

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

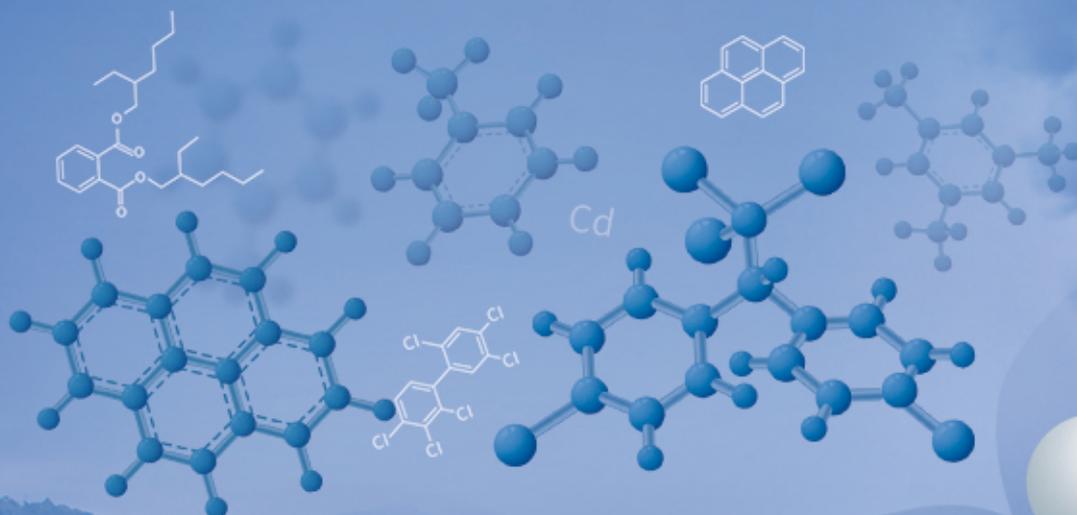
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价

龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华



PAHs

VOCs

HMs

PCBs

OCPs

PAEs

ANTs

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年10月

第42卷 第10期

Vol.42 No.10

目次

PM_{2.5}化学组分连续观测在污染事件源解析中的应用 蔡凡涛, 尚玥, 戴维, 谢鸣捷 (4575)

汾渭平原 PM_{2.5}空间分布的地形效应 黄小刚, 赵景波, 孙从建, 汤慧玲, 梁旭琦 (4582)

华中地区冬季灰霾天气下 PM_{2.5}中重金属污染特征及健康风险评价: 以湖北黄冈为例
..... 李星谕, 毛瑶, 陈展乐, 刘威杰, 程铖, 石明明, 许安, 苏业旺, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (4593)

华北区域大气中羰基化合物体积分数水平及化学反应活性 黄禹, 陈曦, 王迎红, 刘子锐, 唐贵谦, 李杏茹 (4602)

成都市春季 O₃ 污染特征及关键前体物识别 韩丽, 陈军辉, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波, 钱骏, 刘政 (4611)

基于边界观测的长三角某工业区 O₃ 来源特征 黄晴, 黄银芝, 张珊, 金丹, 高松, 修光利 (4621)

廊坊开发区 8~9月 O₃ 污染过程 VOCs 污染特征及来源分析 张敬巧, 王宏亮, 方小云, 刘锐泽, 丁文文, 凌德印, 王淑兰 (4632)

广东省家具行业基于涂料类型的 VOCs 排放特征及其环境影响
..... 曾春玲, 邵霞, 刘锐源, 姚懿娟, 李银松, 侯墨, 刘洋, 范丽雅, 叶代启 (4641)

厦门湾空气质量对新冠疫情管控的响应 徐超, 吴水平, 刘怡婧, 钟雪芬 (4650)

北京平原和延庆地区山谷风异同及对污染的影响 吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 韩婷婷, 邱雨露, 马小会, 李颖芳, 朱晓婉 (4660)

两湖盆地冬季区域大气颗粒物污染特征及独特的风场和下垫面影响
..... 朱燕, 赵天良, 白永清, 徐家平, 孙晓芸, 胡未央, 常嘉成, 杨婕, 朱从祯 (4669)

燃煤电厂颗粒物中硫酸根与硝酸根离子的转化规律 杨柳, 何晴, 盛重义 (4678)

长江流域主要干/支流化学特征及外源酸的影响 王琪, 于爽, 蒋萍萍, 孙平安 (4687)

土地利用对太湖入流河道营养盐的影响 连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 康丽娟, 朱梦圆, 许海 (4698)

基于 eDNA 技术的渭河浮游动物多样性及关键种生态位特征
..... 梁东, 夏军, 宋进喜, 常剑波, 吴琼, 程丹东, 张怡暄, 孔飞鹤, 任源鑫 (4708)

三亚市水体中 PPCPs 的污染水平、分布特征及生态风险评价 任丙南, 耿静 (4717)

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价 龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华 (4727)

天目湖沙河水库水生态安全状况长期变化及影响因素 杨文斌, 段文秀, 崔扬, 朱广伟, 吴天浩, 许海, 朱梦圆 (4739)

华中地区供水水库抗生素抗性基因的季节变化及影响因素 张凯, 辛蕊, 李观家, 王倩, 王亚南, 许智恒, 崔向超, 魏巍 (4753)

快速城镇化进程中珠江三角洲硝酸型地下水赋存特征及驱动因素 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 张玉玺 (4761)

盐城地区地表水化学空间特征及控制因素分析 王建, 张华兵, 许君利, 彭俊 (4772)

基于沉积物中总氮和总磷垂向分布与吸附解吸特征的白洋淀清淤深度
..... 周亚婷, 陈兴宏, 李立青, 张伟军, 张美一, 王东升, 王洪杰 (4781)

硼酸和磷酸对 PMS/Co²⁺ 均相催化氧化有机物的影响因素与机制 万琪琪, 陈铸昊, 曹瑞华, 王静怡, 李刚 (4789)

磁性生物炭负载 α-MnO₂ 活化过一硫酸盐降解 2,2',4,4'-四溴联苯醚 李鑫, 尹华, 罗昊昱, 欧阳晓芳, 刘航, 祝铭韩 (4798)

紫外活化过硫酸钠灭活水中噬菌体 MS2 的特性及机制 张崇森, 杨昊明, 王真 (4807)

铈改性水葫芦生物炭对磷酸盐的吸附特性 王光泽, 曾薇, 李帅帅 (4815)

低温地下水净化工艺中氨氮去除性能及机制 李冬, 刘孟浩, 张瑞苗, 曾辉平, 张杰 (4826)

我国城市污泥中重金属的赋存形态与生态风险评价 耿源濛, 张传兵, 张勇, 黄豆豆, 闫姝骁, 孙腾飞, 程柳, 王静, 毛宇翔 (4834)

不同气候类型下污水厂活性污泥中微生物群落比较 杨思航, 秦泽生, 梁漫春 (4844)

部分亚硝化-厌氧氨氧化协同反硝化处理生活污水脱氮除碳 秦彦荣, 袁忠玲, 张明, 张民安, 刘安迪, 付雪, 马娟, 陈永志 (4853)

同步短程硝化-厌氧氨氧化-短程反硝化颗粒污泥培育过程及其性能 周峰, 刘勇弟, 厉巍 (4864)

多种微塑料提取方法在中国典型土壤中的应用 赵小丽, 刘子涵, 从辰宇, 韩剑桥 (4872)

柴达木盆地土壤重金属污染与来源分析 陈亮, 张西营, 唐启亮, 耿盛, 王二龙, 李姜瑶 (4880)

快速城市化区域不同用地类型土壤重金属含量分布特征及生态风险 李梦婷, 沈城, 吴健, 黄沈发, 李大雁, 王敏 (4889)

广西都安县典型水田晒地球化学特征及影响因素 刘飞, 杨柯, 徐仁廷, 唐世琪 (4897)

炭化苹果枝通过减少土壤 DTPA-Cd 降低苹果砷木镉积累和镉伤害 邓波, 荀咪, 张玮玮, 杨洪强 (4908)

海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险
..... 杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 严慧, 胡树起, 唐世新, 龚晶晶 (4916)

环境中抗生素抗性基因丰度与抗生素和重金属含量的相关性分析: 基于 Web of Science 数据库检索 苗荪, 陈磊, 左剑恶 (4925)

银川市农田土壤中四环素类抗生素的污染特征及生态风险评估 张小红, 陶红, 王亚娟, 马志义, 周泽英 (4933)

施用不同来源粪肥对土壤中抗生素淋溶的影响 李斌绪, 朱昌雄, 宋婷婷, 马金莲, 张治国, 李红娜 (4942)

我国典型森林土壤微生物驱动的氮代谢途径特征解析 吕雪丽, 赵永鹏, 林清火, 彭显龙, 尹云锋, 蒋先军 (4951)

青藏高原高寒湿地春夏两季根际与非根际土壤反硝化速率及 nirS 型反硝化细菌群落特征分析
..... 李玉倩, 马俊伟, 高超, 霍守亮, 夏星辉 (4959)

松嫩平原芦苇湿地退化与修复过程中土壤细菌和甲烷代谢微生物的群落结构
..... 王秋颖, 王娜, 刘颖, 陈功, 何辉, 高婕, 庄绪亮, 庄国强 (4968)

不同轮作休耕下潮土细菌群落结构特征 南镇武, 刘柱, 代红翠, 张磊, 王娜, 徐杰, 刘开昌, 孟维伟, 王旭清 (4977)

稻田土壤光合细菌群落对镉污染的响应 罗路云, 金德才, 王殿东, 陈昂, 张德咏, 曾军, 匡炜, 张卓, 刘勇 (4988)

铁尾矿芦苇根际微生物和根内生菌群落分布及其限制性因子解析 曹曼曼, 王飞, 周北海, 陈辉伦, 袁蓉芳 (4998)

有机无机氮配施对不同程度盐渍土硝化和反硝化作用的影响 周慧, 史海滨, 张文聪, 王维刚, 苏永德, 闫妍 (5010)

水稻产量、稻田 CH₄ 和 N₂O 排放对长期大气 CO₂ 浓度升高的响应 于海洋, 宋开付, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (5021)

原料和热解温度对生物炭中可溶性有机质的影响 闫代红, 马亚培, 宋凯悦, 马红亮, 高人, 尹云锋 (5030)

中国 84 个主要城市大气热岛效应的时空变化特征及影响因素 李宇, 周德成, 闫章美 (5037)

室内建筑装饰装修材料气味物质及其释放研究进展 张万众, 张彭义 (5046)

《环境科学》征订启事 (4814) 《环境科学》征稿简则 (4871) 信息 (4907, 5009, 5029)

北京平原和延庆地区山谷风异同及对污染的影响

吴进^{1,2}, 李琛^{3*}, 马志强¹, 孙兆彬⁴, 韩婷婷¹, 邱雨露¹, 马小会¹, 李颖若¹, 朱晓婉¹

(1. 京津冀环境气象预报预警中心, 北京 100089; 2. 上甸子国家大气本底站, 北京 101507; 3. 北京市气象服务中心, 北京 100089; 4. 中国气象局北京城市气象研究院, 北京 100089)

摘要: 在一定地形与天气条件下, 山谷风环流是影响山地和平原气溶胶污染的主要气象因素之一。本研究基于 2015~2019 年京津冀地区生态环境监测数据和多源气象数据, 对比分析了北京平原和延庆地区山谷风异同, 结合典型污染事件揭示了山谷风不同阶段对 PM_{2.5} 浓度的影响机制。经分析发现, 观象台山谷风为偏西南风转偏东北风, 延庆站为偏东南风转偏东北风, 随着污染等级加重, 山谷风强度减弱 17.7%~32.4%; 观象台风速 2~6 m·s⁻¹ 时, 最大为 SE 风向 PM_{2.5} 浓度 83 μg·m⁻³, 东南风浓度高于西南; 延庆站风速 2~6 m·s⁻¹ 时, 偏东南方向浓度高于其他风向 20~40 μg·m⁻³, 谷风阶段 PM_{2.5} 浓度高于近 5 年均值 10~12 μg·m⁻³。以 2015 年 3 月 5~8 日重污染事件为例, 山谷风的影响作用主要体现在谷风时段东南风的高湿性及区域传输作用, 延庆站 3 月 6~7 日谷风阶段 PM_{2.5} 浓度上升 100~130 μg·m⁻³; 山风时段逆温发展至 1 000 m, 观象台和延庆站露点先后抬升 18℃ 左右, 延庆站露点峰值滞后观象台 2 h, 高湿环境下 PM_{2.5} 浓度小幅上升。同时, 3 月 6~7 日延庆站 400 m 高度和玉渡山站热力梯度逐渐减小, 山谷风分别减小 8% 和 6%, 局地环流减弱可能与边界层和高浓度气溶胶双向反馈机制有关。

关键词: 山谷风环流; PM_{2.5}; 北京平原; 延庆; 边界层; 双向反馈

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)10-4660-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202103071

Similarities and Differences of Valley Winds in the Beijing Plain and Yanqing Areas and Its Impact on Pollution

WU Jin^{1,2}, LI Chen^{3*}, MA Zhi-qiang¹, SUN Zhao-bin⁴, HAN Ting-ting¹, QIU Yu-lu¹, MA Xiao-hui¹, LI Ying-ruo¹, ZHU Xiao-wan¹

(1. Environmental Meteorology Forecast Center of Beijing-Tianjin-Hebei, Beijing 100089, China; 2. Shangdianzi National Atmosphere Background Station, Beijing 101507, China; 3. Beijing Meteorological Service Center, Beijing 100089, China; 4. Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China)

Abstract: Under certain terrain and weather conditions, mountain-valley circulation is one of the main meteorological factors affecting aerosol pollution in plain-mountain area. Based on environmental monitoring data and multi-source meteorological data for the Beijing-Tianjin-Hebei region between 2015 and 2019, the characteristics, similarities, and differences of mountain-valley winds in the Beijing Plain and Yanhuai Basin regions were compared. The results show that the mountain-valley winds recorded at the Beijing Observatory are from southwest to northeast compared to from the southeast to northeast at Yanqing station. With the aggravation of pollution levels, the mountain-valley wind intensity decreased by 17.7%-32.4%. When the wind speed at Beijing Observatory was 2-6 m·s⁻¹, the maximum PM_{2.5} concentration in southeast was 83 μg·m⁻³, which was higher than in the southwest. When the wind speed at the Yanqing station was 2-6 m·s⁻¹, the PM_{2.5} concentrations in SE-SSE area was 20-40 μg·m⁻³ higher than in other directions, and the concentrations in the valley winds were 10-12 μg·m⁻³ higher than the average value for the last five years. Taking the typical heavy pollution event on March 5-8, 2015, as an example, the influence of mountain-valley winds is mainly reflected in the high humidity and regional transmission of southeast winds during the valley wind stage. The PM_{2.5} concentrations at the Yanqing station increased by 100-130 μg·m⁻³ during the valley wind stage on March 6 and 7, 2015. The inversion temperature developed to 1 000 m during the mountain wind stage, the local dew point at the Beijing Observatory and the Yanqing station rose by approximately 18℃. The peak dew point at the Yanqing station occurring 2 hours after the Beijing Observatory, and the concentrations of PM_{2.5} rose slightly under high humidity conditions. Meanwhile, the thermal gradient between the 400-m-high Yanqing Station and Yudu Mountain gradually decreased, and the mountain-valley wind decreased by 8% and 6%, respectively. The weakening of local circulation may be related to the bidirectional feedback mechanism of the boundary layer and high concentrations of aerosols.

Key words: mountain-valley wind; PM_{2.5}; Beijing plain; Yanqing; boundary; bidirectional feedback

北京 2022 年冬奥会和冬残奥会将在北京赛区、延庆赛区和张家口赛区举行, 其中, 北京赛区位于城区的 6 个体育场馆承担了冰壶、冰球、滑冰和滑雪等 7 项赛事, 延庆赛区承担了高山滑雪、雪车和雪橇等 4 项赛事。虽然自 2013 年大气污染防治行动计划(“大气十条”)[¹]颁布后, 京津冀、长三角和珠三角等 3 个区域 2017 年 PM_{2.5} 年均浓度下降 28%~40% [²], 但近年来秋冬季京津冀地区仍会发生多次区域重污染事件 [^{3,4}], 而冬奥会期间重污染事件的发生, 将对中国国际形象及全球各地的赛事参与者的健康带来恶劣影响 [⁵⁻⁷]. 因此, 深入研究北京地

区, 尤其是延庆赛区的重污染事件机制仍十分必要。

北京平原地区两面环山, 北面为东西走向的燕山山脉, 西面临东北至西南走向的太行山脉, 二山系通过余脉军都山相连, 东南部为广阔的平原地带(图 1), 早期将其盛行的局地环流称为山谷风 [^{8,9}],

收稿日期: 2021-03-09; 修订日期: 2021-03-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0210003); 北京市科技新星项目(xk2017079); 北京市自然科学基金项目(8204075); 上甸子国家大气本底站开放研究课题项目(SDZ2020611)

作者简介: 吴进(1984~), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为区域大气污染, E-mail: wujin_0472@163.com

* 通信作者, E-mail: 13635435@qq.com

但北京平原并非典型山谷地形,其产生的局地风系严格意义上应为“斜坡风”^[10],后文暂统一称为“山谷风”。延庆地区与北京平原地形差异较大,三面环山,其城区位于延怀盆地之中,西临官厅水库,北临北京境内最高海拔山脉——海坨山,为典型的山谷地形,其山谷风的特征和形成机制与北京平原地区有显著差异。

在一定地形与天气条件下,山谷风环流是影响山地和平原地区大气污染的主要气象因素之一^[11,12]。主要形成原因是由于山体表面与其对应高度上大气比热异同导致白天(夜间)盛行谷地吹向山地(山地吹向谷地)的近乎反向风系^[13]。不少学者研究发现局地山谷风环流是影响复杂山地地形下大气污染的主要气象因素之一,很大程度影响了北京地区 PM_{2.5} 的输送和扩散^[14~17]。很多污染过程都是向山前输送并积累的过程^[18,19],山谷风形成沿山地平原交接地带的辐合气流区,易于污染物的聚积^[20]。除了决定 PM_{2.5} 的空间分布之外^[12,21],在山风和谷风转换期所形成的气象条件对 PM_{2.5} 浓度也具有重要影响^[22,23],任阵海等^[24]的研究发现均压场控制下易出现近地面小尺度局地环流群体,形成污染物风场汇聚带,随着重污染层形成后衰减或消失。此外,很多学者发现边界层内积累到一定程度的气溶胶污染还会显著改变边界层条件,导致逆温、低层增湿、边界层高度显著下降、大气稳定度增加,形成不利气象条件与累积的气溶胶之间的双向反馈机制^[25,26]。

目前,国内外关于北京山谷风的研究大都以平原地区山谷风为对象^[27,28],还未有将延庆与平原地区区分开的研究成果,而延庆地区与平原的山谷风差异决定了他们对污染的影响不尽相同,但是二者又密不可分。山谷风往往发生在弱天气系统下,而重污染天气发生在稳定环流之下,二者形成的天气背景有一定相似之处。延庆人口密度较城区显著偏小,且人为排放源少,其重污染天气的发生大都是由于区域输送所致,而延庆与北京平原隔着海拔 500~1 500 m 的军都山脉,边界层风场达到一定厚度即可出现污染物的区域传输^[29]。因此,研究北京平原和延庆地区山谷风环流差异及对污染的影响,对北京地区重污染事件的精细化预报预警具有重要参考价值。

1 材料与方法

1.1 数据来源

北京地区平原和延庆地区生态环境监测数据来源于北京大气环境监测中心发布的北京区域 35 个监测站的逐时 PM_{2.5} 浓度数据 (<http://zx.bjmemc.com.cn/>)。北京地区地面加密自动气象站数据来自北京市气象局,均经过严格的质量控制。

北京地区地面加密自动气象站数据来自北京市气象局,均经过严格的质量控制。

观象台风廓线雷达垂直探测范围为 150~8 960 m,共 50 层,延庆站风廓线雷达垂直探测范围为 150~12 030 m,共 59 层,时间分辨率均为 6 min,每个采样高度上所获得的数据包括采样高度、水平风向、水平风速、垂直风速、水平方向可信度和垂直方向可信度等。观象台和延庆站微波辐射计(TP WVP-3000)为美国 Radiometrics 公司生产的 12 通道辐射计,反演得到的大气廓线共 47 层,测量从地面到高空 10 km 的温度、水汽、相对湿度和液态水的垂直廓线。

1.2 北京平原和延庆地区山谷风计算方法

实测风场是天气尺度环流和局地环流叠加的表现,故提取局地环流需去除天气尺度背景风场。本研究剔除了 2015~2019 年的强降水日和大风日等强天气系统影响的天数,并根据延庆地形特点提出适用于延庆地区的山谷风日的计算方法^[30~32],具体如下。

将实测风 \vec{U}_c 分解为 u_c 和 v_c 分量,则 u_c 和 v_c 分量的日平均为系统风 \vec{U}_s 的 u_s 和 v_s 分量,局地风 \vec{U}_l 的 u_l 和 v_l 分量为逐时实测风 \vec{U}_c 的 u_c 和 v_c 分量减去系统风 \vec{U}_s 的 u_s 和 v_s 分量, u_l 和 v_l 分量合成即为 \vec{U}_l :

$$u_s = \frac{1}{24} \sum_{i=0}^{23} u_c$$

$$v_s = \frac{1}{24} \sum_{i=0}^{23} v_c$$

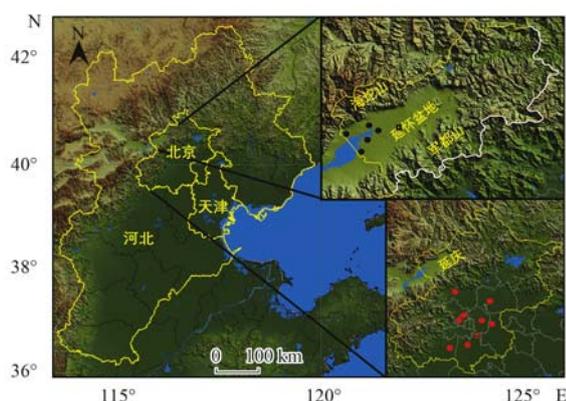
$$u_l = u_c - u_s$$

$$v_l = v_c - v_s$$

北京平原和延庆地区山谷风日均为偏南风 and 偏北风的转折^[8,9]。为与太阳辐射加热时长一致,白天和夜间的界限使用 2015~2019 年每月北京地区日出日落的平均时间,同时,为与 PM_{2.5} 浓度数据日平均时段保持一致,山谷风日定义为若某日前一日落至日出时段内,局地风为偏北风且维持 4 h 及以上,日出至日落时段内,局地风为偏南风且持续 4 h 及以上,则认定为某站的山谷风日,4 个连续时次 v 分量之和最大值作为山/谷风强度。同时,局地环流尺度应是发生在某一片区域而非一个单站,选取延庆延怀盆地中 6 个人工或自动气象站,平原地区 9 个人工气象站(图 1),若 80% (即延庆 5 个及以上、平原 7 个及以上)气象站为山谷风日则判断为北京平原或延庆地区的一个山谷风日。

2 结果与分析

2.1 2015~2019 年北京平原和延怀盆地山谷风特征
本研究使用北京观象台代表北京平原地区,延



黑色方形: 延庆气象站; 黑色圆形: 延怀盆地所选自动站(农场、张山营、东门营、野鸭湖湿地和葡萄博览园); 红色方形: 观象台; 红色圆形: 平原地区所选人工站(昌平、顺义、海淀、朝阳、石景山、丰台、大兴和房山)

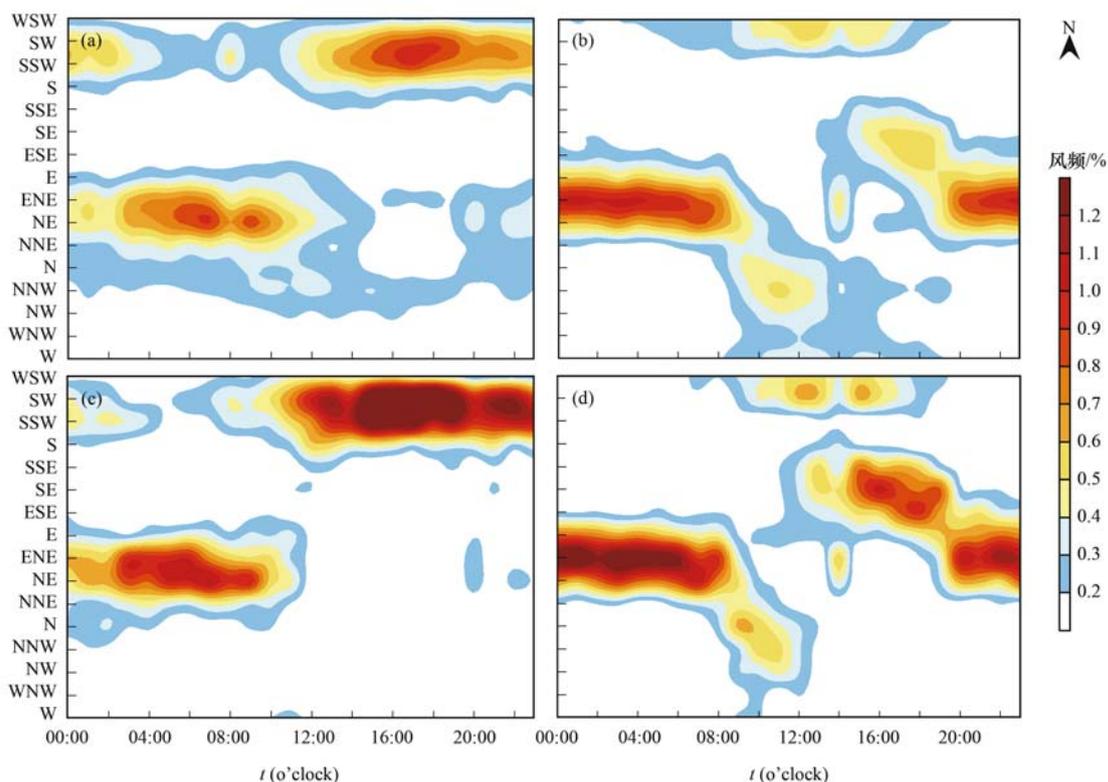
图 1 北京平原地区和延庆地区地形

Fig. 1 Topography of the Beijing Plain and Yanqing area

庆站代表延怀盆地对 2015 ~ 2019 年风频日变化进行分析研究. 观象台 2015 ~ 2019 年风向具有明显日变化特征[图 2(a)], 02:00 ~ 11:00 以 E、ENE、NE 和 NNE(E-NNE, 下同) 为主, 夜间最大风向频率出现在 07:00 NE 风频 0.91%, 11:00 前后由 E-NNE 转为 WSW-S 并持续到 23:00 前后, 白天最大风向频率为 17:00 SSW 风频 0.94%, 按照 1.2 节的计算方法, 2015 ~ 2019 年北京平原共出现了山谷风日 367

d, 其风频日变化如[图 2(b)], 风向转折时段和最大风频出现时间较所有天数无显著变化, 但主要风频 SSW 风频升至 1.8%, NE 升至 1.1%. 延庆站风频日变化较观象台复杂, 夜间风向频率与观象台一致, 集中在 19:00 ~ 次日 08:00 E-NNE, 但白天存在两个风频大值中心, 分别为 13:00 WSW-SW 和 18:00 ESE, 最大风频均为 0.59%, 延怀盆地共出现山谷风日 384 d, 白天 SSE-ESE 风频占比显著高于 WSW-SW. 因此, 北京平原地区山谷风为白天偏西南风转为夜间偏东北风, 而延庆站的山谷风多是白天偏东南风转为夜间偏东北风, 二者谷风时段差异较大.

将山风阶段 4 个连续时次偏北风风速之和最大值作为平均偏北风风速, 同理计算出谷风阶段平均偏南风风速(图 3), 观象台 2015 ~ 2019 年山谷风天数最多出现在 6 月(45 d), 12 月最少(19 d); 延庆站最多为 5 月(69 d), 最少为 12 月(9 d). 观象台和延庆站山谷风强度均在 4 月最大, 9 ~ 10 月最小. 因此, 无论山区或平原, 春季山谷风多发, 冬季少发, 这可能与春季太阳辐射较强、低云量少有关, 而夏季进入雨季后云量大幅增加, 阻挡太阳辐射到达地表. 将 PM_{2.5} 日均浓度分为轻度、中度和重度及以上污染(图 4), 在不同等级污染下延庆站出现山谷风的频率均高于观象台 5% 左右; 随着污染加重, 观象台和延庆站的山谷风日占比和山谷风强度均逐步减



观象台:(a)所有天数,(c)山谷风日; 延庆站:(b)所有天数,(d)山谷风日

图 2 北京观象台和延庆站风向频率日变化

Fig. 2 Diurnal variations in wind direction and frequency at the Beijing Observatory and Yanqing station

小, 观象台重度及以上污染山风和谷风强度为 $0.63 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 较轻度污染下减小 21.6% 和 27.7% , 延庆站重度及以上污染山风和谷风为 0.39

$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 较轻度污染减小 17.7% 和 32.4% , 高浓度的 $\text{PM}_{2.5}$ 对山谷风有一定削弱作用, 尤其对延庆站的谷风削弱最为显著.

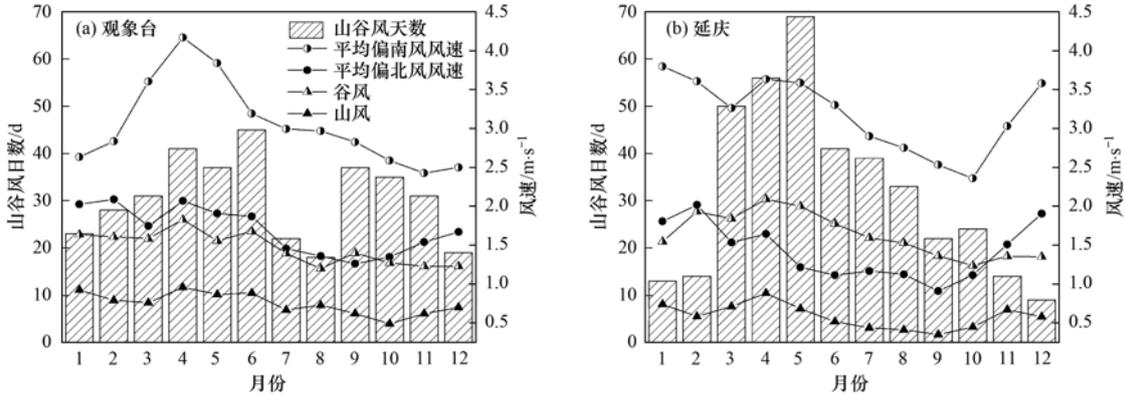


图3 观象台和延庆站的山谷风天数和强度

Fig. 3 Days and intensity of mountain-valley winds at the Beijing Observatory and Yanqing station

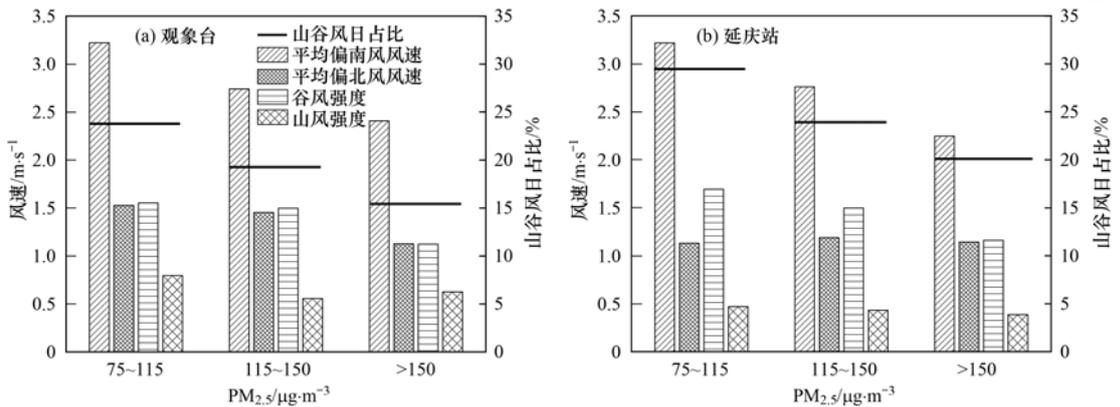


图4 观象台和延庆站不同 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度阈值下山谷风特征

Fig. 4 Characteristics of mountain-valley winds under different $\text{PM}_{2.5}$ concentration thresholds at the Beijing Observatory and Yanqing station

2.2 2015 ~ 2019 年北京平原和延怀盆地不同风向下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度特征

对于北京而言, 特定的风速和风向对污染物浓度有重要影响, 目前, 偏南风对北京地区污染的动力和热力机制已被普遍认识, 西南和东南通道形成的区域污染传输是北京秋冬季节重污染事件的发生发

展的核心因素之一^[33~36]. 从 2015 ~ 2019 年不同风向下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值可得 (图 5), 当风速 $0 \sim 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 各风向下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值差异较小. 观象台随着风速增大, 偏东南和西南风向 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值明显上升, $2 \sim 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最大为 E 风向 $69.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $4 \sim 6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时浓度最大为 SE 风向 83

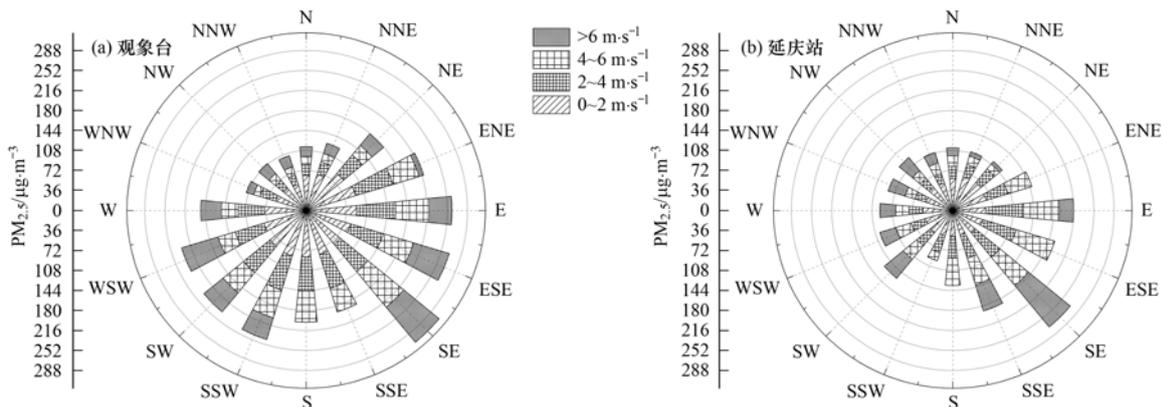


图5 2015 ~ 2019 年不同风向下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值

Fig. 5 Mean $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in different wind directions from 2015 to 2019

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 风速 $\geq 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, E-SE 和 SSW-WSW 风向的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值较大, 最大为 SE 风向 $82\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 延庆站不同风向风速下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度差异更显著, 风速 $2\sim 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, E-SSE 风向的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度显著高于其他风向 $20\sim 40\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 风速 $\geq 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, SE 风向浓度达 $58\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 因此, 无论是延庆站还是观象台站, 在 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的偏东南风影响下, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均为各风向中最高, 而观象台在偏西南风下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度次高.

上述结论可知谷风时段延庆站以偏东南风居多, 观象台站偏西南风居多, 平均偏南风风速为 $2.25\sim 4.25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 两站谷风时段有利于本地 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度上升. 从观象台的 $\text{PM}_{2.5}$ 日变化来看(图 6), 00:00~09:00 和 13:00~16:00 山谷风日的 $\text{PM}_{2.5}$ 小时浓度低于 2015~2019 年的小时均值(均值, 下同), 19:00~23:00 浓度高于均值 $2\sim 6\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 在谷风时段前半段 $\text{PM}_{2.5}$ 无显著上升, 后半段 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度小幅上升, 山风阶段 $\text{PM}_{2.5}$ 低于均值. 延庆站山谷风影响下 $\text{PM}_{2.5}$ 小时浓度均高于均值, 最大差异在于谷风时段 15:00~19:00, 高于近 5 年均值 $10\sim 12\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 该时间段对应 SSE-ESE 风向高频段. 因此, 山谷风控制下平原地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与均值基本相当, 延庆站 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度显著高于近 5 年均值, 尤其在 15:00~19:00 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度显著偏高.

2.3 重污染事件中山谷风的影响作用

为进一步研究重污染过程中北京平原和延庆地区山谷风对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响, 遴选了 2015 年 3 月 5~8 日典型重污染事件进行分析, 该污染过程持续

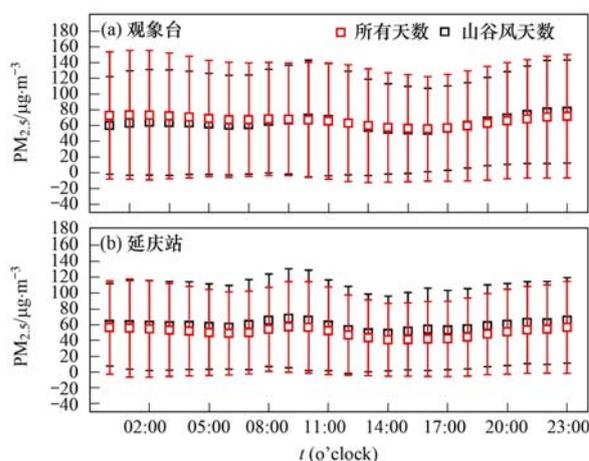
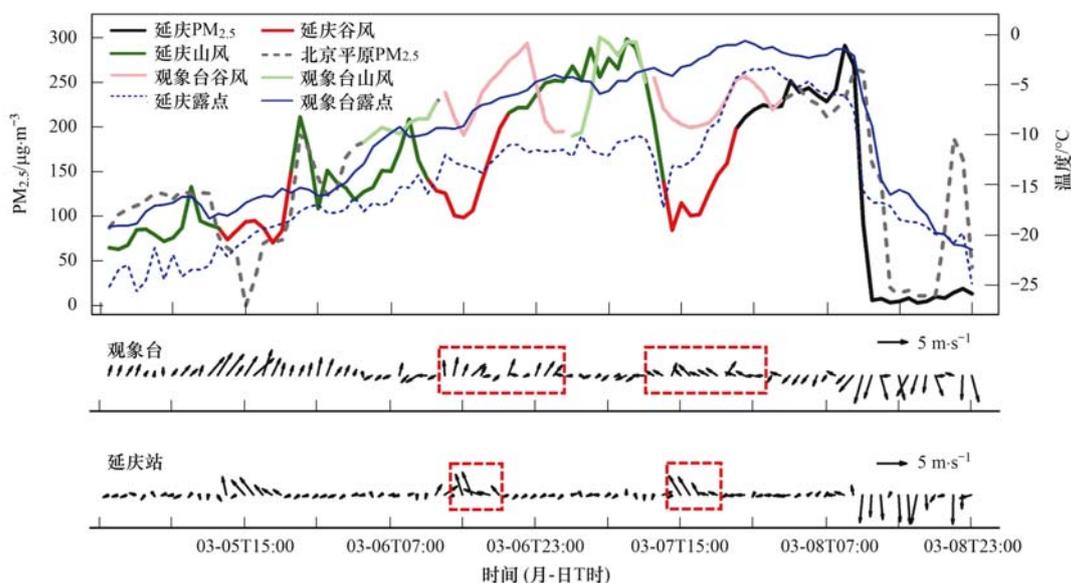


图 6 2015~2019 年所有天数和山谷风日下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日变化

Fig. 6 Diurnal variation of $\text{PM}_{2.5}$ concentrations on all days and mountain-valley days from 2015 to 2019

时间长、程度严重, 其中北京平原(3月6~7日)和延怀盆地(3月5~7日)均出现了山谷风环流, 3月8日由于强冷空气影响, 局地环流被强天气尺度系统破坏而消失.

本次过程中 3 月的 6 日和 7 日延庆 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度快速增长期均出现在 15:00~次日 00:00 前后(图 7), 00:00~09:00 为高浓度维持期, 而 09:00~14:00 出现浓度下降, 小时峰值浓度出现在 3 月 7 日 09:00 为 $298\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 而在两段快速增长期内延庆风向有类似的变化, 3 月的 6 日和 7 日的山风转谷风的时间均为 13:00 前后, 而 15:00 开始东南风增大到 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度持续上升, 19:00 前后向山风转折, 夜间维持 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下的东北风. 观象台的谷风阶段 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈波动变化. 从露点的变化



红色虚线框: 谷风偏南风时段

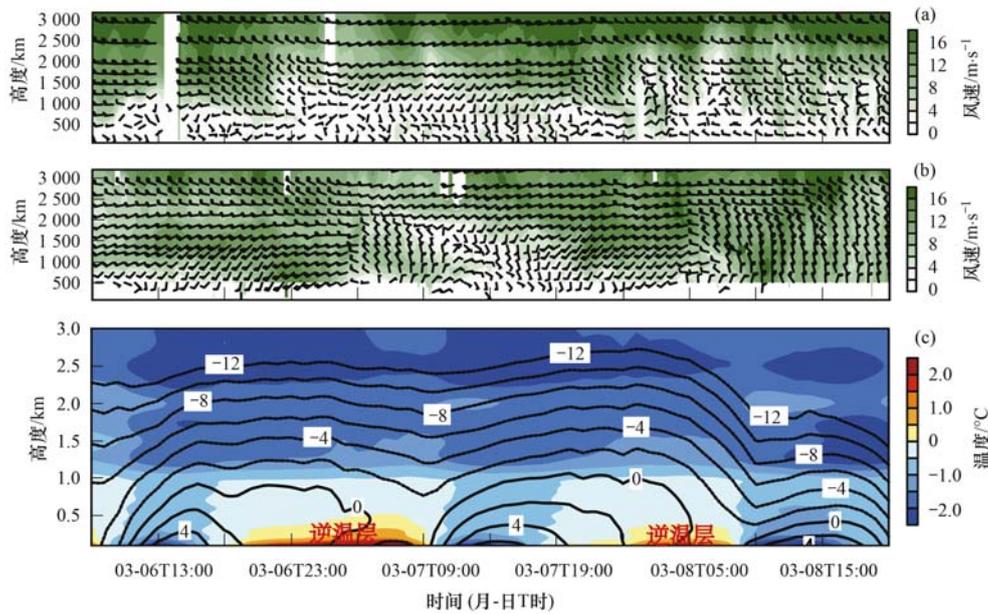
图 7 2015 年 3 月 5~8 日 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和地面风

Fig. 7 Hourly $\text{PM}_{2.5}$ concentrations and surface winds on March 5-8, 2015

来看,北京盛行的东南气流为湿性,观象台和延庆站的绝对湿度显著升高,3月5~8日观象台的露点从-19.2℃逐步上升至-1℃左右,延庆的露点上升分为2个阶段,第1阶段3月5日00:00至3月7日12:00,第2阶段3月7日15:00至3月8日01:00,露点最高出现在01:00,滞后观象台2h左右,说明东南风输送将高湿区自南向北推进,尤其在延庆站第2阶段,露点和PM_{2.5}浓度变化趋势基本一致,故

两段浓度快速增长期和山风转谷风之后建立的湿性东南风速带密切相关。

在3月6日延庆站谷风阶段15:00~19:00东南风建立层次浅薄(图8),厚度为500m左右,观象台西南风风速达4m·s⁻¹以上,厚度至1500m,超越军都山脉,越山传输使得延庆PM_{2.5}浓度上升至198.5μg·m⁻³,19:00之后转为2m·s⁻¹以下静小风,近地面逆温层建立,3月7日08:00逆温最强,



(a) 延庆站, (b) 观象台, (c) 延庆站, 等值线代表温度, 仅显示大于-12℃等值线, 阴影代表上下层温差

图8 2015年3月6~8日风和气温随高度的变化

Fig. 8 Vertical variations in wind and temperature on March 6-8, 2015

高度1000m, 925hPa与地面温差4℃, 期间PM_{2.5}浓度缓慢上升; 3月7日谷风阶段观象台维持厚度1000m的偏南风, 延庆站底层东南风, 受弱暖平流影响风向随高度顺转, 偏南风厚度增加至800m左

右, 北京地区PM_{2.5}浓度呈南高北低分布(图9), 较厚层次的偏南风将北京平原地区污染物越山输送至延庆地区, 13:00之后延庆PM_{2.5}由84.4μg·m⁻³上升至197.3μg·m⁻³, 进入山风阶段后地面温度露点差在3.5~4.8℃, 接近饱和, 高湿环境下PM_{2.5}继续上升. 因此, 延庆地区山谷风对污染物的影响作用主要体现在, 谷风阶段根据南风厚度会出现不同程度的区域传输, 进入夜间山风阶段后, 由于边界层快速压缩, 逆温发展, 近地面湿度增大, 利于本地污染物吸湿增长和二次转化。

3 讨论

上述典型重污染事件中实测东南风场是局地环流叠加天气尺度背景环流的综合表现, 从实测风判断3月6~7日东南通道发展导致污染物区域输送, 而剔除天气环流背景的局地山谷风环流变化如何? 其强弱变化与污染发展有何联系? 下面以延庆站为例进行研究。

延庆局地环流实质是由于山地和平原上空相同高度大气的热力差异所致, 这种热力差异归根结底

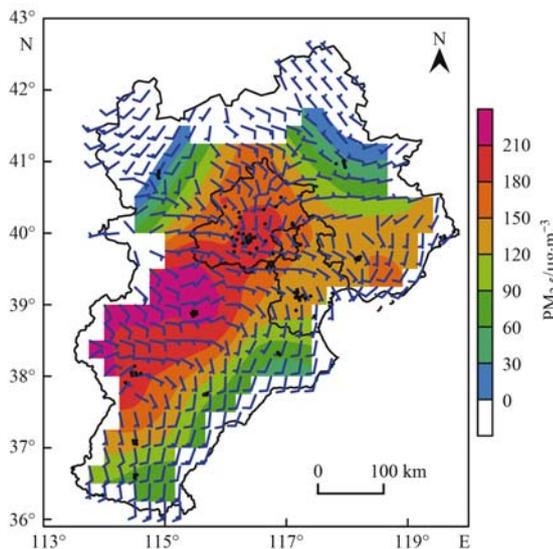


图9 京津冀地区2015年3月7日15:00 PM_{2.5}和地面流场分布

Fig. 9 PM_{2.5} and surface flow field distributions at 15:00 on March 7, 2015, in the Beijing-Tianjin-Hebei region

与太阳辐射直接相关,而重污染天气中高浓度气溶胶与边界层往往存在双向反馈机制^[25],即气溶胶浓度升高后使得进入边界层的太阳辐射和地表向外长波辐射减少,强逆温层类似于“保温盖”,减少了近地面与边界层外自由大气的能量交换.延庆本站海拔486 m,3月6~7日边界层最低为500 m左右(图略),故选取处于边界层内的延庆北部山区站点玉渡山(海拔876 m)与延庆站上空400 m高度的气温进行对比(图10).受低层暖气团影响,玉渡山和延庆站400 m气温在3月5~7日逐步升高,山地站点玉渡山白天升温 and 夜间降温幅度都显著大于延庆站400 m气温,这与山谷风的局地环流形成机制一致.但值得注意的是,延庆站400 m和玉渡山的气温差在3月5~7日逐渐减小,最高气温差的绝对值由4.6℃减小至3.6℃,最低气温差由10.6℃减小至9.3℃,3月6日夜间山风 $0.87\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,白天谷风 $2.22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,3月7日山风 $0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,谷风 $2.08\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (表1),分别减小8%和6%,说明山地和同海拔高度大气的热力梯度逐步减小,形成的局地山谷风环流也逐步减小.故边界层内高浓度气溶胶在减少太阳辐射进入的同时,可能通过减小山地和自由大气的热力梯度从而减弱局地环流,通过局地环流区域输送部分必将同时减弱,这一结论还需数值模拟进行进一步验证.

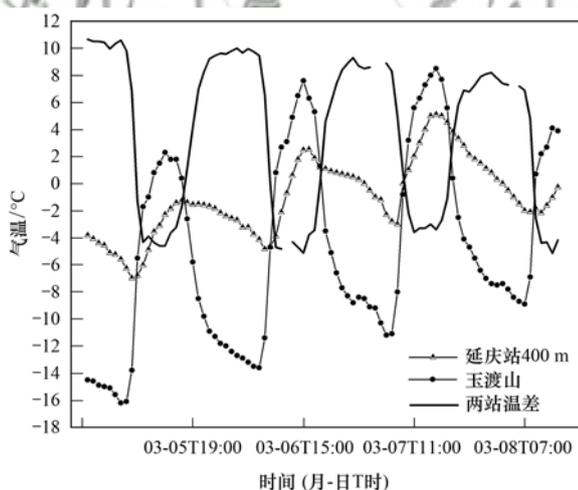


图10 2015年3月5~8日延庆站上空400 m和玉渡山气温及温差

Fig. 10 Temperature and temperature differences between 400 m above Yanqing station and Yudu Mountain on March 5-8, 2015

表1 2015年3月6~7日山谷风环流强度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Table 1 Intensity of mountain-valley winds on March 6-7, 2015/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

日期(月-日)	山风强度	谷风强度
03-06	0.87	2.22
03-07	0.80	2.08

4 结论

(1) 观象台和延庆站风向均有明显日变化特征,观象台02:00~11:00为E-NNE,最大风频NE,11:00~23:00为WSW-S,最大风频SSW;延庆站夜间19:00~次日08:00为E-NNE,白天有WSW-SW和ESE两个风频大值中心.2015~2019年北京平原地区共出现山谷风日367 d,风向为偏西南风转偏东北风,延怀盆地384 d,风向为偏东南风转偏东北风.

(2) $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在各风向风速阈值分布不均.风速 $0\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,各风向下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值差异较小;观象台风速 $2\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最大为E风向 $69.7\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,风速 $4\sim 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时 $\text{PM}_{2.5}$ 最大为SE风向 $83\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,风速 $\geq 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时 $\text{PM}_{2.5}$ 最大为SE风向 $82\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;延庆站风速 $2\sim 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,E-SSE风向的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度显著高于其他风向 $20\sim 40\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,风速 $\geq 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,SE风向 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度达 $58\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.延庆站谷风时段15:00~19:00 $\text{PM}_{2.5}$ 小时浓度高于近5年均值 $10\sim 12\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

(3) 以2015年3月5~8日典型重污染事件为例,3月的6日和7日谷风时段15:00~19:00东南风增大到 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上, $\text{PM}_{2.5}$ 上升了 $100\sim 130\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;山风时段维持 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下的东北风,逆温发展至1000 m,平原和延庆地区本地露点抬升 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,温度露点差 $3.5\sim 4.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,高湿环境下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度小幅上升.3月6~7日延庆站400 m高度和玉渡山站热力梯度逐渐减小,最高气温差的绝对值由 $4.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 减小至 $3.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低气温差由 $10.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 减小至 $9.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,山风和谷风强度分别减小8%和6%,局地环流减弱可能与边界层和高浓度气溶胶双向反馈机制有关.

参考文献:

- [1] 国务院. 大气污染防治行动计划的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/zwqk/2013-09/12/content_2486773.htm, 2013-09-12.
- [2] 张强, 耿冠楠. 中国清洁空气行动对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(4): 439-440.
Zhang Q, Geng G N. Impact of clean air action on $\text{PM}_{2.5}$ pollution in China[J]. Science China Earth Sciences, 2019, 62(12): 1845-1846.
- [3] Ren Y, Zhang H S, Zhang X Y, et al. Turbulence barrier effect during heavy haze pollution events[J]. Science of the Total Environment, 2021, 753, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142286.
- [4] Yin Z C, Wang H J, 2017. Role of atmospheric circulations in haze pollution in December 2016[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, 17(18): 11673-11681.
- [5] Gao M, Guttikunda S K, Carmichael G R, et al. Health impacts and economic losses assessment of the 2013 severe haze event in Beijing area[J]. Science of the Total Environment, 2015, 511:

- 553-561.
- [6] Gao M, Saide P E, Xin J Y, *et al.* Estimates of health impacts and radiative forcing in winter haze in eastern China through constraints of surface PM_{2.5} predictions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(4): 2178-2185.
- [7] 薛涛, 刘俊, 张强, 等. 2013~2017年中国PM_{2.5}污染的快速改善及其健康效益[J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, **50**(4): 439-452.
Xue T, Liu J, Zhang Q, *et al.* Rapid improvement of PM_{2.5} pollution and associated health benefits in China during 2013-2017[J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, **62**(12): 1847-1856.
- [8] 北京气象局气候资料室. 北京气候志[M]. 北京: 北京出版社, 1987.
- [9] 北京市地方志编纂委员会. 北京志·地质矿产·水利·气象卷: 气象志[M]. 北京: 北京出版社, 1999.
- [10] Serafin S, Zardi D. Daytime heat transfer processes related to slope flows and turbulent convection in an idealized mountain valley[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2010, **67**(11): 3739-3756.
- [11] Carbone C, Decesari S, Paglione M, *et al.* 3-year chemical composition of free tropospheric PM₁ at the Mt. Cimone GAW global station-South Europe-2165 m a. s. l [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **87**: 218-227.
- [12] Diémoz H, Barnaba F, Magri T, *et al.* Transport of Po Valley aerosol pollution to the northwestern Alps-Part 1: phenomenology [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(5): 3065-3095.
- [13] 寿绍文. 中尺度气象学[M]. (第二版). 北京: 气象出版社, 2009.
- [14] 邓家铨, 朱赛霞, 郑敏. 不同地形边界层风场特性及山谷风污染气象个例分析[J]. *热带地理*, 1989, **9**(4): 346-353.
Deng J S, Zhu S X, Zheng M. The Characteristics of wind field within boundary layer of different topography and case analysis on pollution meteorology. related to mountain-valley wind [J]. *Tropical Geography*, 1989, **9**(4): 346-353.
- [15] 邱崇践, 蒲朝霞. 山谷风环流控制下的大气污染物输送和扩散过程: 二维数值模拟研究[J]. *高原气象*, 1991, **10**(4): 362-370.
Qiu C J, Pu Z X. The transportation and dispersion of air pollutants controlled by mountain-valley circulation: two-dimensional numerical simulation [J]. *Plateau Meteorology*, 1991, **10**(4): 362-370.
- [16] 邓玉珍, 雷孝恩, 田瑞明. 一个考虑地形影响的三维中尺度 Monte-Carlo 多源模式[J]. *气象学报*, 1993, **51**(2): 139-147.
Deng Y Z, Lei X E, Tian R M. A three-dimensional mesoscale monte-carlo multiple-sources model involving orographic influence [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1993, **51**(2): 139-147.
- [17] 马志强, 王跃思, 张小玲, 等. 北京城区与下游地区臭氧对比研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(4): 924-929.
Ma Z Q, Wang Y S, Zhang X L, *et al.* Comparison of ozone between Beijing and downstream area [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(4): 924-929.
- [18] 康娜, 辛金元, 蔺永耀, 等. 北京山前典型细粒子污染过程的气象条件分析[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(9): 1013-1020.
Kang N, Xin J Y, Lin Y Y, *et al.* Meteorological condition analysis of a typical fine particle pollution event in the piedmont region of Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22**(9): 1013-1020.
- [19] 吴兑, 廖碧婷, 吴蒙, 等. 环首都圈霾和雾的长期变化特征与典型个例的近地层输送条件[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(1): 1-11.
Wu D, Liao B T, Wu M, *et al.* The long-term trend of haze and fog days and the surface layer transport conditions under haze weather in North China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(1): 1-11.
- [20] 刘树华, 刘振鑫, 李炬, 等. 京津冀地区大气局地环流耦合效应的数值模拟[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, **39**(1): 88-98.
Liu S H, Liu Z X, Li J, *et al.* Numerical simulation for the coupling effect of local atmospheric circulations over the area of Beijing, Tianjin and Hebei Province [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, **52**(3): 382-392.
- [21] Finardi S, Silibello C, D'Allura A, *et al.* Analysis of pollutants exchange between the Po Valley and the surrounding European region [J]. *Urban Climate*, 2014, **10**: 682-702.
- [22] 李宗恺, 潘云仙, 周朝辅, 等. 山谷风转换期的漫烟扩散模式[J]. *气象学报*, 1986, **44**(4): 433-439.
Li Z K, Pan Y X, Zhou C F, *et al.* A diffusion model for fumigation with mountain-valley wind shift [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1986, **44**(4): 433-439.
- [23] 董群, 赵普生, 王迎春, 等. 北京山谷风环流特征分析及其对PM_{2.5}浓度的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2218-2230.
Dong Q, Zhao P S, Wang Y C, *et al.* Impact of mountain-valley wind circulation on typical cases of air pollution in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2218-2230.
- [24] 任阵海, 苏福庆, 高庆先, 等. 边界层内大气排放物形成重污染背景解析[J]. *大气科学*, 2005, **29**(1): 57-63.
Ren Z H, Su F Q, Gao Q X, *et al.* Analysis of the serious atmospheric pollution event caused by emissions in boundary layer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2005, **29**(1): 57-63.
- [25] Zhang X Y, Xu X D, Ding Y H, *et al.* The impact of meteorological changes from 2013 to 2017 on PM_{2.5} mass reduction in key regions in China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, **62**(12): 1885-1902.
- [26] Zhong J T, Zhang X Y, Dong Y S, *et al.* Feedback effects of boundary-layer meteorological factors on cumulative explosive growth of PM_{2.5} during winter heavy pollution episodes in Beijing from 2013 to 2016 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(1): 247-258.
- [27] 李青春, 李炬, 郑祚芳, 等. 冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 513-524.
Li Q C, Li J, Zheng Z F, *et al.* Influence of mountain valley breeze and sea land breeze in winter on distribution of air pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 513-524.
- [28] 徐敬, 张小玲, 赵秀娟, 等. 夏季局地环流对北京下风向地区O₃输送的影响[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(11): 1140-1146.
Xu J, Zhang X L, Zhao X J, *et al.* Influence of summer local circulation on the transportation of ozone from urban to the downwind area in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2009, **29**(11): 1140-1146.
- [29] 吴进, 李琛, 孙兆彬, 等. 北京地区两次重污染过程中PM_{2.5}浓度爆发性增长及维持的气象条件[J]. *干旱气象*, 2017, **35**(5): 830-838.
Wu J, Li C, Sun Z B, *et al.* Meteorological condition of explosive increase and maintaining of PM_{2.5} concentration during

- two heavy pollution processes in Beijing [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2017, **35**(5): 830-838.
- [30] 曹渐华, 刘熙明, 李国平, 等. 鄱阳湖地区湖陆风特征及成因分析[J]. *高原气象*, 2015, **34**(2): 426-435.
Cao J H, Liu X M, Li G P, *et al.* Analysis of the phenomenon of lake-land breeze in Poyang Lake area [J]. *Plateau Meteorology*, 2015, **34**(2): 426-435.
- [31] 张人文, 范绍佳, 李颖敏. 2008 年秋季从化山谷风观测研究 [J]. *热带气象学报*, 2012, **28**(1): 134-139.
Zhang R W, Fan S J, Li Y M. Observational study of mountain-valley breeze over Conghua in 2008 fall [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2012, **28**(1): 134-139.
- [32] 郑祚芳, 任国玉, 高华. 北京地区局地环流观测分析[J]. *气象*, 2018, **44**(3): 425-433.
Zheng Z F, Ren G Y, Gao H. Analysis of the local circulation in Beijing area [J]. *Meteorological Monthly*, 2018, **44**(3): 425-433.
- [33] 尹晓梅, 乔林, 朱晓婉, 等. 北京地区偏南风 and 偏东风条件下污染特征差异[J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 4844-4854.
Yin X M, Qiao L, Zhu X W, *et al.* Differences in pollution characteristics under the southerly and easterly wind in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4844-4854.
- [34] Zhao X J, Zhang X J, Pu W W, *et al.* Scattering properties of the atmospheric aerosol in Beijing, China [J]. *Atmospheric Research*, 2011, **101**(3): 799-808.
- [35] 王跃, 王莉莉, 赵广娜, 等. 北京冬季 PM_{2.5} 重污染时段不同尺度环流形势及边界层结构分析 [J]. *气候与环境研究*, 2014, **19**(2): 173-184.
Wang Y, Wang L L, Zhao G N, *et al.* Analysis of different-scales circulation patterns and boundary layer structure of PM_{2.5} heavy pollutions in Beijing during winter [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2014, **19**(2): 173-184.
- [36] 徐冉, 张恒德, 杨孝文, 等. 北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3405-3414.
Xu R, Zhang H D, Yang X W, *et al.* Concentration characteristics of PM_{2.5} and the causes of heavy air pollution events in Beijing during autumn and winter [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3405-3414.



CONTENTS

Continuous PM _{2.5} Composition Measurements for Source Apportionment During Air Pollution Events	CAI Fan-tao, SHANG Yue, DAI Wei, <i>et al.</i> (4575)
Orographic Influences on the Spatial Distribution of PM _{2.5} on the Fen-Wei Plain	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, SUN Cong-jian, <i>et al.</i> (4582)
Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Under Winter Haze Conditions in Central China: A Case Study of Huanggang, Hubei Province	LI Xing-yu, MAO Yao, CHEN Zhan-le, <i>et al.</i> (4593)
Concentration and Reactivity of Carbonyl Compounds in the Atmosphere of North China	HUANG Yu, CHEN Xi, WANG Ying-hong, <i>et al.</i> (4602)
Characteristics of O ₃ Pollution and Key Precursors in Chengdu During Spring	HAN Li, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (4611)
O ₃ Source Characteristics of an Industrial Area in the Yangtze River Delta Based on Boundary Observations	HUANG Qing, HUANG Yin-zhi, ZHANG Shan, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics and Source of VOCs During O ₃ Pollution Between August to September, Langfang Development Zones	ZHANG Jing-qiao, WANG Hong-liang, FANG Xiao-yun, <i>et al.</i> (4632)
Coating-derived VOCs Emission Characteristics and Environmental Impacts from the Furniture Industry in Guangdong Province	ZENG Chun-ling, SHAO Xia, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (4641)
Response of Air Quality to COVID-19 Lockdown in Xiamen Bay	XU Chao, WU Shui-ping, LIU Yi-jing, <i>et al.</i> (4650)
Similarities and Differences of Valley Winds in the Beijing Plain and Yanqing Areas and Its Impact on Pollution	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4660)
Characteristics of Atmospheric Particulate Matter Pollution and the Unique Wind and Underlying Surface Impact in the Twain-Hu Basin in Winter	ZHU Yan, ZHAO Tian-liang, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (4669)
Conversion Characterizations of Sulfate Ion and Nitrate Ion in Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	YANG Liu, HE Qing, SHENG Zhong-yi (4678)
Water Chemical Characteristics and Influence of Exogenous Acids in the Yangtze River Basin	WANG Qi, YU Shi, JIANG Ping-ping, <i>et al.</i> (4687)
Effects of Land Use on Nutrient Concentrations in the Inflow River of Lake Taihu, China	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4698)
Diversity of Zooplankton and Niche Characteristics of Keystone Species in the Weihe River Based on eDNA	LIANG Dong, XIA Jun, SONG Jin-xi, <i>et al.</i> (4708)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical and Personal Care Products in the Aquatic Environment of Sanya City, China	REN Bing-nan, GENG Jing (4717)
Screening of Priority Pollutants and Risk Assessment for Surface Water from Shengjin Lake	GONG Xiong-hu, DING Qi-qi, JIN Miao, <i>et al.</i> (4727)
Long-term Changes and Drivers of Ecological Security in Shahe Reservoir, China	YANG Wen-bin, DUAN Wen-xiu, CUI Yang, <i>et al.</i> (4739)
Seasonal Variation and Influencing Factor Analysis of Antibiotic Resistance Genes in Water Supply Reservoirs of Central China	ZHANG Kai, XIN Rui, LI Kuang-jia, <i>et al.</i> (4753)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of NO ₃ -Type Groundwater in the Rapidly Urbanizing Pearl River Delta	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (4761)
Spatial Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water in the Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i> (4772)
Identification of Dredging Depths Based on Sediment Vertical Distribution Profiles of Total Nitrogen and Total Phosphorus and Their Adsorption-desorption Equilibria	ZHOU Ya-ting, CHEN Xing-hong, LI Li-qing, <i>et al.</i> (4781)
Role of Borate and Phosphate Buffers in the Degradation of Organic Compounds in a PMS/Co ²⁺ System; Influencing Factors and Mechanisms	WAN Qi-qi, CHEN Zhu-hao, CAO Rui-hua, <i>et al.</i> (4789)
Degradation 2,2',4,4'-Tetrabromodiphenyl Ether by Activated Peroxymonosulfate Using Magnetic Biochar Supported α -MnO ₂	LI Xin, YIN Hua, LUO Hao-yu, <i>et al.</i> (4798)
Characteristics and Mechanisms of Bacteriophage MS2 Inactivation in Water by UV Activated Sodium Persulfate	ZHANG Chong-miao, YANG Hao-ming, WANG Zhen (4807)
Adsorption Characteristics of Phosphate on Cerium Modified Water Hyacinth Biochar	WANG Guang-ze, ZENG Wei, LI Shuai-shuai (4815)
Removal Efficiency and Mechanism of Ammonia Nitrogen in a Low Temperature Groundwater Purification Process	LI Dong, LIU Meng-hao, ZHANG Rui-miao, <i>et al.</i> (4826)
Speciation and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal(loid)s in the Municipal Sewage Sludge of China	GENG Yuan-meng, ZHANG Chuan-bing, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (4834)
Meta-analysis of Microbial Communities in the Activated Sludge of Wastewater Treatment Plants Under Different Climate Types	YANG Si-hang, QIN Ze-sheng, LIANG Man-chun (4844)
Partial Nitrification and Anaerobic Ammonia Oxidation Synergistic Denitrification to Remove Nitrogen and Carbon from Domestic Sewage	QIN Yan-rong, YUAN Zhong-ling, ZHANG Ming, <i>et al.</i> (4853)
Cultivation and Performance Analysis of Simultaneous Partial Nitrification, ANAMMOX, and Denitrification Granular Sludge	ZHOU Feng, LIU Yong-di, LI Wei (4864)
Application of Various Methods to Extract Microplastic from Typical Soils in China	ZHAO Xiao-li, LIU Zi-han, CONG Chen-yu, <i>et al.</i> (4872)
Evaluation and Sources of Heavy Metal Pollution in the Surface Soil of the Qaidam Basin	CHEN Liang, ZHANG Xi-ying, TANG Qi-liang, <i>et al.</i> (4880)
Content and Ecological Risks of Heavy Metals in Soil with Different Land Uses in a Rapidly Urbanizing Area	LI Meng-ting, SHEN Cheng, WU Jian, <i>et al.</i> (4889)
Selenium Geochemical Characteristics and Influencing Factors of Paddy Fields in Du'an County, Guangxi	LIU Fei, YANG Ke, XU Ren-ting, <i>et al.</i> (4897)
Carbonized Apple Branches Decrease the Accumulation and Damage of Cadmium on Apple Rootstock by Reducing DTPA-Cd in Soil	DENG Bo, XUN Mi, ZHANG Wei-wei, <i>et al.</i> (4908)
Accumulation and Health Risk of Heavy Metals in Cereals, Vegetables, and Fruits of Intensive Plantations in Hainan Province	YANG Jian-zhou, WANG Zhen-liang, GAO Jian-weng, <i>et al.</i> (4916)
Correlation Analysis among Environmental Antibiotic Resistance Genes Abundance, Antibiotics Concentrations, and Heavy Metals Concentrations Based on Web of Science Searches	MIAO Sun, CHEN Lei, ZUO Jian-e (4925)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Farmland Soil in Yinchuan	ZHANG Xiao-hong, TAO Hong, WANG Ya-juan, <i>et al.</i> (4933)
Effect of Manure from Different Sources on the Leaching of Antibiotics in Soil	LI Bin-xu, ZHU Chang-xiong, SONG Ting-ting, <i>et al.</i> (4942)
Analysis of the Traits of Nitrogen Metabolism Pathways for Several Forest Soils in Eastern China	LÜ Xue-li, ZHAO Yong-peng, LIN Qing-huo, <i>et al.</i> (4951)
Denitrification Rates and <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria Community Structure Characteristics of Bulk and Rhizosphere Soil in Spring and Summer in the Alpine Wetlands of the Qinghai-Tibet Plateau	LI Yu-qian, MA Jun-wei, GAO Chao, <i>et al.</i> (4959)
Microbial Community Structure of Soil Methanogens and Methanotrophs During Degradation and Restoration of Reed Wetlands in the Songnen Plain	WANG Qiu-ying, WANG Na, LIU Ying, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Fluvo-aquic Soil Under Different Rotation Fallow	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, DAI Hong-cui, <i>et al.</i> (4977)
Response of Photosynthetic Bacterial Community to Cadmium Contamination in Paddy Soil	LUO Lu-yun, JIN De-cai, WANG Dian-dong, <i>et al.</i> (4988)
Community Distribution of the Rhizospheric and Endophytic Bacteria of <i>Phragmites australis</i> and Their Limiting Factors in Iron Tailings	CAO Man-man, WANG Fei, ZHOU Bei-hai, <i>et al.</i> (4998)
Effects of Combination of Organic and Inorganic Nitrogen on Nitrification and Denitrification in Two Salinized Soils	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, ZHANG Wen-cong, <i>et al.</i> (5010)
Response of Yield, CH ₄ , and N ₂ O Emissions from Paddy Fields to Long-term Elevated CO ₂ Concentrations	YU Hai-yang, SONG Kai-fu, HUANG Qiong, <i>et al.</i> (5021)
Effects of Feedstock Material and Pyrolysis Temperature on Dissolved Organic Matter in Biochars	YAN Dai-hong, MA Ya-pei, SONG Kai-yue, <i>et al.</i> (5030)
Spatiotemporal Variations in Atmospheric Urban Heat Island Effects and Their Driving Factors in 84 Major Chinese Cities	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei (5037)
Research Progress in the Odorants and Their Emissions from Indoor Building Decoration Materials	ZHANG Wan-zhong, ZHANG Peng-yi (5046)