</sub> 和郊区有显著性差异, 中国代表性城市城区的 PM<sub>2.5</sub> 浓度高于郊区和乡村<sup>[15]</sup>, 城郊大气污染物浓度具有显著的时间变化特征<sup>[16]</sup>. Zheng 等<sup>[17]</sup> 在研究北京及周边地区城乡 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化时发现, 城乡之间的浓度差和城市的热岛效应存在显著的相关性. 可以看出, 目前的研究大多只关注到城市或城郊近地面 PM<sub>2.5</sub> 污染特征差异<sup>[18~20]</sup>, 但是对城郊 PM<sub>2.5</sub> 垂直分布差异的分析关注较少. 在 PM<sub>2.5</sub> 传输方面, 王燕丽等<sup>[21]</sup> 通过 CAMx-PSAT 建立了京津冀传输矩阵, 结果表明京津冀城市的年均污染贡献主要以本地贡献为主. Zhang 等<sup>[22,23]</sup> 研究了使用 WRF-CAMx 模拟京津冀与周边 PM<sub>2.5</sub> 的跨界通量, 表明 62.89% 来自本地贡献, 37.11% 来自传输贡献. 张智答等<sup>[24]</sup> 在京津冀地区典型城市秋冬季 PM<sub>2.5</sub> 输送特征研究中, 发现近地面主要表现为毗邻城市向北京和石家庄输送 PM<sub>2.5</sub>. 李珊珊等<sup>[25]</sup> 分析京津冀重污染过程时, 发现重污染日和非重污染日相比, 其外来污染占比明显上升. 董文成<sup>[26]</sup> 揭示了大气污染物在城市下垫面传输扩散的物理机制, 初步构建了 WRF-Fluent 嵌套的污染预报评估模式系统. 但是多数研究集中于传输路径<sup>[27~30]</sup> 和传输贡献<sup>[21~23]</sup> 等机制方面的研究, 量化研究区域输送通量强度较少<sup>[31~33]</sup>, 缺乏对城区和郊区大气污染物传输通量强度及高度分布特征差异的研究.

因此, 本文基于云高仪激光雷达、飞机 AMDAR 数据和常规站点等多源观测数据, 并结合数值模拟 (CAMx-PSAT 模型), 以京津冀典型城市——北京城区与郊区 (密云) 和石家庄城区与郊区 (平山) 为案例研究区域, 对城区与郊区的边界层高度差异 ( $\Delta$ PBLH)、地面浓度差异 ( $\Delta$ Surf\_PM<sub>2.5</sub>)、高空浓度差异 ( $\Delta$ Vert\_PM<sub>2.5</sub>) 和传输通量强度及高度分布特征的差异进行分析, 以期为我国开展区域协同治理, 全面改善城郊环境质量, 提供科学支持.

## 1 材料与方法

### 1.1 数据收集

研究北京和石家庄近地面 PM<sub>2.5</sub> 浓度模拟验证数据来自中国环境监测总站 (<http://www.cnemc.cn/sss/>); 北京和石家庄的近地面气象要素 (温度  $T_2$ , 风速 WS) 模拟验证数据来自中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>); AMDAR 数据来自中国民用航空华北地区管理局, 验证模拟边界层高度<sup>[34]</sup>; 不同高度后向散射系数数据来自中国科学院大气物理研究所<sup>[24,34~36]</sup>. 采用 WRF-ARW (v4.3) 中尺度气象模型生成三维气象场, 主要的输入数据如下: 地形和土地利用等使用官方公布的地理数据 (<https://www2.mmm.ucar.edu>), 并在 WPS 中将数据差值到设置的双层网格中; 初始和边界场数据来自美国国家环境预报中心 (NCEP, <https://www.epa.gov/>), 时间分辨率为 6 h, 空间分辨率为 1°. 模型为双层嵌套, 外层的排放清单来自清华大学<sup>[37,38]</sup>; 内层的排放清单基于京津冀地区年鉴统计数据, 按照中国大气污染源清单编制指南等方法, 自下而上建立的京津冀人为源排放清单<sup>[22,23]</sup>.

### 1.2 模型设置与验证

#### 1.2.1 模型模拟

本研究采用 WRF-CAMx 模型对研究区域进行空气质量模拟, 采用双层嵌套, 外层为内层提供边界条件, 以提高内层模拟的准确性. 外层包括京津冀地区、山东省、内蒙古东南地区、山西省、陕西北部、河南北部和辽宁西南地区, 网格分辨率为 27 km; 内层主要为京津冀及周边地区, 网格分辨率为 9 km, 研究区域见图 1 所示. 为研究城郊 PM<sub>2.5</sub> 传输通量特征, 选取城区和郊区为研究区域, 高度范围为 1 260 m 以内. 其中通量正值为区域输入的 PM<sub>2.5</sub> 为流入通量, 负值为区域输出的 PM<sub>2.5</sub> 为流出通量, 将不同高度的流入通量与流出通量进行矢量加和, 得到区域的总净通量. WRF (v4.3) 和 CAMx (v6.50) 的模型参数设置<sup>[39,40]</sup>, 具体参数方案见表 1. 选取 2017 年的 1、4、7 和 10 月分别代表冬、春、夏和秋这 4 个季节进行模拟.

#### 1.2.2 模型验证

为定量评估 WRF-CAMx 模式模拟效果, 采用相关系数 (correlation coefficient, COR)、标准化平均偏差 (normalized mean bias, NMB) 和标准化平均误差 (normalized mean error, NME) 来评估模拟值的准确性<sup>[41]</sup>. 验证结果见表 2. 北京和石家庄近地面的 PM<sub>2.5</sub> 浓度的模拟值和监测值的相关系数在 0.69 ~ 0.80 之间, 相关性较好; NMB 的范围在 -16.13% ~

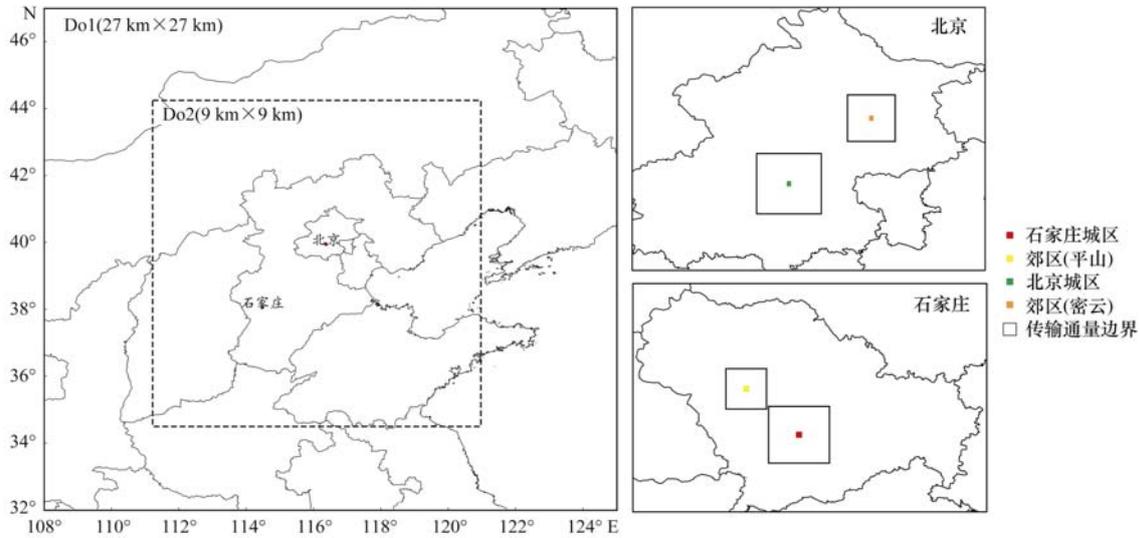


图1 研究区域示意

Fig. 1 Study region

表1 WRF 和 CAMx 模型参数设置

Table 1 WRF and CAMx model parameter settings

模型参数	WRF(v4.3)	模型参数	CAMx(v6.50)
嵌套网格	双层嵌套	气相化学机制	CB05
微物理过程方案	WSM6	气溶胶化学机制	CF
长波辐射方案	RRTM	光化学速率	In-line
短波辐射方案	Dudhia	网格烟羽模块	关
近地层方案	Monin-Obukhov	水平平流方案	PPM
陆面过程方案	Noah	垂直对流方案	隐式欧拉
边界层方案	YSU	水平扩散方案	显式同步
积云对流方案	Kain-Fritsch	垂直扩散方案	隐式欧拉
		干沉降方案	Wesely89

22.73%; NME 的范围在 18.95%~45.38%; 北京和石家庄两地近地面  $PM_{2.5}$  浓度模拟值均存在一定低估, 主要由排放清单的不确定性和模型机制的不完善造成的<sup>[42]</sup>. 北京和石家庄两地近地面的风速 (WS) 的 COR 的范围在 0.55~0.74 之间, NMB 的范围在 18.09%~36.56%, NME 的范围在 23.13%~106.63%; 地表风速被高估, 主要是因

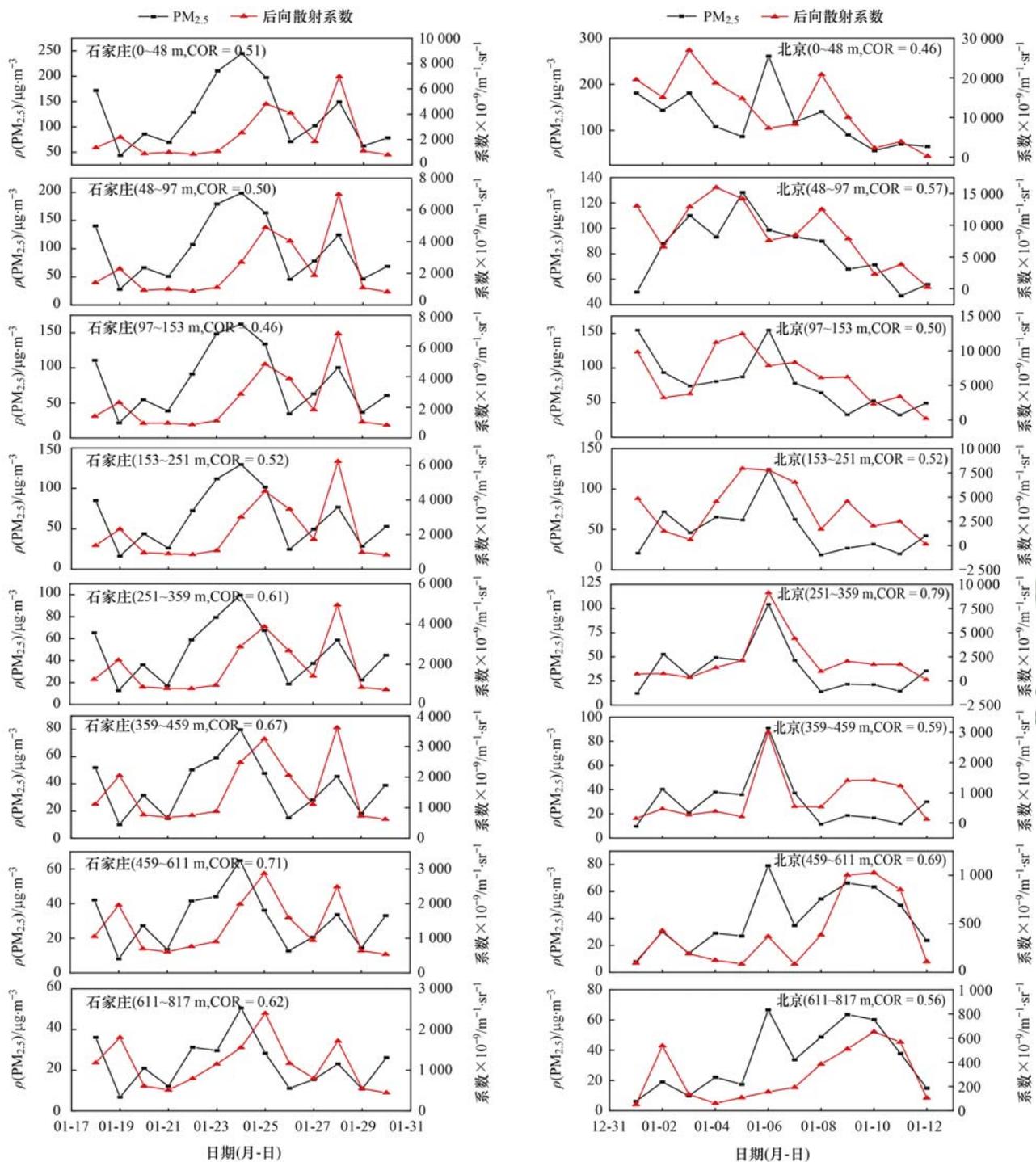
为土地利用类型对地表风速的影响较为显著<sup>[43]</sup>. 温度 ( $T_2$ ) 的 COR 的范围在 0.73~0.89 之间; NMB 的范围在 1.89%~9.67%; NME 的范围在 5.86%~24.34%. 边界层高度 (PBLH) 的 COR 的范围在 0.42~0.73 之间; NMB 的范围在 -49.40%~24.74%; NME 的范围在 22.48%~57.14%; 模拟值效果可接受.

此外, 因涉及高空  $PM_{2.5}$  浓度, 因此需对垂直方向  $PM_{2.5}$  浓度进行验证. 后向散射系数是表征气溶胶光学特性的参数, 可以间接地反映出垂直方向  $PM_{2.5}$  浓度特征<sup>[34]</sup>, 表现良好的正相关性<sup>[44]</sup>. 图 2 为石家庄和北京垂直方向  $PM_{2.5}$  浓度和后向散射系数的日际变化. 结果显示: 不同高度下  $PM_{2.5}$  和后向散射系数均呈现较高的正相关性, 石家庄  $PM_{2.5}$  与后向散射系数的 COR 为 0.46~0.71, 北京  $PM_{2.5}$  和后向散射系数的 COR 为 0.46~0.79, 模拟结果可以较好反映垂直方向  $PM_{2.5}$  浓度变化特征.

表2 模拟值与监测值的对比

Table 2 Comparison of simulated and monitored values

参数	指标	1月		4月		7月		10月	
		北京	石家庄	北京	石家庄	北京	石家庄	北京	石家庄
$PM_{2.5}$	COR	0.73	0.73	0.73	0.76	0.79	0.69	0.75	0.80
	NMB/%	22.73	-12.21	-4.56	-4.17	-11.31	-16.13	14.44	-7.73
	NME/%	45.38	21.95	32.01	28.33	18.95	21.94	41.22	23.89
风速 (WS)	COR	0.72	0.66	0.62	0.69	0.72	0.55	0.54	0.63
	NMB/%	35.91	29.96	18.09	30.05	31.34	32.36	36.56	30.84
	NME/%	45.90	62.20	23.13	60.05	45.45	42.36	106.63	45.42
温度 ( $T_2$ )	COR	0.81	0.80	0.89	0.82	0.73	0.79	0.74	0.78
	NMB/%	7.85	6.92	4.72	2.26	3.44	9.36	9.67	1.89
	NME/%	14.82	24.34	9.42	5.86	6.62	9.62	10.38	7.57
边界层高度 (PBLH)	COR	0.63	0.58	0.42	0.57	0.52	0.47	0.54	0.73
	NMB/%	-49.40	-48.22	9.85	24.74	-4.16	-0.89	-48.87	-48.53
	NME/%	52.66	57.14	32.05	49.00	22.48	36.85	48.87	48.53



以 2017 年 1 月为例

图 2 石家庄城区与北京城区不同高度 PM<sub>2.5</sub> 与后向散射系数日际变化

Fig. 2 Diurnal variation in PM<sub>2.5</sub> and backscattering coefficient at different heights in Shijiazhuang and Beijing

### 1.3 传输通量计算

PM<sub>2.5</sub> 通量是指在单位时间内 PM<sub>2.5</sub> 通过某个横截面的总质量<sup>[45]</sup>. 有研究表明, PM<sub>2.5</sub> 的传输主要发生在离地 1 300 m 以下<sup>[46]</sup>, 因此选取模式前 10 层 (1 260 m 以下) 范围为 PM<sub>2.5</sub> 传输垂直横截面, 研究垂直方向的 PM<sub>2.5</sub> 传输通量特征.

本研究中, 将模拟区域看作多个网格组成的三维立体箱体, 以 CAMx 的模拟结果作为在每个网格

PM<sub>2.5</sub> 浓度 ( $\rho$ ), 基于 WRF 模拟结果得到每个网格的三维风场, 结合网格的分辨率和网格的垂直层数, 以目标城区 (或郊区) 为中心, 指向目标城区 (或郊区) 中心的为流入, 反之为流出. 传输通量的计算式 (1) 如下:

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

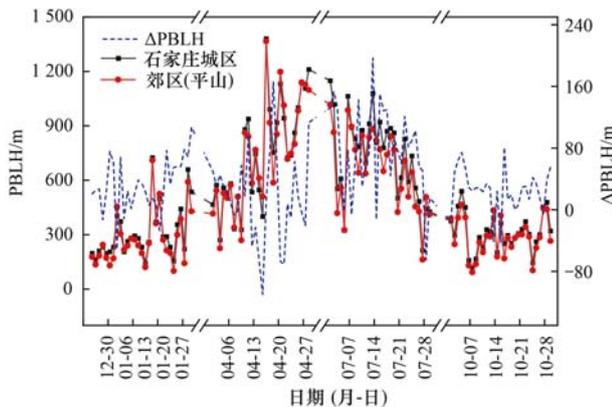
式中, Flux 为  $PM_{2.5}$  传输通量,  $t \cdot d^{-1}$ ;  $h$  为模型设置的垂直层数,  $m$ ;  $l$  为区域边界线的长度,  $m$ ;  $L$  为网格的分辨率,  $km$ ;  $H_k$  为垂直层  $k$  和  $k+1$  层间的高度差;  $\rho$  为  $PM_{2.5}$  浓度,  $\mu g \cdot m^{-3}$ ;  $v$  为风速,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $s$  为风向, ( $^\circ$ ).  $n$  为垂直界面的法向量, 无量纲.

## 2 结果与讨论

### 2.1 城郊 PBLH 差异性分析

本研究基于 WRF 模拟结果, 分析城区和郊区 PBLH 特征和差异.

从整体角度看, 石家庄城区年均 PBLH 比郊区(平山)年均 PBLH 高大约 8%; 北京城区年均 PBLH 比郊区(密云)年均 PBLH 高大约 29%. 从季节角度看(图 3), 石家庄城区 PBLH 月均值较郊区(平山)



高约 12% (7 月) > 11% (1 月) > 9% (10 月) > 2% (4 月); 北京城区的 PBLH 月均值较郊区(密云)高约 47% (7 月) > 28% (10 月) > 24% (4 月) > 16% (1 月). 各代表月月均值表现为城区 PBLH 大于郊区, 北京  $\Delta PBLH$  大于石家庄. 尤其 7 月, 在气象和人为双重因素影响下,  $\Delta PBLH$  大于其他月份; 一方面是夏季气温高, 太阳短波辐射强, 地表热力条件强, 大气的热力湍流运动强, 有利于空气的对流运动; 另一方面归结于城区规模越大, 人为放热源越多, 城区绿化面积小, 热容量大, 相比于郊区可以获得太阳更多的短波辐射, 进一步抬升城区 PBLH. 此外, 城区缓解热岛效应能力减弱, 进而加剧湍流活动, 使得城区的混合层发展高度大于郊区<sup>[47,48]</sup>.

如图 4 所示, 石家庄  $\Delta PBLH$  小时变化范围

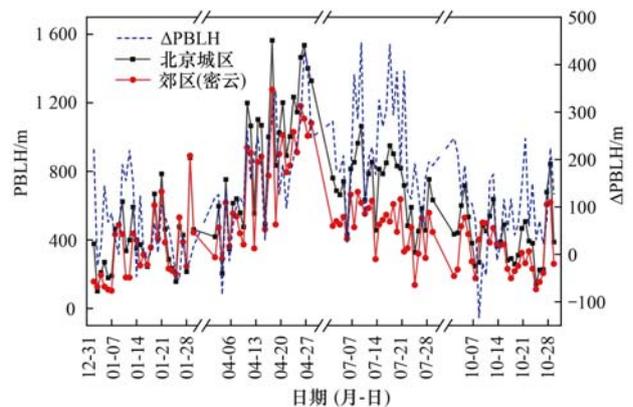


图 3 2017 年石家庄城区与郊区(平山)和北京城区与郊区(密云)的 PBLH 和  $\Delta PBLH$  逐日变化

Fig. 3 Diurnal variations in PBLH and  $\Delta PBLH$  in SJZ urban areas and suburbs (Pingshan), BJ urban areas and suburbs (Miyun) in 2017

(-78 ~ 293 m) 小于北京(-30 ~ 615 m). 石家庄  $\Delta PBLH$  从 19:00 到次日 08:00 为 -10 ~ 51 m; 北京  $\Delta PBLH$  从 21:00 到次日 08:00 为 -30 ~ 94 m. 说明夜间城区和郊区 PBLH 相差不大, 由于石家庄和北京西部是太行山地, 夜间沿山坡下降的山风可能会导致郊区近地面逆温层变厚<sup>[49]</sup>. 不同季节下  $\Delta PBLH$  小时变化的峰值及其出现时间不同. 石家庄 1 月  $\Delta PBLH$  最大值(123 m) 出现时间最早(15:00), 7 月  $\Delta PBLH$  最大值(193 m) 出现时间最晚(18:00); 北京 1 月  $\Delta PBLH$  最大值(244 m) 出现时间最早(16:00), 7 月  $\Delta PBLH$  最大(615 m) 出现时间最晚(18:00).

### 2.2 城郊 $PM_{2.5}$ 浓度差异性研究

#### 2.2.1 地面 $PM_{2.5}$ 浓度差异分析

采用城区地面  $PM_{2.5}$  浓度小时值减郊区地面  $PM_{2.5}$  浓度小时值的差值定量分析城郊差异, 以  $\Delta Surf\_PM_{2.5}$  表示. 选取 2017 年 1、4、7 和 10 月分别代表春夏秋冬四季.

图 5 为 2017 年石家庄城区与郊区(平山)和北

京城区与郊区(密云)的地面  $PM_{2.5}$  和  $\Delta Surf\_PM_{2.5}$  逐日变化. 从年均角度看, 城区年均  $PM_{2.5}$  浓度大于郊区, 北京年均  $\Delta Surf\_PM_{2.5}$  ( $15 \mu g \cdot m^{-3}$ ) 大于石家庄 ( $2 \mu g \cdot m^{-3}$ ). 从月均角度看, 石家庄  $\Delta Surf\_PM_{2.5}$  月均值呈现出 1 月 ( $12 \mu g \cdot m^{-3}$ ) > 10 月 ( $11 \mu g \cdot m^{-3}$ ) > 4 月 ( $9 \mu g \cdot m^{-3}$ ) > 7 月 ( $7 \mu g \cdot m^{-3}$ ). 北京  $\Delta Surf\_PM_{2.5}$  月均值呈现出 1 月 ( $60 \mu g \cdot m^{-3}$ ) > 10 月 ( $30 \mu g \cdot m^{-3}$ ) > 4 月 ( $16 \mu g \cdot m^{-3}$ ) > 7 月 ( $13 \mu g \cdot m^{-3}$ ); 石家庄和北京  $\Delta Surf\_PM_{2.5}$  均呈现明显的季节性特征, 主要表现为 1、10 月大于 4、7 月, 并且在 1 月  $\Delta Surf\_PM_{2.5}$  日均值高值出现次数较多; 首先冬季城区的人为取暖排放是主要原因, 其次, 冬季边界层高度较低, 大气结构稳定, 城区容易形成逆温层, 抑制湍流活动, 不利于  $PM_{2.5}$  水平扩散和传输, 导致近地面  $PM_{2.5}$  聚集. 除此之外, 如 2017 年 1 月 10 ~ 28 日, 石家庄  $\Delta Surf\_PM_{2.5}$  日均值出现多次负值; 2017 年 4 月, 北京  $\Delta Surf\_PM_{2.5}$  日均值也出现负值的情况, 很大程度上可能是郊区不利的气象条件(沙尘天气)造成的, 从而导致郊区  $PM_{2.5}$  增大.

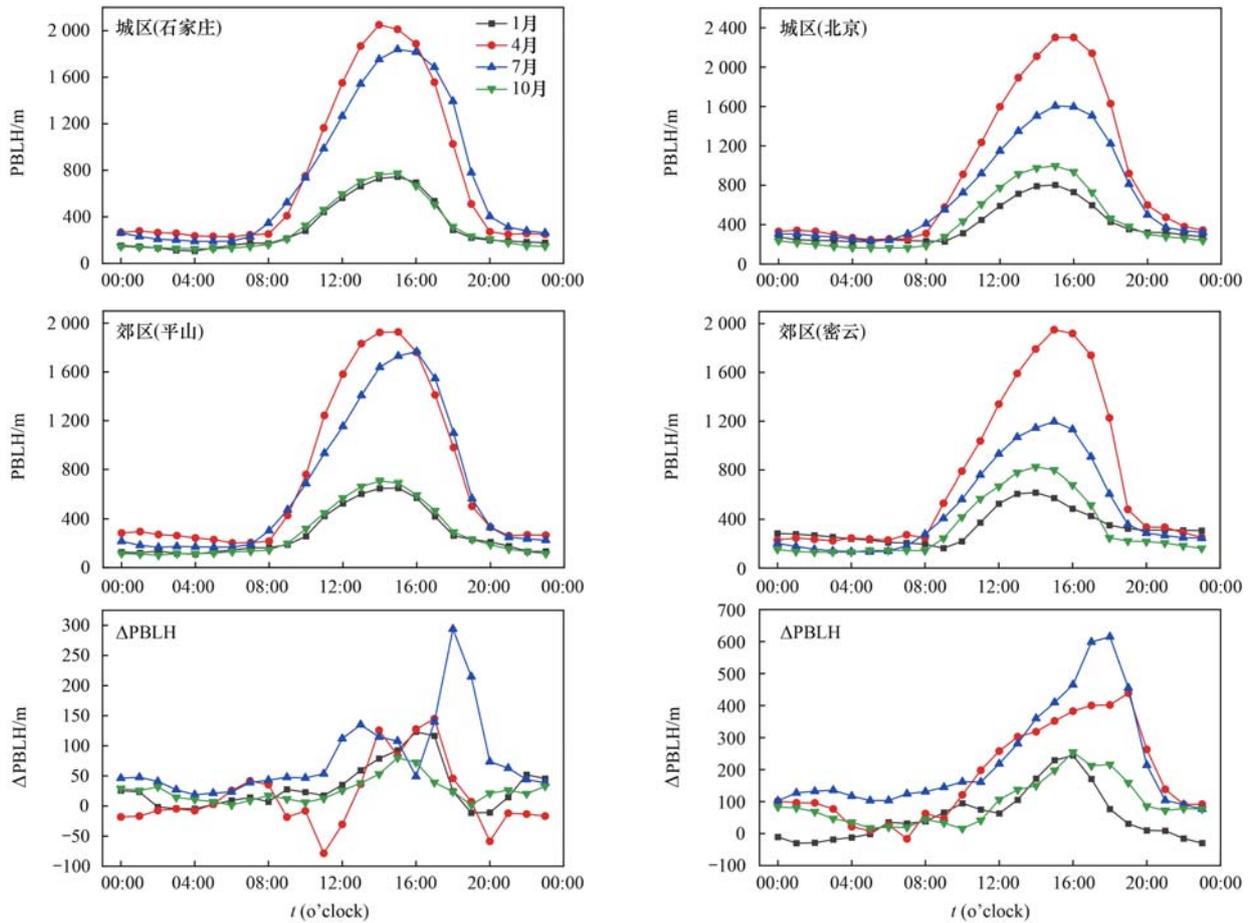


图 4 2017 年石家庄城区与郊区(平山)和北京城区与郊区(密云)的 PBLH 和 ΔPBLH 小时变化

Fig. 4 Hourly variation in PBLH and ΔPBLH in SJZ urban area and suburbs (Pingshan), BJ urban area and suburbs (Miyun) in 2017

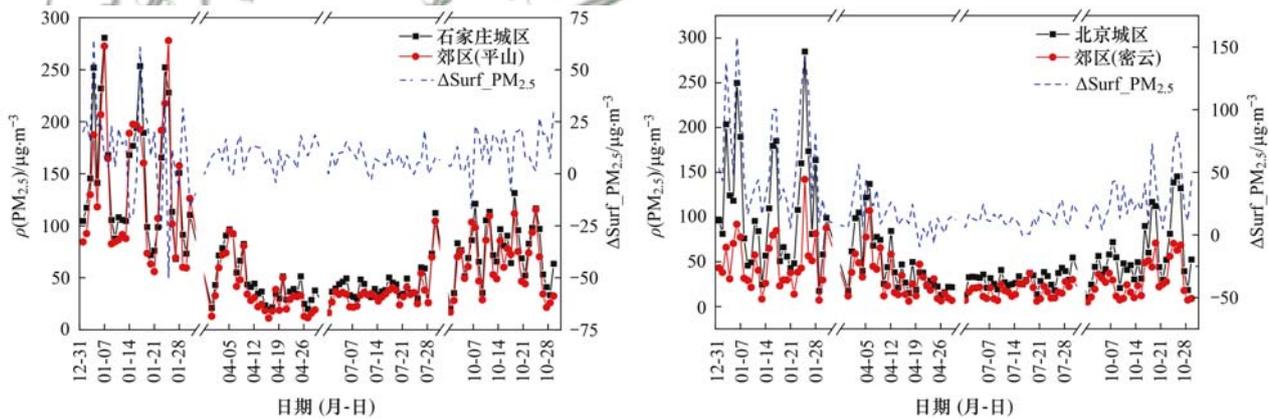


图 5 2017 年石家庄城区与郊区(平山)和北京城区与郊区(密云)的地面 PM<sub>2.5</sub> 和 ΔSurf\_PM<sub>2.5</sub> 逐日变化

Fig. 5 Daily changes in ground PM<sub>2.5</sub> and ΔSurf\_PM<sub>2.5</sub> in SJZ urban area and suburbs (Pingshan), BJ urban area and suburbs (Miyun) in 2017

从小时变化看(图 6),北京 ΔSurf\_PM<sub>2.5</sub> (μg·m<sup>-3</sup>)小时变化分别为:17~97(1月)、-4~40(4月)、2~26(7月)和7~58(10月),表明夏秋冬季表现为城区 PM<sub>2.5</sub> 浓度大于郊区。这是因为北京城区本地排放浓度大,尤其是冬季采暖和机动车的排放量较大;其次是小静风、强逆温和高湿等不利气象条件,容易造成城区污染物的累积。在石家庄城区与郊区冬季 12:00~16:00 时,出现 ΔSurf\_

PM<sub>2.5</sub> 小于零的情况,主要发生在中午时分,城区的 PBLH 迅速抬升,湍流活动加强,风速较大,降低了城区 PM<sub>2.5</sub> 浓度。

从空间上看,城郊 ΔSurf\_PM<sub>2.5</sub> 也呈现地域的差别。北京 ΔSurf\_PM<sub>2.5</sub> 小时变化范围(-4~98 μg·m<sup>-3</sup>)大于石家庄(-7~31 μg·m<sup>-3</sup>)。主要是北京与石家庄的城市排放源不同,导致北京城区排放远大于石家庄城区,平山排放大于密云,使得北京与

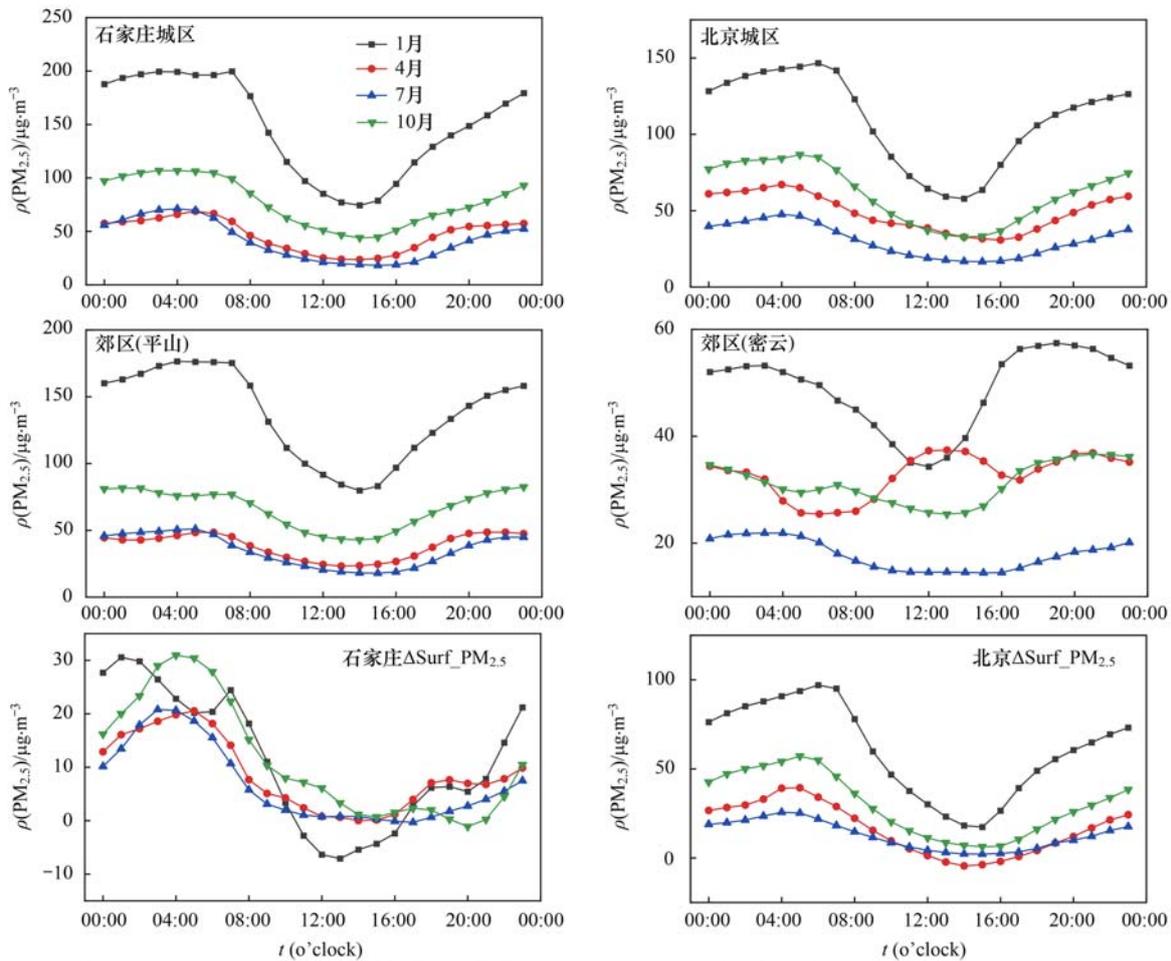


图6 2017年石家庄城区与郊区(平山)和北京城区与郊区(密云)的地面 $PM_{2.5}$ 和 $\Delta Surf_{PM_{2.5}}$ 小时变化

Fig. 6 Hourly variation in  $PM_{2.5}$  and  $\Delta Surf_{PM_{2.5}}$  in SJZ urban area and suburbs (Pingshan), BJ urban area and suburbs (Miyun) in 2017

郊区(密云)相差较大.因此,治理区域复合型污染时,既要协同考虑城区和郊区的污染特征,又要考虑两者的差异,因地制宜的调整控制方案.

### 2.2.2 垂直方向上 $PM_{2.5}$ 浓度差异分析

城区和郊区垂直方向上(1260 m以下) $PM_{2.5}$ 浓度作差得到不同高度下 $\Delta Vert_{PM_{2.5}}$ 变化曲线.

从年均角度看,在等高度下石家庄和北京 $\Delta Vert_{PM_{2.5}}$ 年均值表现为城区大于郊区,并随高度增加而减小.在0~48 m处石家庄城区与郊区的差异最大( $9.37 \mu g \cdot m^{-3}$ );当高度大于251 m,石家庄城区与郊区几乎没有差异( $0.1 \sim 2.3 \mu g \cdot m^{-3}$ );在0~48 m处北京城区与郊区的差异最大( $29.71 \mu g \cdot m^{-3}$ );当高度大于871 m时,北京城区与郊区几乎没有差异( $1.3 \sim 1.9 \mu g \cdot m^{-3}$ ).

如图7为2017年石家庄和北京 $\Delta Vert_{PM_{2.5}}$ 月均值垂直分布.从月均角度看,在0~251 m之间表现城区 $PM_{2.5}$ 浓度大于郊区,差值范围为 $0.66 \sim 11.27 \mu g \cdot m^{-3}$ ,是因为石家庄城区冬季人为取暖排放远大于郊区;同时,冬季温度低,天气多呈现静稳状态,不利于PBLH的发展,容易造成 $PM_{2.5}$ 累积.在

251~871 m处,1月石家庄 $\Delta Vert_{PM_{2.5}}$ 月均值为 $-1.4 \mu g \cdot m^{-3}$ ,表现为郊区 $PM_{2.5}$ 浓度大于城区,可能是郊区平均风速比城区低 $0.5 m \cdot s^{-1}$ .4月,石家庄 $\Delta Vert_{PM_{2.5}}$ 月均值在0~1260 m表现为正值,差值范围为 $0.39 \sim 8.41 \mu g \cdot m^{-3}$ ,说明城区 $PM_{2.5}$ 浓度大于郊区.但是在0~359 m之间出现高值较多,是由于0~359 m受排放源的影响较大;在359 m以上差值较小,由于郊区位于石家庄城区的西北侧,春季该地区干旱少雨,多东南风,使城郊高空的 $PM_{2.5}$ 浓度相差不大.7月,石家庄 $\Delta Vert_{PM_{2.5}}$ 月均值在0~251 m之间表现为正值,差值范围为 $0.13 \sim 6.92 \mu g \cdot m^{-3}$ ,相对于其他月份,7月的变化范围最小.251 m以上的差值范围为 $-0.26 \sim 1.77 \mu g \cdot m^{-3}$ ,由于夏季气温高,太阳短波辐射强,地表热力条件强,大气的热力湍流运动强,有利于空气的对流运动,使得城区和郊区 $PM_{2.5}$ 浓度相差不大.10月,石家庄 $\Delta Vert_{PM_{2.5}}$ 月均值在0~871 m之间表现为正值,差值范围为 $0.15 \sim 10.87 \mu g \cdot m^{-3}$ ;而871 m以上 $\Delta Vert_{PM_{2.5}}$ 月均值较小,城区和郊区 $PM_{2.5}$ 浓度分布特征相似.1、7和10

月北京  $\Delta\text{Vert\_PM}_{2.5}$  月均值在 0 ~ 1 260 m 内均表现为城区 PM<sub>2.5</sub> 浓度大于郊区. 1 月北京  $\Delta\text{Vert\_PM}_{2.5}$  月均值在 0 ~ 1 260 m 之间表现为正值, 差值范围 2.87 ~ 61.49  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 较其他月份差值范围最大, 表明冬季北京城区机动车和取暖排放增大了不同高度 PM<sub>2.5</sub> 浓度. 在 459 ~ 1 260 m 处, 4 月北京  $\Delta\text{Vert\_PM}_{2.5}$  月均值为  $-0.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 表现为郊区 PM<sub>2.5</sub> 浓度大于城区; 由于北京春季多沙尘天气, 但北京城区在郊区南部, 受到的影响略微低于密

云. 7 月和 10 月, 北京  $\Delta\text{Vert\_PM}_{2.5}$  月均值在 251 m 以上分布特征相似; 251 m 以下, 10 月的  $\Delta\text{Vert\_PM}_{2.5}$  月均值大于 7 月, 因为夏季热力湍流运动强, 有利于空气的对流运动, 有利于颗粒物的垂直、水平扩散. 从空间位置看, 不同季节下, 北京  $\Delta\text{Vert\_PM}_{2.5}$  月均值均大于石家庄; 除 1 月以外, 受冬季燃煤取暖方式、大气稀释能力和风向等气象因素的影响, 其他月份北京与石家庄  $\Delta\text{Vert\_PM}_{2.5}$  的垂直分布特征相似.

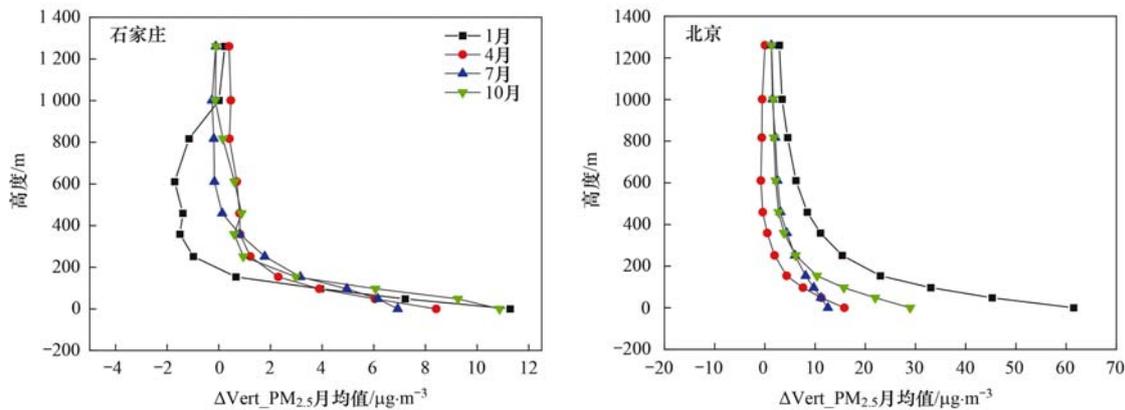


图 7 2017 年石家庄和北京  $\Delta\text{Vert\_PM}_{2.5}$  月均值的垂直分布

Fig. 7 Vertical distribution of monthly mean values of  $\Delta\text{Vert\_PM}_{2.5}$  in SJZ and BJ in 2017

### 2.3 城郊 PM<sub>2.5</sub> 传输通量特征的差异分析

从年均角度看, 石家庄城区与周边和郊区(平山)与周边的 PM<sub>2.5</sub> 年均传输通量分别表现为总净流出和总净流入, 分别为  $-40.99 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$  和  $6.55 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ . 北京城区与周边和郊区(密云)与周边的 PM<sub>2.5</sub> 年均传输通量分别表现为总净流出和总净流入, 为  $-44.81 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$  和  $0.04 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ . 可以看出城区年均总净通量强度远大于郊区, 城区为净流出, 郊区为净流入. 因此从全年角度分析可能是因为城区 PM<sub>2.5</sub> 浓度较高, 且受热源等多因素影响, 气温高, 气流膨胀上升, 形成低压; 郊区 PM<sub>2.5</sub> 浓度相对较低, 气温低且气压高, 使得城区污染气团上升并流向郊区, 郊区的清洁气团流入城区. 此外, 北京城区和郊区与周边的年均总净通量强度之和 ( $44.77 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ ) 大于石家庄 ( $34.44 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ ).

从月均角度看, 石家庄城区和郊区(平山)总净通量强度呈现明显的季节差异, 石家庄城区总净通量强度表现为: 1 月 ( $-84.92 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ ) > 10 月 ( $-56.26 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ ) > 7 月 ( $-50.27 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ ) > 4 月 ( $27.49 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ ), 郊区(平山)总净通量强度表现为: 4 月 ( $23.91 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ ) > 7 月 ( $-6.37 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ ) > 1 月 ( $4.58 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ ) > 10 月 ( $4.06 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ ). 北京城区和郊区(密云)PM<sub>2.5</sub> 总净通量强度同样有明显的季节差异. 北京城区总净通量强度表现为: 1 月 ( $-132.48 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ )

> 10 月 ( $-75.42 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ ) > 4 月 ( $46.60 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ ) > 7 月 ( $-17.97 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ ); 郊区(密云)的总净通量强度表现为: 4 月 ( $15.58 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ ) > 10 月 ( $-7.77 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ ) > 7 月 ( $-7.20 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ ) > 1 月 ( $-0.44 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ ). 可以看出, 石家庄城区月均总净通量强度远大于郊区, 北京城区月均总净通量强度大于郊区(密云), 是由于城区 PM<sub>2.5</sub> 浓度大于郊区造成的. 石家庄城区 1 月总净通量强度最大, 郊区(平山)4 月总净通量强度最大, 北京城区 1 月总净通量强度最大, 郊区(密云)4 月总净通量强度最大, 说明城区 1 月和郊区 4 月与周边传输交换对环境影响较为明显.

图 8 为 2017 年 1 260 m 内石家庄城区、郊区(平山)、北京城区和郊区(密云)与周边 PM<sub>2.5</sub> 净通量垂直分布. 不同季节和不同高度下石家庄城区与周边、郊区(平山)与周边、北京城区与周边和郊区(密云)与周边的净通量随离地高度的增加净通量强度呈现明显增大的趋势, 但是不同季节下城区和郊区最大净通量强度有明显差异, 高度分布差异较小, 主要受风速和 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响, 这由于气流进行水平运动时所受的摩擦力随高度的增加而减少, 在气压梯度力作用下不同高度的风向和风速都会发生变化, 而高空的湿度、风速和大气扩散条件等气象因素, 反之也会影响 PM<sub>2.5</sub> 浓度. 1 月, 石家庄城区最大净通量位于 611 ~ 817 m 之间, 为  $-26.76$

$t \cdot d^{-1}$ , 郊区(平山)最大净通量位于 817 ~ 1 001 m 之间, 为  $-5.97 t \cdot d^{-1}$ , 石家庄城区通量强度是郊区(平山)的 4.48 倍, 且两者净通量都表现为净流出; 虽然石家庄城区和郊区(平山)在不同高度的风向一致, 但是风速和  $PM_{2.5}$  浓度不同. 北京城区和郊区(密云)最大净通量位于 611 ~ 817 m 之间, 均表现为流出, 前者净通量强度为  $-67.43 t \cdot d^{-1}$ , 后者为  $-18.48 t \cdot d^{-1}$ , 相差 3.64 倍. 4 月, 石家庄城区与郊区(平山)最大净通量位于 459 ~ 611 m 之间, 均表现为净流入, 前者净通量强度为  $33.92 t \cdot d^{-1}$ , 后者为  $10.68 t \cdot d^{-1}$ , 两者相差 3.17 倍; 在 96 ~ 48 m 之间, 石家庄城区与郊区(平山)的净通量强度相差最大, 为 16.63 倍. 北京城区与郊区(密云)最大净通量位于 1001 ~ 1 260 m 之间, 均表现为净流出, 前者净通量强度为  $-41.62 t \cdot d^{-1}$ , 后者为  $-31.08 t \cdot d^{-1}$ , 两者相差 1.33 倍; 在 459 ~ 611 m 之间, 北京城区与郊区(密云)的净通量强度相差最大, 为 2.23 倍. 7 月, 石家庄城区与郊区(平山)最大净通量位于 1 001 ~ 1 260 m 之间, 均表现为净流出, 前者净通量

强度为  $-22.12 t \cdot d^{-1}$ , 后者为  $-6.62 t \cdot d^{-1}$ , 两者相差 3.34 倍; 在 611 ~ 817 m 之间, 石家庄城区与郊区(平山)的净通量强度相差最大, 为 4.75 倍. 北京城区与郊区(密云)最大净通量位于 1 001 ~ 1 260 m 之间, 均表现为净流出, 前者净通量强度为  $-43.59 t \cdot d^{-1}$ , 后者为  $-19.46 t \cdot d^{-1}$ , 两者相差 2.23 倍; 在 0 ~ 48 m 之间, 北京城区与郊区(密云)的净通量强度相差最大, 为 4.36 倍. 10 月, 石家庄城区最大净通量位于 611 ~ 817 m 之间, 为  $-17.14 t \cdot d^{-1}$ , 郊区(平山)最大净通量位于 96 ~ 153 m 之间, 为  $-3.23 t \cdot d^{-1}$ , 石家庄城区通量强度是郊区(平山)的 5.31 倍, 且前者为净流出, 后者为净流入; 在 251 ~ 358 m 之间, 石家庄城区与郊区(平山)的净通量强度相差最大, 为 8.49 倍. 北京城区与郊区(密云)最大净通量位于 611 ~ 817 m 之间, 均表现为净流出, 前者净通量强度为  $-41.37 t \cdot d^{-1}$ , 后者为  $-17.50 t \cdot d^{-1}$ , 两者相差 2.36 倍; 在 459 ~ 611 m 之间, 北京城区与郊区(密云)的净通量强度相差最大, 为 4.32 倍.

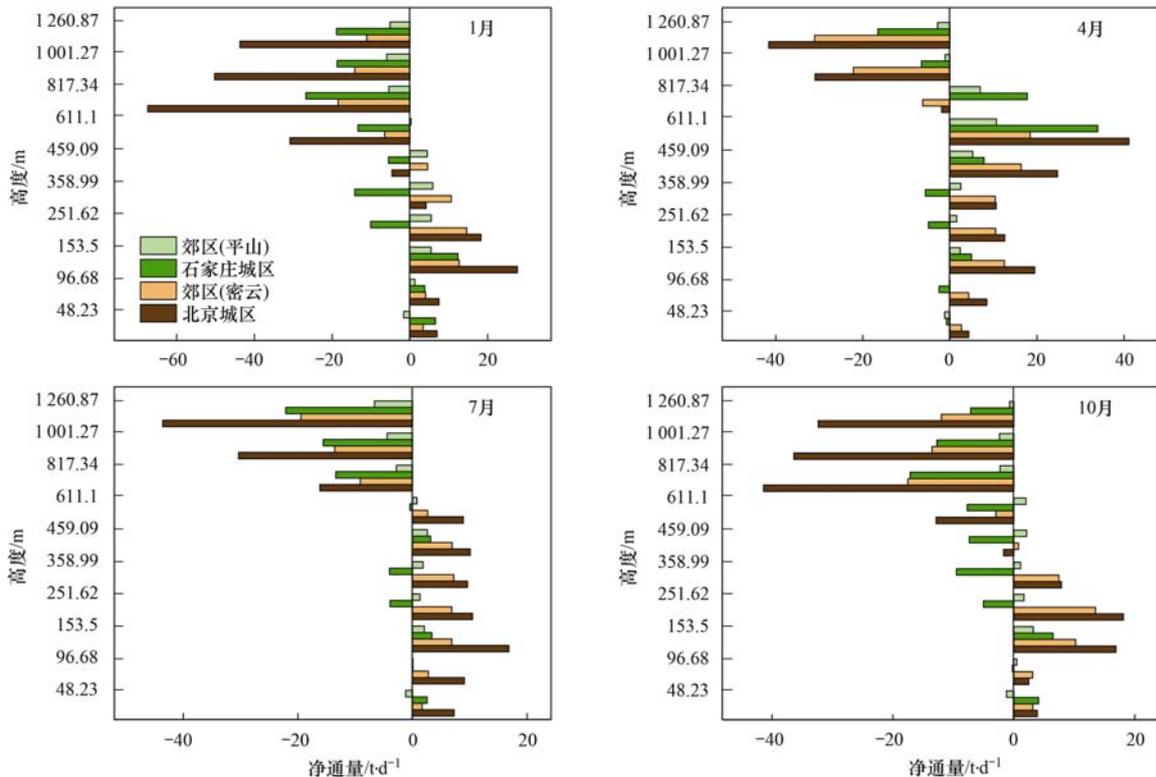


图 8 2017 年 1 260 m 内石家庄城区、郊区(平山)、北京城区和郊区(密云)与周边  $PM_{2.5}$  净通量的垂直分布

Fig. 8 Vertical distribution of  $PM_{2.5}$  net flux in SJZ urban area, suburban area (Pingshan), BJ urban area, suburban area (Miyun) and surrounding areas within 1 260 m in 2017

### 3 结论

(1) 在人为热源、短波辐射和热力湍流等因素影响下, 石家庄和北京城区年均 PBLH 分别比郊区高 8% 和 29%; 城区 PBLH 月均值较郊区高 2% (石

家庄 4 月) ~ 47% (北京 7 月). 石家庄  $\Delta PBLH$  小时变化范围 ( $-78 \sim 293$  m) 小于北京 ( $-30 \sim 615$  m).

(2) 城区年均  $PM_{2.5}$  浓度大于郊区, 北京  $\Delta Surf\_PM_{2.5}$  年均值 ( $15 \mu g \cdot m^{-3}$ ) 大于石家庄 ( $2 \mu g \cdot m^{-3}$ ).  $\Delta Surf\_PM_{2.5}$  主要表现为 1、10 月大于 4、7 月, 并且

在 1 月  $\Delta\text{Surf\_PM}_{2.5}$  高值出现次数较多; 不同季节下  $\Delta\text{Surf\_PM}_{2.5}$  小时变化均呈现双峰特征, 且夜晚  $\Delta\text{Surf\_PM}_{2.5}$  大于白天. 受人为排放、逆温和大气湍流等共同作用, 北京的  $\Delta\text{Surf\_PM}_{2.5}$  小时变化范围 ( $-4 \sim 98 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 较大于石家庄 ( $-7 \sim 31 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). 等高度下城区高空 PM<sub>2.5</sub> 浓度年均值大于郊区, 且  $\Delta\text{Vert\_PM}_{2.5}$  随高度增加而减小; 但是从月均角度分析, 受不同高度风向反转和风速增大的影响, 1 月石家庄 251 ~ 871 m 和 4 月北京 459 ~ 1 260 m 之间 PM<sub>2.5</sub> 浓度表现为郊区大于城区.

(3) 北京城区和郊区与周边的年均总净通量强度之和 ( $44.77 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ ) 大于石家庄 ( $34.44 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ ). 城区年均总净通量强度远大于郊区, 城区表现为流出, 郊区表现为流入, 这可能是城区高压和郊区低压共同作用下, 形成城郊热力环流. 受风速和 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响, 在 0 ~ 1 260 m 之间, 城区和郊区与周边的净通量随离地高度的增加通量强度呈现明显增大趋势, 其中 1 月城区和 4 月郊区与周边的传输交换对环境的影响最为明显. 不同季节下城区和郊区最大净通量的强度差异明显, 两者相差 2.23 ~ 4.48 倍; 但最大净通量强度的高度特征差异较小, 主要位于 611 ~ 1 260 m.

#### 参考文献:

- [1] Song J, Lim Y C, Ko I, *et al.* Association between air pollutants and initial hospital admission for ischemic stroke in Korea from 2002 to 2013 [J]. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, 2021, **30**(11), doi: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2021.106080.
- [2] Singer B C, Zhao H R, Preble C V, *et al.* Measured influence of overhead HVAC on exposure to airborne contaminants from simulated speaking in a meeting and a classroom [J]. *Indoor Air*, 2022, **32**(1), doi: 10.1111/ina.12917.
- [3] 王昕然, 苗世光, 窦军霞, 等. 大气污染对北京冬季城市和郊区辐射收支影响的观测分析 [J]. *地球物理学报*, 2016, **59**(11): 3996-4006.
- Wang X R, Miao S G, Dou J X, *et al.* Observation and analysis of the air pollution impacts on radiation balance of urban and suburb areas in Beijing [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, **59**(11): 3996-4006.
- [4] Liu Y S, Tang G Q, Huang X J, *et al.* Unexpected deep mixing layer in the Sichuan basin, China [J]. *Atmospheric Research*, 2021, **249**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105300.
- [5] 杨龙, 贺克斌, 张强, 等. 北京秋冬季近地层 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度垂直分布特征 [J]. *环境科学研究*, 2005, **18**(2): 23-28.
- Yang L, He K B, Zhang Q, *et al.* Vertical distributive characters of PM<sub>2.5</sub> at the ground layer in autumn and winter in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, **18**(2): 23-28.
- [6] Lei L, Sun Y L, Ouyang B, *et al.* Vertical distributions of primary and secondary aerosols in Urban boundary layer: Insights into Sources, Chemistry, and Interaction with Meteorology [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **55**(8): 4542-4552.
- [7] Liu Y S, Tang G Q, Zhou L B, *et al.* Mixing layer transport flux of particulate matter in Beijing, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(14): 9531-9540.
- [8] Liu Y S, Tang G Q, Wang M, *et al.* Impact of residual layer transport on air pollution in Beijing, China [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **271**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.116325.
- [9] Wang H, Xu J Y, Zhang M, *et al.* A study of the meteorological causes of a prolonged and severe haze episode in January 2013 over central-eastern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **98**: 146-157.
- [10] Chen H P, Wang H J. Haze days in North China and the associated atmospheric circulations based on daily visibility data from 1960 to 2012 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2015, **120**(12): 5895-5909.
- [11] 史旭荣, 逯世泽, 易爱华, 等. 全国 2018 ~ 2019 年秋冬季节气象条件变化对 PM<sub>2.5</sub> 影响研究 [J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(7): 2785-2793.
- Shi X R, Lu S Z, Yi A H, *et al.* Impact of meteorological conditions on PM<sub>2.5</sub> in autumn and winter of 2018 ~ 2019 in key areas [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(7): 2785-2793.
- [12] 郭滢超, 权建农, 潘昱冰, 等. 2008 ~ 2017 年北京市 PM<sub>2.5</sub> 周期性变化特征与影响机制 [J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(3): 1013-1021.
- Guo Y C, Quan J N, Pan Y B, *et al.* Multi-time scale variations of the PM<sub>2.5</sub> in Beijing and its key mechanisms during 2008 to 2017 [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(3): 1013-1021.
- [13] 安欣欣, 曹阳, 王琴, 等. 北京城区 PM<sub>2.5</sub> 各组分污染特征及来源分析 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2251-2261.
- An X X, Cao Y, Wang Q, *et al.* Chemical characteristics and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in urban of Beijing [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2251-2261.
- [14] 王彤, 华阳, 许庆成, 等. 京津冀郊区站点秋冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 来源解析 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1035-1042.
- Wang T, Hua Y, Xu Q C, *et al.* Source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in suburban area of Beijing-Tianjin-Hebei region in autumn and winter [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1035-1042.
- [15] 姜蕴聪, 杨元建, 王泓, 等. 2015 ~ 2018 年中国代表性城市 PM<sub>2.5</sub> 浓度的城乡差异 [J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(11): 4552-4560.
- Jiang Y C, Yang Y J, Wang H, *et al.* Urban-rural differences in PM<sub>2.5</sub> concentrations in the representative cities of China during 2015 ~ 2018 [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(11): 4552-4560.
- [16] 唐宜西, 张小玲, 徐敬, 等. 北京城区和郊区本底站大气污染物浓度的多时间尺度变化特征 [J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(8): 2783-2793.
- Tang Y X, Zhang X L, Xu J, *et al.* Multi-temporal scale variations of atmospheric pollutants concentrations in rural and urban areas of Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(8): 2783-2793.
- [17] Zheng Z F, Ren G Y, Wang H, *et al.* Relationship between fine-particle pollution and the urban heat island in Beijing, China: observational Evidence [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2018, **169**(1): 93-113.
- [18] 姜蕴聪. 中国典型城市 PM<sub>2.5</sub> 浓度城乡差异特征 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020.
- Jiang Y C. Characteristics of urban-rural differences in PM<sub>2.5</sub> concentrations in the representative cities of China [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2020.

- [19] 韩婧, 李元征, 李锋. 2000—2015 年中国 PM<sub>2.5</sub> 浓度时空分布特征及其城乡差异[J]. 生态学报, 2019, **39**(8): 2954-2962.  
Han J, Li Y Z, Li F. Spatio-temporal distribution characteristic of PM<sub>2.5</sub> concentration and the difference of PM<sub>2.5</sub> concentration between urban areas and rural areas in China from 2000 to 2015 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(8): 2954-2962.
- [20] 周甜, 闫才青, 李小滢, 等. 华北平原城乡夏季 PM<sub>2.5</sub> 组成特征及来源研究[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(9): 3227-3236.  
Zhou T, Yan C Q, Li X Y, *et al.* Chemical characteristics and sources of PM<sub>2.5</sub> in urban and rural sites in the North China Plain during summer [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(9): 3227-3236.
- [21] 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 等. 京津冀区域 PM<sub>2.5</sub> 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 PM<sub>2.5</sub> in Jingjinji region, 2015 [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 4897-4904.
- [22] Zhang H Y, Cheng S Y, Yao S, *et al.* Insights into the temporal and spatial characteristics of PM<sub>2.5</sub> transport flux across the district, city and region in the North China Plain [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **218**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117010.
- [23] Zhang H Y, Cheng S Y, Yao S, *et al.* Multiple perspectives for modeling regional PM<sub>2.5</sub> transport across cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region during haze episodes [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **212**: 22-35.
- [24] 张智答, 王晓琦, 张晗宇, 等. 京津冀地区典型城市秋冬季 PM<sub>2.5</sub> 输送特征研究[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(3): 993-1004.  
Zhang Z D, Wang X Q, Zhang H Y, *et al.* PM<sub>2.5</sub> transport characteristics of typical cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region in autumn and winter [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(3): 993-1004.
- [25] 李珊珊, 程念亮, 潘涛, 等. 2014 年 10 月京津冀一次空气重污染过程分析[J]. 环境科学与技术, 2016, **39**(3): 162-169.  
Li S S, Cheng N L, Pan T, *et al.* Analysis of a heavy air pollution event in Beijing-Tianjin-Hebei region in October 2014 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **39**(3): 162-169.
- [26] 董文成. 大气污染物在城市下垫面扩散的分析与模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.  
Dong W C. Simulation and analysis of atmospheric pollutants diffusion over urban surface [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014.
- [27] 朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 等. 京津冀及周边区域 PM<sub>2.5</sub> 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 PM<sub>2.5</sub> predicted model results in Beijing-Tianjin-Hebei region and surrounding areas during November 22 to December 4, 2018 [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 574-586.
- [28] 雷雨, 张小玲, 康平, 等. 川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3021-3030.  
Lei Y, Zhang X L, Kang P, *et al.* Analysis of transport pathways and potential sources of atmospheric particulate matter in Zigong, in south of Sichuan province [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3021-3030.
- [29] 段时光, 姜楠, 杨留明, 等. 郑州市冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 传输路径和潜在源分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 86-93.  
Duan S G, Jiang N, Yang L M, *et al.* Transport pathways and potential sources of PM<sub>2.5</sub> during the winter in Zhengzhou [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 86-93.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] Yang W L, Wang G C, Bi C J. Analysis of long-range transport effects on PM<sub>2.5</sub> during a short severe haze in Beijing, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, **17**(6): 1616-1622.
- [33] 任浦慧, 解静芳, 姜洪进, 等. 太原市大气 PM<sub>2.5</sub> 季节传输路径和潜在源分析[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(8): 3144-3151.  
Ren P H, Xie J F, Jiang H J, *et al.* Transport pathways and potential sources of PM<sub>2.5</sub> in different seasons in Taiyuan city [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(8): 3144-3151.
- [34] 陈颖元, 王晓琦, 程水源, 等. 京津冀和长三角地区一次重霾过程气象成因及传输特征[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(6): 2481-2492.  
Chen H Y, Wang X Q, Cheng S Y, *et al.* Analysis of meteorological causes and transmission characteristics of a heavy haze process in Beijing Tianjin Hebei and Yangtze River Delta [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(6): 2481-2492.
- [35] Zhu X W, Tang G Q, Hu B, *et al.* Regional pollution and its formation mechanism over North China Plain: A case study with ceilometer observations and model simulations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2016, **121**(24): 14574-14588.
- [36] Tang G, Zhu X, Hu B, *et al.* Impact of emission controls on air quality in Beijing during APEC 2014: lidar ceilometer observations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(21): 12667-12680.
- [37] Li M, Liu H, Geng G N, *et al.* Anthropogenic emission inventories in China: a review [J]. *National Science Review*, 2017, **4**(6): 834-866.
- [38] Zheng B, Tong D, Li M, *et al.* Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(19): 14095-14111.
- [39] Ge S J, Wang S J, Xu Q, *et al.* CAMx simulations of the control of anthropogenic emissions on the reduction of ozone formation in Southeast Texas of USA [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2021, **12**(7), doi: 10.1016/j.apr.2021.101114.
- [40] Ma S Q, Zhang X L, Gao C, *et al.* Multimodel simulations of a springtime dust storm over northeastern China: implications of an evaluation of four commonly used air quality models (CMAQ v5.2.1, CAMx v6.50, CHIMERE v2017r4, and WRF-Chem v3.9.1) [J]. *Geoscientific Model Development*, 2019, **12**(11): 4603-4625.
- [41] 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.
- [42] 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, 2016, **16**(3): 1673-1691.
- [43] Romero H, Ihl M, Rivera A, *et al.* Rapid urban growth, land-use changes and air pollution in Santiago, Chile [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(24-25): 4039-4047.
- [44] 马露, 邹艳琴, 李俊, 等. 气溶胶散射系数与空气颗粒物 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 浓度间关联性研究[J]. 环境与健康杂志, 2011, **28**(11): 964-967.
- Ma L, Zou Y Q, Li J, *et al.* Relationship between concentration changes of particulate matter and aerosol scattering coefficient [J]. Journal of Environment and Health, 2011, **28**(11): 964-967.
- [45] 程水源, 王传达, 张晗宇. 跨界地区大气边界层以下 PM<sub>2.5</sub> 传输通量数值模拟量化的方法 [P]. 中国专利: CN 110569528A, 2019-12-13.
- Cheng S Y, Wang C D, Zhang H Y. Method for numerical simulation and quantification of PM<sub>2.5</sub> transmission flux below atmospheric boundary layer of transboundary region[P]. CN: CN 110569528A, 2019-12-13.
- [46] 石春娥, 姚叶青, 张平, 等. 合肥市 PM<sub>10</sub> 输送轨迹分类研究[J]. 高原气象, 2008, **27**(6): 1383-1391.
- Shi C E, Yao Y Q, Zhang P, *et al.* Transport trajectory classifying of PM<sub>10</sub> in Hefei[J]. Plateau Meteorology, 2008, **27**(6): 1383-1391.
- [47] 张亮, 张国平, 王署东, 等. 城市下垫面对冬季北京-天津 PM<sub>2.5</sub> 影响的数值模拟研究[A]. 见: 2017 中国环境科学学会科学与技术年会论文集(第一卷)[C]. 厦门: 中国环境科学学会, 2017.
- [48] 李晓莉, 毕宝贵, 李泽椿. 北京冬季城市边界层结构形成机制的初步数值研究[J]. 气象学报, 2005, **63**(6): 889-902.
- Li X L, Bi B G, Li Z C. Simulation study of formation mechanism of winter urban boundary layer structure over Beijing area[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, **63**(6): 889-902.
- [49] Wang M, Tang G Q, Liu Y S, *et al.* The difference in the boundary layer height between urban and suburban areas in Beijing and its implications for air pollution [J]. Atmospheric Environment, 2021, **260**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118552.



## CONTENTS

Challenges Regarding the Co-emission of Emerging Pollutants to Eco-environmental Monitoring and Management .....	WANG Pei, HUANG Xin-yi, CAO Zhi-wei, <i>et al.</i> (4801)
Environmental Process, Effects and Risks of Emerging Contaminants in the Estuary-Coastal Environment .....	WANG Xin-hong, YU Xiao-xuan, WANG Si-quan, <i>et al.</i> (4810)
Research Progress of Analytical Methods with Molecular Spectroscopy for Determination of Trace Nutrients and Metals in Seawaters .....	YUAN Dong-xing, HUANG Yong-ming, WANG Ting (4822)
Research Progress on the Determination of Sulfide in Natural Waters: From Laboratory Analysis to In-Situ Monitoring .....	LI Peng, LIN Kun-de, YUAN Dong-xing (4835)
Advances in On-site Analytical Methods for Inorganic Arsenic in Environmental Water .....	BO Guang-yong, CHEN Zhao-ying, GONG Zhen-bin, <i>et al.</i> (4845)
Advances and Prospect of Sampling Techniques and Analytical Methods for Trace Elements in the Ocean; Progress of Trace Element Platform Construction in Xiamen University .....	..... HUANG Yong-ming, ZHOU Kuan-bo, CHEN Yao-jin, <i>et al.</i> (4858)
Biodegradation of Polyethylene Microplastic: A Review .....	..... LUO Yuan-rong, QIAN Yi-qian, QI Ya-nan (4869)
Mechanism and Environmental Effect on Nitrogen Addition to Microbial Process of Arsenic Immobilization in Flooding Paddy Soils .....	WANG Feng, ZHANG Jing, ZHOU Shao-yu, <i>et al.</i> (4876)
Toxicity Testing Organisms for Marine Ecotoxicological Research in China .....	SHI Tian-yi, HONG Hai-zheng, WANG Ming-hua, <i>et al.</i> (4888)
Estimating Methane Fugitive Emissions from Oil and Natural Gas Systems in China .....	CHEN Chun-ci, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen (4905)
Atmospheric NH <sub>3</sub> Emission Inventory and Its Tempo-spatial Changes in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region from 2015 to 2020 .....	LI Xiang, WU Shui-ping, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (4914)
Distribution of Microplastic and Antibiotic Resistance Gene Pollution in Jiulong River Estuary .....	..... CHENG Hong, CHEN Rong (4924)
Pollution Characteristics of Microplastics in Sediments of Xiamen Bay Beach .....	..... YAO Rui, LIU Hua-tai, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (4931)
Spatial and Temporal Distribution and Influencing Factors of Dissolved Trace Metals in Jiulong River Estuary and Xiamen Bay .....	..... QI Liu-qian, YUE Xin-li, ZHONG Hao-wen, <i>et al.</i> (4939)
Spatiotemporal Characteristics of Dissolved Oxygen and Control Mechanism of Hypoxia (Low Oxygen) in the Watershed-Coastal System in Fujian Province .....	..... YANG Ai-lin, YANG Fang, LI Shao-bin, <i>et al.</i> (4950)
Distribution, Migration, and Transformation Mechanism of Labile Phosphorus in Sediments of Xixi River Estuary, Xiamen .....	..... PAN Feng, CAI Yu, GUO Zhan-rong, <i>et al.</i> (4961)
Adsorption of Mn <sup>2+</sup> by Modified Biochar Fixed Bed in Simulated Lakes and Reservoir Waters .....	..... ZHAO Jie, YE Zhi-long, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (4971)
Rapid Detection of Trace Enrofloxacin and Ciprofloxacin in Drinking Water by SERS .....	..... XU Jing, ZHENG Hong, LU Jiang-long, <i>et al.</i> (4982)
Degradation of Triphenyl Phosphate in Water by UV-driven Advanced Oxidation Processes .....	..... XU Zi-wen, YIN Hong-ling, XIONG Yuan-ming, <i>et al.</i> (4992)
Characteristics and Potential Sources of Four Ozone Pollution Processes in Hainan Province in Autumn of 2019 .....	..... FU Chuan-bo, CHEN Hong, DAN Li, <i>et al.</i> (5000)
Characterization and Formation Mechanism of Water-soluble Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> in Summer in the Urban Agglomeration of the Ili River Valley .....	..... CHEN Qiao, GU Chao, XU Tao, <i>et al.</i> (5009)
Difference in PM <sub>2.5</sub> Pollution and Transport Characteristics Between Urban and Suburban Areas .....	..... QI Peng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (5018)
Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Northern Suburbs of Nanjing .....	..... FENG Yue-zheng, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (5030)
Ecological Risk Assessment of Microplastics Occurring in Surface Water of Terrestrial Water Systems across China .....	..... SUN Xiao-nan, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i> (5040)
Scale Effects of Landscape Pattern on Water Quality in Dongjiang River Source Watershed .....	..... CHEN You-liang, ZOU Wen-min, LIU Xing-gen, <i>et al.</i> (5053)
Mercury Speciation, Distribution, and Potential Sources in Surface Waters of the Yangtze and Yellow River Source Basins of Tibetan Plateau During Wet Season .....	..... LIU Nan-tao, WU Fei, YUAN Wei, <i>et al.</i> (5064)
Water Environmental Characteristics and Water Quality Assessment of Lakes in Tibetan Plateau .....	..... LIU Zhi-qi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (5073)
Karst Hydrogeochemical Characteristics and Controlling Factors of Carlin-type Gold Mining Area Based on Hydrochemistry and Sulfur Isotope .....	..... ZHA Xue-fang, WU Pan, LI Xue-xian, <i>et al.</i> (5084)
Characteristics of Eukaryotic Phytoplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Danjiangkou Reservoir .....	..... HE Yu-xiao, MAI Si-jie, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (5096)
Adsorption of Phosphate and Heavy Metals by Lanthanum Modified Zeolite and Its Performance in Sediment Inactivation .....	..... WANG Zhe, ZHU Jun, LI Wen, <i>et al.</i> (5106)
Metagenomic and Metatranscriptomic Analysis of Nitrogen Removal Functional Microbial Community of Petrochemical Wastewater Biological Treatment Systems .....	..... ZHANG Xu, ZHOU Jia-jia, ZHOU Min, <i>et al.</i> (5115)
Bacterial Community Structure and Antibiotic Resistance Gene Changes in IFAS + Magnetic Coagulation Process Wastewater Treatment Plant in Cold Regions .....	..... DU Wen-yan, YAO Jun-qin, MA Hui-ying, <i>et al.</i> (5123)
Nitric Oxide Emissions from Chinese Upland Cropping Systems and Mitigation Strategies: A Meta-analysis .....	..... TIAN Zheng-yun, WU Xiong-wei, WU Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Nitrification Inhibitors on Vegetable Production Yield, Nitrogen Fertilizer Use Efficiency and Nitrous Oxide Emission Reduction in China: Meta Analysis .....	..... LIU Fa-bo, MA Xiao, ZHANG Fen, <i>et al.</i> (5140)
Effect of Different Fertilization Treatments on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region, China .....	..... SHAO Xiao-hui, TANG Shui-rong, MENG Lei, <i>et al.</i> (5149)
Effects of Land-use Conversion on Soil Nitrification and NO & N <sub>2</sub> O Emissions in Tropical China Under Different Moisture Conditions .....	..... TANG Rui-jie, HU Yu-jie, ZHAO Cai-yue, <i>et al.</i> (5159)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of the Yangtze River Economic Belt Based on Bibliometric Analysis .....	..... LIU Xiao-yan, FAN Ya-nan, LIU Peng, <i>et al.</i> (5169)
Spatial and Temporal Distribution and Source Variation of Heavy Metals in Cultivated Land Soil of Xiangzhou District Based on EBK Interpolation Prediction and GDM Model .....	..... GAO Hao-ran, ZHOU Yong, LIU Jia-kang, <i>et al.</i> (5180)
Identification of Soil Heavy Metal Sources Around a Copper-silver Mining Area in Ningxia Based on GIS .....	..... ZHANG Kou-kou, HE Jing, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5192)
Effect of Aging on Stabilization of Cd <sup>2+</sup> Through Biochar Use in Alkaline Soil of Bayan Obo Mining Area .....	..... WANG Zhe, CHENG Jun-li, BIAN Yuan, <i>et al.</i> (5205)
Preparation of Magnetic Iron Oxide/Mulberry Stem Biochar and Its Effects on Dissolved Organic Carbon and Arsenic Speciation in Arsenic-Contaminated Soils .....	..... LU Lin, YAN Li-ling, LIANG Mei-na, <i>et al.</i> (5214)
Effects of Oyster Shell Powder and Lime on Availability and Forms of Phosphorus and Enzyme Activity in Acidic Paddy Soil .....	..... ZHAO Li-fang, HUANG Peng-wu, YANG Cai-di, <i>et al.</i> (5224)
Effects of Interaction of Zinc and Cadmium on Growth and Cadmium Accumulation of <i>Brassica campestris</i> L. ....	..... SHUAI Zu-ping, LIU Han-yi, CUI Hao, <i>et al.</i> (5234)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in Vegetable Field in Kaizhou, Chongqing .....	..... FANG Lin-fa, YE Ping-ping, FANG Biao, <i>et al.</i> (5244)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Carbon Storage in the Source Region of the Yellow River Based on InVEST and GeoSoS-FLUS Models and Its Response to Different Future Scenarios .....	..... HOU Jian-kun, CHEN Jian-jun, ZHANG Kai-qi, <i>et al.</i> (5253)
Carbon Sequestration Characteristics of Different Restored Vegetation Types in Loess Hilly Region .....	..... XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, HE Liang, <i>et al.</i> (5263)
Response of Soil Multifunctionality to Reduced Microbial Diversity .....	..... CHEN Gui-xian, WU Chuan-fa, GE Ti-da, <i>et al.</i> (5274)
Effect of Nitrogen Addition on Soil Fungal Diversity in a Degraded Alpine Meadow at Different Slopes .....	..... SU Xiao-xue, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (5286)
Comparative Energy Consumption Structure and Mode between China and Major Energy-Consuming Countries Under the Background of Carbon Emission Reduction .....	..... LI Hui, PANG Bo, ZHU Fa-hua, <i>et al.</i> (5294)
Spatialization and Spatio-temporal Dynamics of Energy Consumption Carbon Emissions in China .....	..... HAO Rui-jun, WEI Wei, LIU Chun-fang, <i>et al.</i> (5305)
Carbon Dioxide Mitigation Co-effect Analysis of Structural Adjustment Measures in the "2 + 26" Cities in the Jing-Jin-Ji Region and Its Surroundings .....	..... YANG Tian-qi, WANG Hong-chang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (5315)
Policy Analysis in Plastic Pollution Governance and Recommendations in China .....	..... LI Huan, ZHU Long, SHEN Qian, <i>et al.</i> (5326)