

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

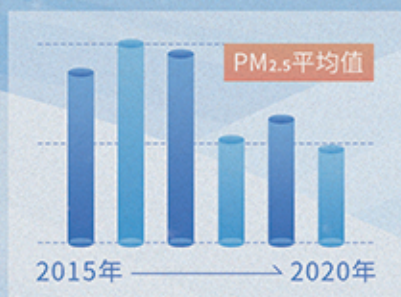
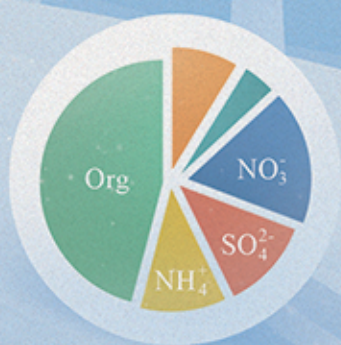
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裴彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM _{2.5} 污染特征分析·····	刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏 (3895)
天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析·····	郝团, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青 (3903)
长江中游地区 PM _{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响·····	王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲 (3913)
滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价·····	范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海 (3923)
典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性·····	秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓丽, 徐勃, 耿春梅 (3934)
大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源·····	朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉 (3944)
河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径·····	刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克 (3953)
京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估·····	朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍 (3966)
2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征·····	王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙 (3977)
钢铁生产行业二噁英污染特征变化及其排放因子·····	杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔 (3990)
长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价·····	胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静 (3998)
基于蒙特卡罗模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析·····	庞阔, 李敏, 刘璐, 杨璐, 赵洪军 (4008)
梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例·····	王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武 (4018)
基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算·····	王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生 (4032)
河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响·····	李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波 (4042)
联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源·····	张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿 (4054)
江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价·····	李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯 (4064)
天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策·····	吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰 (4074)
宁夏第三排水沟中药物和个人护理品 (PPCPs) 的污染特征与生态风险评估·····	李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦 (4087)
再生水河道浮游生物多样性季节变化分析: 以北运河为例·····	袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽 (4097)
太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析·····	杜瑛珣, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙 (4108)
太湖氧化亚氮 (N ₂ O) 排放特征及潜在驱动因素·····	刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强 (4118)
海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价·····	雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博 (4127)
玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果·····	胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜 (4136)
环境 pH 条件下 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素·····	刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎 (4146)
新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价·····	谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫 (4154)
宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征·····	沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞 (4166)
宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素·····	王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红 (4179)
地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法·····	王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (4190)
姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价·····	于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳 (4199)
基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测·····	杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥 (4212)
柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险·····	朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波 (4219)
不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性·····	任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞颖, 赵海洋 (4232)
橡胶草 (TKS) 对铅镉污染农田土壤的修复潜力·····	张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥 (4253)
3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力·····	张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚 (4262)
连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响·····	彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉 (4271)
改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响·····	杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良 (4282)
不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响·····	张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春 (4292)
水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系·····	李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强 (4301)
外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响·····	郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉 (4313)
不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响·····	冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌 (4322)
基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响·····	庞发虎, 李晓琦, 段莉阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (4333)
汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子·····	陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓 (4342)
岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较·····	冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松 (4353)
戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素·····	吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚 (4364)
长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响·····	刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹 (4372)
秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N ₂ O 排放的影响·····	白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠 (4379)
聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响·····	邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙 (4387)
微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响·····	王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平 (4394)
氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比·····	陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩 (4402)
《环境科学》征订启事 (4211) 《环境科学》征稿简则 (4312) 信息 (3922, 4031, 4107)	

长江中游地区 $PM_{2.5}$ 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响

王莹^{1,2}, 智协飞^{1,2*}, 白永清³, 董甫^{1,2}, 张玲^{1,2}

(1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044; 2. 天气在线气象应用研究所, 无锡 214000; 3. 中国气象局武汉暴雨研究所暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430205)

摘要: 作为一个新的区域性霾污染中心, 长江中游地区地理位置特殊, 是我国中东部地区大气污染物区域传输的重要枢纽, 天气环流对该区域不同传输和累积型 $PM_{2.5}$ 重污染的形成机制还不甚了解. 利用 T-mode 斜交旋转主成分分析法 (PCT), 对 2015~2019 年采暖季长江中游地区 74 d $PM_{2.5}$ 重污染事件进行天气环流分型, 得到: PCT1 高压底部传输型 (天数: 41 d, 占比: 55.4%)、PCT2 低压辐合累积型 (天数: 12 d, 占比: 16.2%)、PCT3 高压静稳累积型 (天数: 11 d, 占比: 14.9%) 和 PCT4 高压后部传输型 (天数: 10 d, 占比: 13.5%) 这 4 种主要的大气环流类型. 区域传输型污染 (PCT1 和 PCT4) 占比高达 69%, 是长江中游地区 $PM_{2.5}$ 重污染发生的主导因素, 突显了地域特殊性. 其中, PCT1 是最主要的环流型, 冷锋南侵伴随强偏北风驱动上游地区污染物快速传输, 使得 $PM_{2.5}$ 浓度暴发式增长. 境内传输通道城市襄阳、荆门和荆州 $PM_{2.5}$ 传输过程具有 12 h 滞后特征, 其 $PM_{2.5}$ 影响源区主要分布在上游的河南中北部、山东西部和华北大部分地区. PCT4 传输型受低层偏东风输送影响, 污染上升速率也相对较快. PCT2 和 PCT3 为静稳天气环流型, 地面风速较小, 低层水平辐合和下沉运动有利本地 $PM_{2.5}$ 重污染累积, 污染上升速率和持续时间都相对传输型更长.

关键词: $PM_{2.5}$; 长江中游地区; 区域传输; T-mode 斜交旋转主成分分析法 (PCT); 环流分型

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-3913-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202110137

Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy $PM_{2.5}$ Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin

WANG Ying^{1,2}, ZHI Xie-fei^{1,2*}, BAI Yong-qing³, DONG Fu^{1,2}, ZHANG Ling^{1,2}

(1. Key Laboratory of Meteorological Disasters, Ministry of Education, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Weather Online Institute of Meteorological Applications, Wuxi 214000, China; 3. Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430205, China)

Abstract: The dominant transportation and accumulation patterns of heavy $PM_{2.5}$ pollution events over the Yangtze River middle basin were identified based on the obliquely rotated T-mode principal component analysis (PCT) method and the daily mean surface pressure. The heavy $PM_{2.5}$ pollution events over the Yangtze River middle basin during 2015-2019 were divided into four patterns, namely, PCT1: high-pressure bottom transport pattern (number of days: 41 d, accounting for 55.4% of the total heavy $PM_{2.5}$ pollution days), PCT2: low-pressure convergence accumulation pattern (12 d, 16.2%), PCT3: high-pressure static stability accumulation pattern (11 d, 14.9%), and PCT4: high-pressure rear transport pattern (10 d, 13.5%). Regional transport patterns (PCT1 and PCT4) accounted for 69% of the total heavy $PM_{2.5}$ pollution days and were the major pattern of heavy $PM_{2.5}$ pollution in the Yangtze River middle basin. PCT1 occurred most frequently among the four patterns, accompanied with strong northerly winds, which could drive the rapid transportation of pollutants from the upstream areas and cause the explosive increase in $PM_{2.5}$ over the Yangtze River middle basin. The $PM_{2.5}$ pollution events in the transport corridor, including Xiangyang, Jingmen, and Jingzhou, exhibited a 12-hour lag feature. Most parts of northern China were the source of $PM_{2.5}$, especially in central and northern Henan and western Shandong. The PCT4 transport pattern was featured by the low-level easterly winds, and the pollution level rose quickly. The PCT2 and PCT3 were characterized by the low ground wind speed, associated with the low-level horizontal convergence and subsidence. Such synoptic conditions were favorable for the accumulation of local $PM_{2.5}$ pollution, and the pollution rise rate was slower, and the duration was longer than those of other patterns.

Key words: $PM_{2.5}$; the Yangtze River middle basin; regional transport; obliquely rotated T-mode principal component analysis (PCT); circulation classification

近年来,城市化进程日益加快,不可持续的能源结构以及中国石油和煤炭等化石燃料的利用,使得过去 20 年来城市空气质量日益恶化,空气污染被认为是最严重的环境问题,并引起了中国政府、公众和科学家的广泛关注,主要表现之一为冬季持续大规模霾事件频频出现^[1~4]. 目前国内外对于霾污染时空分布及形成机制的研究主要集中在经济发达区域,如京津冀地区、长江三角洲地区、珠江三角洲地区和成渝城市群^[5,6],而针对长江流域中游两湖

地区(湖南和湖北)的关注度还较少^[7~9]. 长江中游两湖地区是长江经济带的重要组成部分,近年来由于区域经济快速增长,大气污染物排放总量居高不下,已成为一个新的区域性霾污染中心^[10~13]. 此外,两湖地区具有“次盆地”地形,其北界通过南阳盆地

收稿日期: 2021-10-18; 修订日期: 2021-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(42075186, 41830965); 南京信息工程大学协同中心项目(2020xtzx004)

作者简介: 王莹(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气环境与大气污染气象影响, E-mail: 20191201078@nuist.edu.cn

* 通信作者, E-mail: zhi@nuist.edu.cn

与中原地区相连,是我国大型外流盆地之一.两湖地区地理位置特殊,位于华北、中原和华东重霾污染区的东亚冬季风下风方,是大气污染物区域传输的典型受体区,且“次盆地”地形不易使大气污染物输出,大气污染物区域传输对长江中游地区大气环境具有重要影响,是亟待深入探索的复杂大气环境问题的代表性研究区域.

不同环流形势对大气污染物的传输、累积和扩散影响具有显著差异^[13~16],利用天气环流分型探索大气污染的成因机制成为一项重要研究工作^[17~23].目前 T-mode 斜交旋转主成分分析法(PCT)已广泛应用于区域大气环流分型研究,具有良好的应用价值^[19,22,23,24].常炉予等^[25]的研究利用 T-mode 主成分分析法(PCT)将 925 hPa 低层位势高度和全风速场进行大样本客观分型,分别总结出促进上海地面臭氧污染形成和消散的大气环流类型,并对各个环流形势的气象特点进行了分析总结.许建明等^[20]的研究利用 T-mode 斜交旋转分解方法(PCT)揭示了上海秋冬季易发生 PM_{2.5} 污染的 4 种天气环流类型,分别为冷锋、高压后部弱气压场和高压前部弱气压场(WGI 和 WGf),并指出高压前部弱气压场是导致上海 3 次连续重度污染发生的重要原因.戴竹君等^[19]的研究指出,均压区型、冷锋前部型和低压倒槽型是江苏秋冬季节发生重度霾的主要 3 类地面形势.Sun 等^[26]的研究对形成北京区域霾污染的边界层热和动力结构特征进行分析,得出南风输送型、东风辐合型、下沉压缩型和辐合累积型这 4 种主要环流类型.

PM_{2.5} 在大气中停留时间较长,通常可达数周时间,具有传输距离远、影响范围广的特点.不同的环流形势主导不同的传输路径,进而影响污染变化过程,表现出明显的区域性污染传输特征^[27~31].在一定的天气尺度环流下,周围省份(如山东和河南等省)排放的气溶胶污染物可通过跨界传输带入到京津冀地区^[32~34].Wu 等^[35]的研究表明珠三角 PM_{2.5} 污染过程中来自于长距离传输的比例高达 50%~70%,传输作用带来的影响会使得郊区的污染重于临近城区的污染.Xiao 等^[36]的研究发现武汉地区 PM_{2.5} 污染最严重的天气类型在 850 hPa 水平上常表现为西北高压和东北低压,此时由于西北风盛行,可将北部地区的较高浓度的气溶胶污染输送到武汉.高压底部传输型是长江中游地区 PM_{2.5} 重污染天气的重要环流形势之一,其对应冷空气路径往往偏北,地面偏北风风速较强,在强冷空气南下过程中,较强的偏北风将上游高浓度污染物输送至长江中游地区,造成长江中游重污染事件的发生^[37].

由于长江中游地区与京津冀、长三角和四川盆地等重污染区域相连,区域间地势多平坦,有利于大气污染物跨区域传输,其独特的地理位置使得长江中游成为我国大气污染物区域传输的重要枢纽^[37].观测表明受中东部地区强偏北风影响,PM_{2.5} 污染物由源区华北平原向下游两湖地区传输,沿邯郸、郑州和南阳传输至襄阳为准 2 d 时间^[38].长江中游地区具有典型的大气污染传输通道^[39,40],在冬季风影响下我国中东部地区大气污染物跨区域传输至长江中游境内,按照境外→襄阳→荆门→荆州的路径进行大气污染物输送.长江中游地区环境空气质量受到当地源和外来源的双重影响,因此有必要区分讨论本地累积型和区域传输型主导的区域重污染过程,并认识处在特殊地理位置上的区域传输影响对大气污染的加重作用.因此,本文通过筛选和整理 2015~2019 年采暖季(11 月~次年 3 月)长江中游地区大气污染传输通道城市 PM_{2.5} 重污染过程,利用 T-mode 斜交旋转主成分分析(PCT)天气分型方法对所有案例进行客观环流分型,重点研究不同环流形势下的传输、累积型重污染特征、成因及与区域传输影响等关键科学问题,以期识别长江中游地区 PM_{2.5} 重污染发生的潜在物理机制提供支撑.

1 材料与方法

1.1 资料说明

本研究资料选取的区域和时段为我国中东部地区 2015~2019 年采暖季(11 月~次年 3 月).大气颗粒物 PM_{2.5} 监测站点数据选取中国环境监测总站的全国城市空气质量实时发布平台(<http://www.mee.gov.cn>),时间分辨率为 1 h.气象地面观测站点数据来源于国家气象中心(<http://data.cma.cn/>),时间分辨率为 1 h,气象要素主要包括温、压、湿、风和降水.再分析资料选取 ERA5 全球再分析数据集,水平分辨率为 0.25°×0.25°,时间分辨率为 1 h,选用主要气象参数为 2 m 气温、10 m 风速、海平面气压、垂直速度、散度和边界层高度等.本文所用的 ERA5 数据集是欧洲中期天气预报中心开发的第五代大气再分析全球气候产品,作为较强大的全球气候监测工具,具有良好的空间分辨率(31 km)和高时间分辨率(1 h).

1.2 T-mode 斜交旋转主成分分析法(PCT)

在本研究中,基于 Huth 等^[41]的 T-mode 斜交旋转主成分分析法(PCT)分型研究是使用欧盟 cost733class(<http://cost733.met.no>)软件包完成的,该软件包可创建、评估和比较一种或多种要素的分类结果,此分型软件主要包括以下算法步骤:

①进行数据在空间上的标准化; ②将数据按照第一个子集由第 1 d、第 11 d 和第 21 d 等组成, 第二个子集由第 2 d、第 12 d 和第 22 d 等组成, 这样的排列组合方式分为 10 个子集; ③求解矩阵方程 $\mathbf{Z} = \mathbf{ATF}$, 式中, $\mathbf{Z}$ 为原始高维数据矩阵, $\mathbf{F}$ 为主成分 (PC) 得分矩阵, $\mathbf{A}$ 为 PC 载荷矩阵, 将每个子集的 PC 得分通过梯度投影算法^[42]的斜向旋转投影到其余数据上, 并选取每天载荷最大的类型作为此日的分类结果. ④最后比较这 10 个分类, 选择累计解释方差最大的子集作为最终的分类结果.

2 结果与讨论

2.1 长江中游地区 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染过程的典型天气环流分型

定义每年 11 月~次年 3 月期间, 长江中游地区大气污染物区域传输通道城市: 襄阳、荆门和荆州这 3 个城市中, 有两个及两个以上城市同时达到重污染以上[即 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 大于 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], 记为一次重污染过程. 由此筛选出 2015~2019 年的冬季重

污染案例共 74 d. 利用 T-mode 斜交旋转主成分分析 (PCT) 天气分型方法对 74 d 重污染案例的海平面气压场 (SLP) 进行客观分型研究, 并得到 4 种主要的环流类型.

图 1 给出了所产生环流类型的合成平均 SLP 和合成平均 10 m 风场叠加图, 根据环流形态和主要影响系统中心位置, 可将确定环流类型描述如下.

①PCT1: 高压底部传输型, 出现天数为 41 d, 环流型占比 55.4%. 该环流型冷空气相对较强, 主导风向为北风, 风力强, 有利于将上游污染快速传输到本地; ②PCT2: 低压辐合累积型, 共出现 12 d, 环流型占比 16.2%, 长江中游处于弱低气压场控制, 风速较小; ③PCT3: 高压静稳累积型, 出现天数为 11 d, 环流型占比 14.9%, 长江中游受弱高压均压场控制, 风力小; ④PCT4: 高压后部传输型, 出现天数为 10 d, 环流型占比 13.5%, 冷高压向东移动, 长江中游位于高压后部, 主要受到偏东气流控制, 造成重污染东路输送. 4 种环流类型累积解释方差超过 93%, 且区域传输型重污染 (PCT1 和 PCT4) 天数占比较大, 高

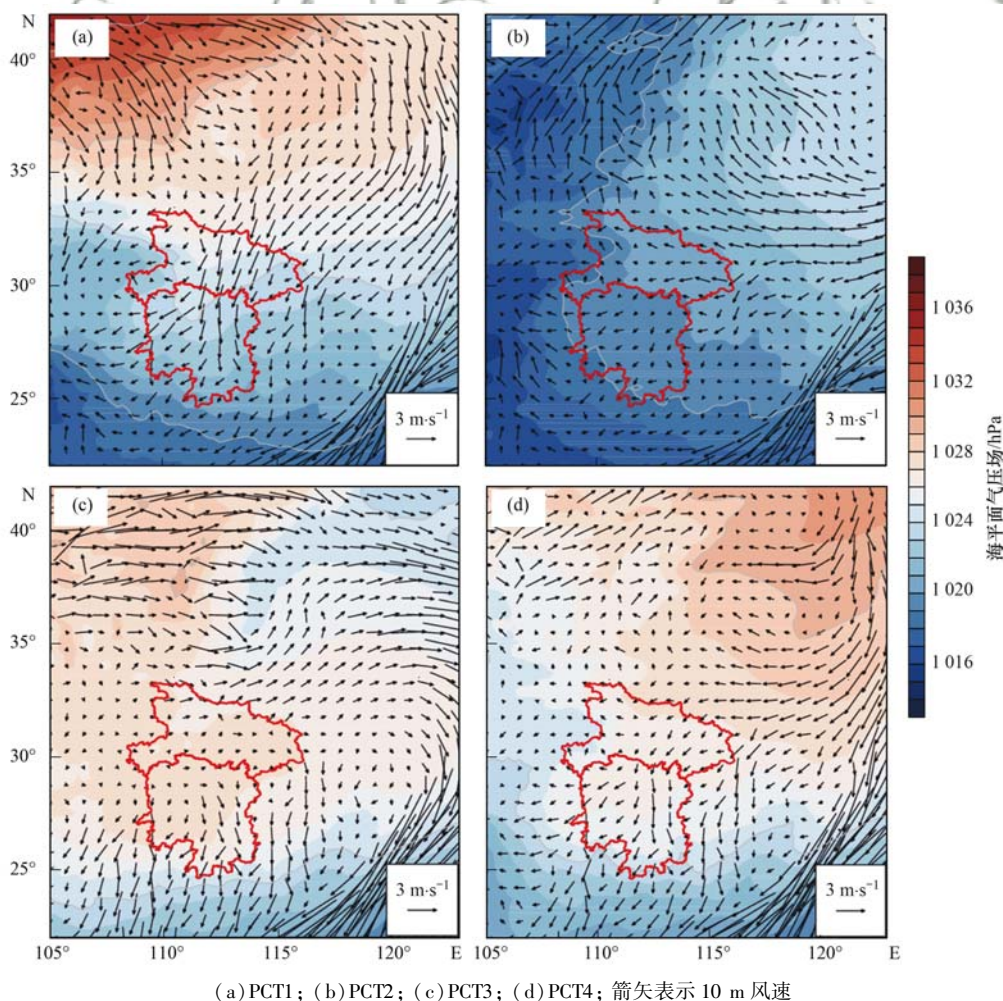
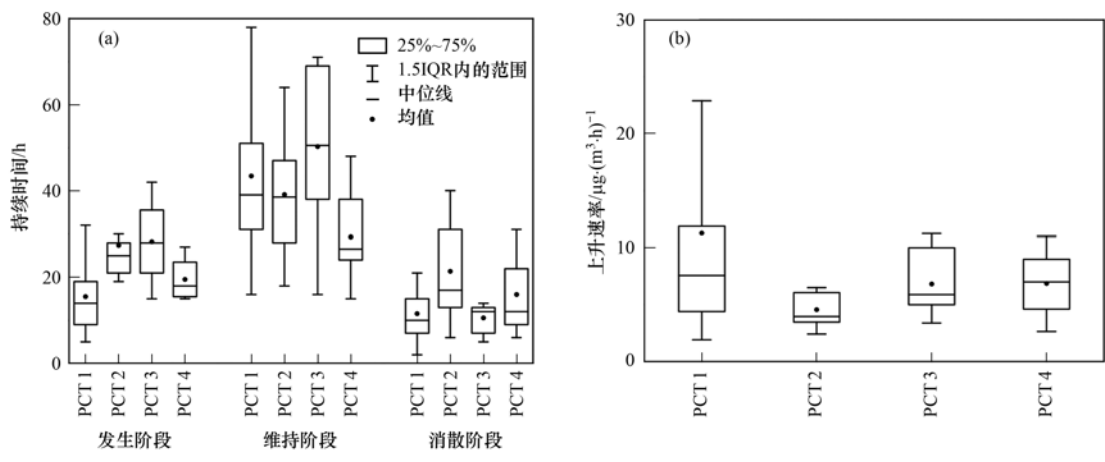


图 1 2015~2019 年采暖季 (11 月~次年 3 月) 长江中游地区 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染天气环流分型的海平面气压场和 10 m 风速

Fig. 1 Sea level pressure and 10 m wind speeds of the heavy $\text{PM}_{2.5}$ pollution weather circulation pattern of the hot season (November to March of the following year) in the Yangtze River middle basin



(a) 污染发生、维持和消散阶段的持续时间; (b) 重污染天气环流型的上升速率

图 2 长江中游地区 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染天气环流型的污染特征统计

Fig. 2 Air pollution characteristic analysis of heavy $\text{PM}_{2.5}$ weather circulation patterns in the Yangtze River middle basin

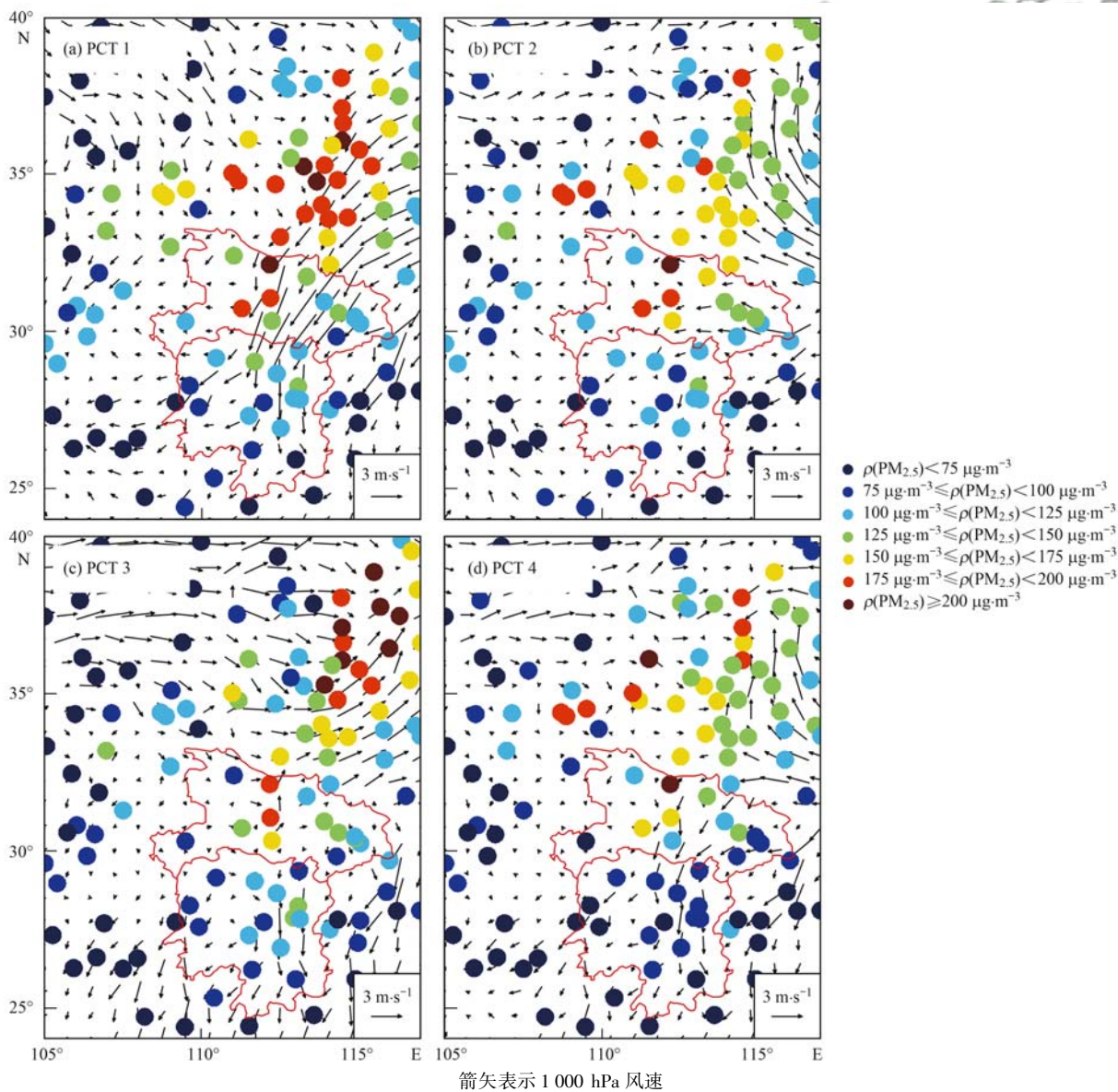


图 3 长江中游地区 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染天气环流型 1 000 hPa 风场和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of 1 000 hPa wind fields and $\text{PM}_{2.5}$ concentration of heavy pollution weather circulation pattern in the Yangtze River middle basin

达 69%, 可见区域传输对长江中游地区重污染天气影响显著。

图 2 分别统计了不同环流型下重污染发生、维持和消散阶段的持续时间, 及 PM_{2.5} 从轻度污染 ($115 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 上升为重度污染 ($150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的变化速率。其中, 污染发生阶段的持续时间定义为污染持续累积增长前最低值的时刻至达到重度污染第一个时刻的持续时间; 维持时间定义为重度污染持续时间; 消散阶段定义为重度污染最后一个时刻到持续下降到浓度最低点时刻的持续时间。由图 2 可见, PCT1 高压底部传输型污染在地面较强北风的作用下, 可将北方污染物快速传输到长江中游, 污染物浓度暴发式增长, 其次 PCT4 高压后部传输型在地面偏东风的作用下, 增长速度也相对较快, PCT2 和 PCT3 两种静稳型环流, 对应污染物累积阶段时间则相对较长。同样, PCT2 和 PCT3 静稳型环流大气扩散能力相对较差, 污染物不易稀释扩散, 对应污染持续时间也会较长。由图 2 可知, PCT1 污染持续时间也有相对较长值, 其主要原因是北方污染物浓度往往过大, 当风速不是很大时, 长江中游南部地形又对 PM_{2.5} 扩散有一定削弱作用, 所以会出现连续 PCT1 类型的污染过程, 当风速进一步加大时, 污染可迅速清除消散, 因此 PCT1 消散时间相对最短。PCT2 和 PCT4 消散时间相对较长, 可能原因分析是环流演变造成的, 污染虽然下降到重度污染以下, 但是依旧存在污染现象。

图 2(b) 为 4 类天气形势 PM_{2.5} 污染浓度从轻度污染 $115 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 到重度污染污染峰值的上升速率, 以此分析 4 类天气形势前期污染增长特征。从中可知, PCT1 和 PCT4 两种传输型污染上升较快, PCT1 地面偏北风将北方污染物带来长江中游, 是本地重

污染发生的重要原因。

2.2 水平输送及垂直结构

4 类天气类型对应的大尺度环流背景和站点 PM_{2.5} 平均浓度有明显差异 (图 3)。PCT1 高压底部传输型: 两湖地区地面处于上游高压底部, 高压前部偏北风对应地面位置在两湖地区具有较强的地面北风, 冷空气驱动上游华北地区污染物快速传输到两湖地区北部, 特别加剧西北部传输通道城市襄阳和荆门城市的空气污染, 浓度平均值超过 $175 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 即空气质量处于重度及以上污染水平。PCT4 高压后部传输型: 地面两湖地区处于高压后部, 盛行东北风将右侧长江中游颗粒物传输至两湖。PCT2 低压辐合累积型 [图 3(b)] 对应两湖地区静稳的天气形势, 静稳气象条件下, 大气边界层湍流活动弱, 对应大气扩散能力较弱, 局地污染物累积增长, 这是局地大气污染的典型特征。同时 PCT3 高压

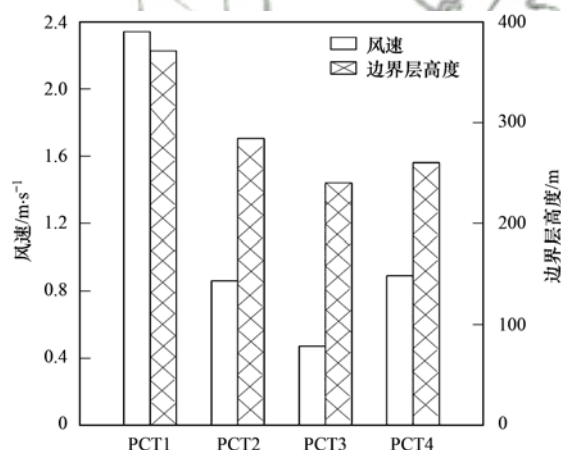


图 4 长江中游地区 PM_{2.5} 重污染天气环流型
平均风速和边界层高度

Fig. 4 Wind speed and boundary layer height in PM_{2.5} heavy pollution circulation pattern of regional average of the Yangtze River middle basin

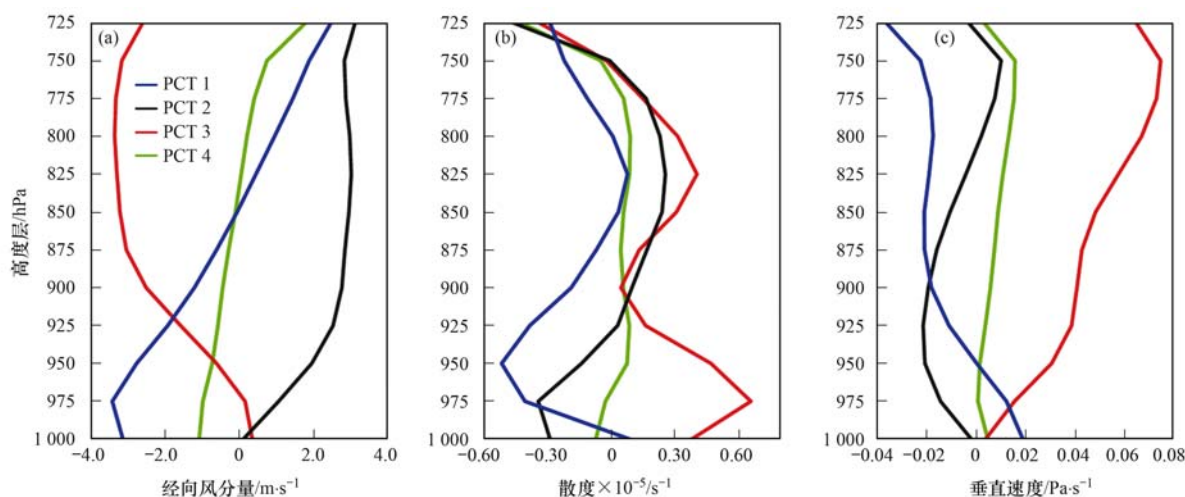


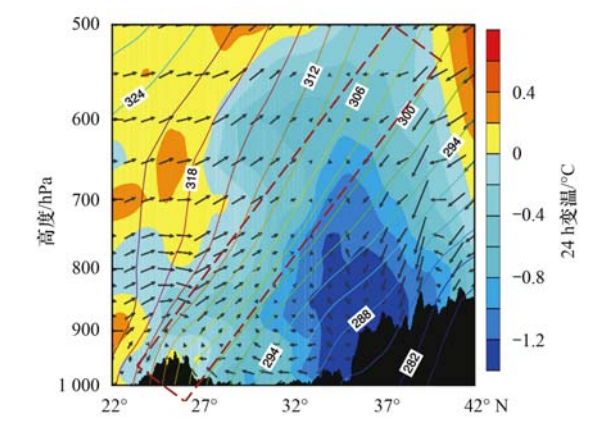
图 5 长江中游地区区域平均 PM_{2.5} 重污染天气环流型垂直廓线

Fig. 5 Vertical profile in PM_{2.5} heavy pollution circulation patterns of regional average of the Yangtze River middle basin

静稳累积型也为静稳型污染,两湖地区位于地面高压中心,风速较小,污染物局地缓慢累积增长。

风速和大气边界层高度分别是影响污染物水平和垂直扩散的关键气象要素,对大气环境变化有重要影响。大量研究结果表明,风速和边界层高度的增加往往使得污染物浓度降低,从而对空气质量具有明显改善作用;同时,当两者较小时,通常代表着大气扩散能力较差,此时污染物浓度明显较高。然而以上研究并不适用于传输型污染,传输型重污染事件的发生往往伴随着较高的边界层高度^[43],有利于将远距离污染物传输到本地。图 4 给出 4 类天气类型统计的风速和边界层高度区域平均(112.25°~114.25°E; 30°~32°N)柱状图,由图可见,PCT1 传输型风速和边界层高度最高,良好的大气通风条件有利污染输送。PCT2、PCT3 两种静稳型风速和边界层高度较低,大气扩散条件最差。PCT3 和 PCT4 均受高压下沉气流影响,边界层高度较低,但 PCT4 风速明显大于 PCT3,气象输送条件相对良好。

除水平方向气象要素和区域污染物传输作用的影响外,垂直混合也是污染演变的控制动力因素之一,对空气污染物的垂直累积扩散具有重要影



等值线表示假相当位温,单位: K; 箭头表示垂直环流,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 黑色阴影表示地形高度; 红色虚线框表示冷锋位置

图 6 PCT1 型大气垂直结构、24 h 变温及假相当位温和垂直环流沿 112.25°~114.25°E 平均的纬向-高度剖面

Fig. 6 PCT1 atmospheric vertical structure, vertical (height-latitude) cross-section of 24 h temperature variation, pseudo-equivalent potential temperature, and vertical circulation along 112.25°-114.25°E average values

响^[44,45]。图 5 显示了 4 类天气形势下经向风分量、散度和垂直速度的垂直廓线(112.25°~114.25°E; 30°~32°N),反映污染物输送和累积过程的动力学机制存在明显差异。高压底部传输型(PCT1)在对流

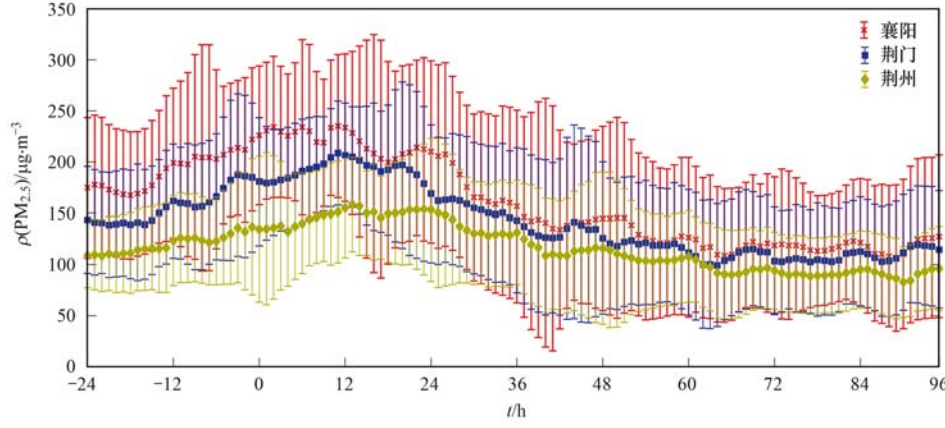


图 7 长江中游地区大气污染物传输通道襄阳、荆门和荆州 PCT1 型 41 d $\text{PM}_{2.5}$ 重污染传输过程的合成

Fig. 7 Composite transport process of heavy $\text{PM}_{2.5}$ pollution of 41 d of PCT1 in Xiangyang, Jingmen, and Jingzhou in the Yangtze River middle basin

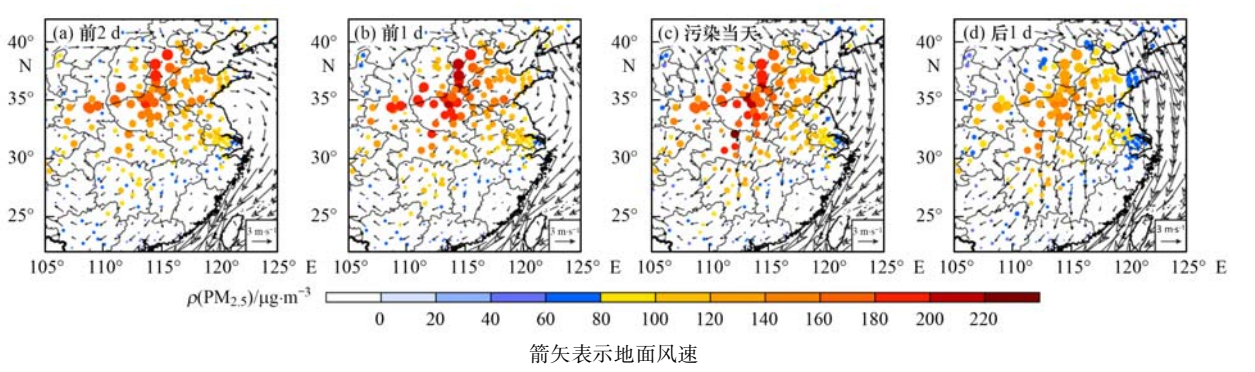


图 8 长江中游地区高压底部传输型对应 41 d 重污染合成 $\text{PM}_{2.5}$ 传输和地面风场过程演变

Fig. 8 $\text{PM}_{2.5}$ transport and surface wind fields process evolution of 41 d of high-pressure bottom transport pattern in the Yangtze River middle basin

层 975 hPa 以下有较强的偏北风(风速为负值),稳定在 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,在 975 hPa 以上随高度急剧减小,并在 850 hPa 附近转为偏南风,随着高度的增加而增强.这种由冷锋入侵形成的水平风的垂直结构,对长江中游传输型重污染有重要作用,可引导北方源区污染物向受体长江中游传输和汇聚^[46].同时,在大气边界层(850~1 000 hPa)内观察到强风辐合(散度为负值),950 hPa 内气流下沉(垂直速度为正值),共同促使 PM_{2.5}在两湖地区表面附近聚集,从而导致严重 PM_{2.5}污染事件. PCT4 高压后部传输型地面以偏北风为主,且 975~1 000 hPa 垂直方向上以弱辐合为主,可将上游污染物源源不断向两湖地区输送.与传输型不同, PCT2 低压辐合累积型在地面主要受弱低压控制,风速较小,污染物不易稀释扩散,且 950 hPa 以下气流以辐合为主,加上微弱的上升运动进一步促进四周区域 PM_{2.5}向低压中心两湖地区水平辐合. PCT3 两湖地区位于弱高压中心,低层风速较小,同时 925 hPa 以上偏北风配合较强的下沉运动可将上游污染传输到两湖地区,加重两湖地区污染.

2.3 大气污染物区域传输对长江中游地区 PM_{2.5}重污染过程的影响

PCT1 高压底部传输型在 4 种环流型中出现天数最多,是易产生重污染天的重要环流类型之一,其对应冷空气路径往往偏北,强度较强,且边界层高度和地面风速较强,是典型的冷锋前污染传输过程.图 6 给出 PCT1 型 41 d 重污染日合成平均的 24 h 变温和假相当位温沿 $112.25^{\circ}\sim 114.25^{\circ}\text{E}$ 经度平均的垂直剖面.从中可知,北方冷空气由 800 hPa 高空向南侵入两湖地区近地面,长江中游地区表现为典型的冷锋垂直环流特征.图 6 中假相当位温密集区(红框标注)为锋面,随高度向冷空气一侧倾斜,冷锋过

后两湖及其上游地区降温幅度明显.长江中游地区低层偏北气流沿锋面爬升并向北迂回,引导北方源区污染物向长江中游地区传输和汇聚,中低层偏南暖气流及地形阻挡对冷空气侵入和污染物传输起缓冲作用^[32],加重长江中游地区污染快速累积.

长江中游地区具有典型的大气污染传输通道,在冬季风影响下我国中东部地区大气污染物跨区域传输至长江中游境内,按照境外→襄阳→荆门→荆州的路径进行大气污染物输送.为了进一步分析区域传输对长江中游 PM_{2.5}重污染过程的影响,基于 PCT1 型 41 d 重污染过程合成了襄阳、荆门和荆州这 3 个城市 PM_{2.5}浓度小时变化(图 7).受强偏北风驱动,上游地区污染物快速传输到长江中游,位于北部边界的襄阳受影响最大,PM_{2.5}浓度首先升高且污染程度最为严重.荆门和荆州相继在 12 h 和 24 h 之后出现污染峰值,表明大气污染物在长江中游境内传输具有 12 h 滞后的特征.

对长江中游 PCT1 型 41 d 重污染过程(前 2 d、前 1 d、污染当天和后 1 d)PM_{2.5}浓度进行合成,得到如图 8 所示的区域传输过程演变.从中可知,PM_{2.5}浓度的时空变化存在明显的跨区域传输现象,地面较强的偏北风将上游地区高浓度污染输送至长江中游,造成长江中游重污染事件的发生.随着北风的进一步加强,大气扩散条件较好,长江中游污染物浓度明显降低.

基于观测滞后相关分析方法确定长江中游高压底部传输型上游潜在源区.图 9(a)利用高压底部传输型 41 d 小时样本,统计了襄阳重污染当天 PM_{2.5}小时浓度与其他城市前 1 d(24 h)PM_{2.5}小时浓度的滞后相关系数,图 9(b)利用襄阳 24 h 滞后相关数值最大的菏泽,计算菏泽 PM_{2.5}小时浓度与其他城市前 24 h PM_{2.5}小时浓度的滞后相关系数,

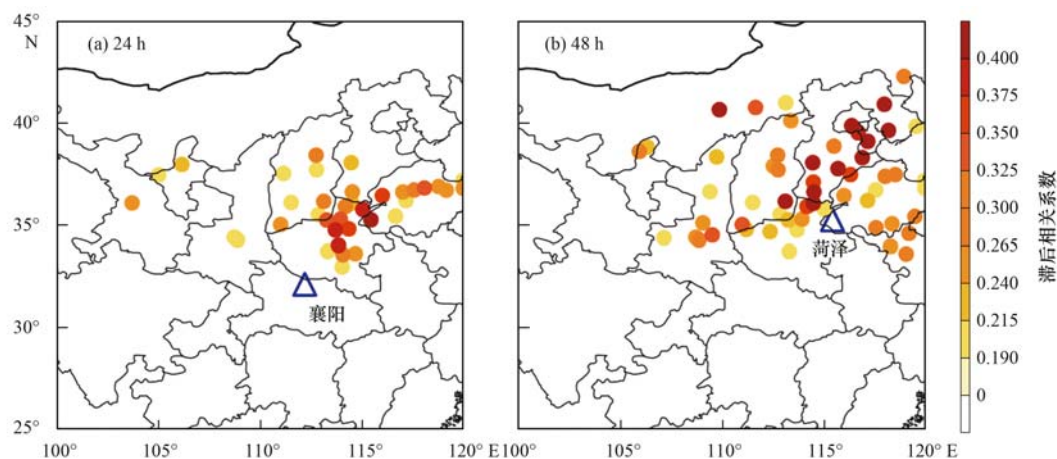


图 9 高压底部传输型重污染 PM_{2.5}小时浓度滞后相关系数空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of lag correlation coefficient in the PM_{2.5} hourly concentration of high-pressure bottom transport pattern

两组相关性均通过了 95% 置信水平检验。由两组滞后相关数值的空间分布可见, 污染物区域传输的上下游效应明显, 襄阳 24 h 潜在源区主要集中在河南中北部和山东西部, 48 h 潜在源区覆盖华北大部地区, 这些地区 $PM_{2.5}$ 高浓度可随着地面偏北风, 跨区域输入到长江中游地区, 对本地大气污染具有明显加重作用。

3 结论

(1) 长江中游 4 种主要的重污染环流类型为 PCT1 高压底部传输型、PCT2 低压辐合累积型、PCT3 高压静稳累积型和 PCT4 高压后部传输型, 环流型占比分别为 55.4%、16.2%、14.9% 和 13.5%。其中, 区域传输型污染 (PCT1 和 PCT4) 出现天数最多, 高达 69%, 大气污染物区域传输是导致长江中游地区 $PM_{2.5}$ 重污染天气频发生的关键驱动因素。

(2) PCT1 传输型在地面较强北风的作用下, 可将北方污染物快速传输到长江中游地区, 污染物浓度呈暴发式增长, 当北风风速进一步加大, 污染物被迅速清除, 污染过程相对最短。PCT4 传输型主要受地面偏东风的影响, 污染上升速率也相对较快。PCT2 和 PCT3 两种静稳环流型, 污染物在本地缓慢累积增长, 重污染持续时间相对较长。

(3) PCT1 高压底部传输型, 冷锋南侵伴随强偏北风驱动上游华北地区污染物快速传输到长江中游地区, 同时 850 ~ 1 000 hPa 两层之间强风辐合, 有利于 $PM_{2.5}$ 传输在本地累积增长。而低层东北风驱动作用是 PCT4 高压后部传输型重污染发生的有利条件。PCT2 和 PCT3 为静稳天气环流型, 地面风速较小, 分别受低层低压辐合和高压下沉气流的影响, $PM_{2.5}$ 污染在本地累积增长。

(4) 高压底部传输型污染具有明显的跨区域传输特征, 长江中游传输通道城市襄阳、荆门和荆州 $PM_{2.5}$ 传输具有 12 h 时间滞后现象。基于滞后相关方法辨识了大气污染物区域传输过程中的上下游效应及潜在影响源区, 结果表明长江中游地区 $PM_{2.5}$ 影响源区主要分布在河南中北部、山东西部和华北大部地区。

参考文献:

- [1] Chan C K, Yao X H. Air pollution in mega cities in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(1): 1-42.
- [2] Yan S Q, Zhu B, Kang H Q. Long-term fog variation and its impact factors over polluted regions of East China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, **124**(3): 1741-1754.
- [3] 杨晓辉, 宋春杰, 范丽行, 等. 京津冀地区高分辨率 $PM_{2.5}$ 浓度时空变化模拟与分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4083-4094.
- [4] 廉涵阳, 杨欣, 张普, 等. 北京 2019 年冬季一次典型霾污染特征与成因分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2121-2132.
- [5] Lian H Y, Yang X, Zhang P, *et al.* Analysis of characteristics and causes of a typical haze pollution in Beijing in the winter of 2019[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2121-2132.
- [6] Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, *et al.* Atmospheric aerosol compositions in China: spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(2): 779-799.
- [7] 张小曳. 中国不同区域大气气溶胶化学成分浓度、组成与来源特征[J]. *气象学报*, 2014, **72**(6): 1108-1117.
- [8] Zhang X Y. Characteristics of the chemical components of aerosol particles in the various regions over China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, **72**(6): 1108-1117.
- [9] 白永清, 祁海霞, 刘琳, 等. 武汉大气能见度与 $PM_{2.5}$ 浓度及相对湿度关系的非线性分析及能见度预报[J]. *气象学报*, 2016, **74**(2): 189-199.
- [10] Bai Y Q, Qi H X, Liu L, *et al.* Study on the nonlinear relationship among the visibility, $PM_{2.5}$ concentration and relative humidity in Wuhan and the visibility prediction [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2016, **74**(2): 189-199.
- [11] 马德栗, 李兰, 鞠英芹. 湖北省霾日数气候特征及夏季典型霾过程气象因子分析[J]. *环境科学与技术*, 2015, **38**(11): 148-153.
- [12] Ma D L, Li L, Ju Y Q. Climate characteristics of haze days and analysis of summer haze weather event in Hubei Province[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **38**(11): 148-153.
- [13] Shen L J, Wang H L, Zhao T L, *et al.* Characterizing regional aerosol pollution in central China based on 19 years of MODIS data: spatiotemporal variation and aerosol type discrimination [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114556.
- [14] 朱燕, 赵天良, 白永清, 等. 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[J]. *环境科学*, 2021, **42**(10): 4669-4677.
- [15] Zhu Y, Zhao T L, Bai Y Q, *et al.* Characteristics of atmospheric particulate matter pollution and the unique wind and underlying surface impact in the Twain-Hu basin in winter [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 4669-4677.
- [16] 任阵海, 苏福庆, 陈朝晖, 等. 夏秋季节天气系统对边界层内大气中 PM_{10} 浓度分布和演变过程的影响[J]. *大气科学*, 2008, **32**(4): 741-751.
- [17] Ren Z H, Su F Q, Chen Z H, *et al.* Influence of synoptic systems on the distribution and evolution process of PM_{10} concentration in the boundary layer in summer and autumn[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, **32**(4): 741-751.
- [18] Bai Y Q, Qi H X, Zhao T L, *et al.* Simulation of the responses of rainstorm in the Yangtze River Middle Reaches to changes in anthropogenic aerosol emissions[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **220**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117081.
- [19] Bai Y Q, Wang Y, Kong S F, *et al.* Modelling the effect of local and regional emissions on $PM_{2.5}$ concentrations in Wuhan, China during the COVID-19 lockdown [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2021, **12**(6): 871-880.
- [20] 张人禾, 李强, 张若楠. 2013 年 1 月中国东部持续性强雾霾

- 天气产生的气象条件分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, **44**(1): 27-36.
- Zhang R H, Li Q, Zhang R N. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, **57**(1): 26-35.
- [15] 王静, 施润和, 李龙, 等. 上海市一次重雾霾过程的天气特征及成因分析[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(5): 1537-1546.
- Wang J, Shi R H, Li L, *et al.* Characteristics and formation mechanism of a heavy air pollution episode in Shanghai[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(5): 1537-1546.
- [16] Ning G C, Yim S H L, Wang S G, *et al.* Synergistic effects of synoptic weather patterns and topography on air quality: a case of the Sichuan Basin of China[J]. *Climate Dynamics*, 2019, **53**(11): 6729-6744.
- [17] Cheng C S, Campbell M, Li Q, *et al.* A Synoptic Climatological approach to assess climatic impact on air quality in South-central Canada. Part I: Historical analysis[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2007, **182**(1-4): 131-148.
- [18] 张国琰, 甄新蓉, 谈建国, 等. 影响上海市空气质量的地面天气类型及气象要素分析[J]. 热带气象学报, 2010, **26**(1): 124-128.
- Zhang G L, Zhen X R, Tan J G, *et al.* The analysis of the relationship between the air quality in Shanghai and surface pressure patterns and meteorological factors[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2010, **26**(1): 124-128.
- [19] 戴竹君, 刘端阳, 王宏斌, 等. 江苏秋冬季重度霾的分型研究[J]. 气象学报, 2016, **74**(1): 133-148.
- Dai Z J, Liu D Y, Wang H B, *et al.* The classification study of the heavy haze during autumn and winter of Jiangsu[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2016, **74**(1): 133-148.
- [20] 许建明, 常炉予, 马井会, 等. 上海秋冬季 PM_{2.5}污染天气形势的客观分型研究[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(12): 4303-4314.
- Xu J M, Chang L Y, Ma J H, *et al.* Objective synoptic weather classification on PM_{2.5} pollution during autumn and winter seasons in Shanghai[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(12): 4303-4314.
- [21] Xu J M, Chang L Y, Qu Y H, *et al.* The meteorological modulation on PM_{2.5} interannual oscillation during 2013 to 2015 in Shanghai, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **572**: 1138-1149.
- [22] 杨旭, 张小玲, 康延臻, 等. 京津冀地区冬半年空气污染天气分型研究[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(9): 3201-3209.
- Yang X, Zhang X L, Kang Y Z, *et al.* Circulation weather type classification for air pollution over the Beijing-Tianjin-Hebei region during winter[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(9): 3201-3209.
- [23] Miao Y C, Guo J P, Liu S H, *et al.* Relay transport of aerosols to Beijing-Tianjin-Hebei region by multi-scale atmospheric circulations[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **165**: 35-45.
- [24] Huth R, Beck C, Philipp A, *et al.* Classifications of atmospheric circulation patterns: recent advances and applications[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2008, **1146**(1): 105-152.
- [25] 常炉予, 许建明, 瞿元昊, 等. 上海市臭氧污染的大气环流客观分型研究[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(1): 169-179.
- Chang L Y, Xu J M, Qu Y H, *et al.* Study on objective synoptic classification on ozone pollution in Shanghai[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(1): 169-179.
- [26] Sun Z B, Zhao X J, Li Z M, *et al.* Boundary layer structure characteristics under objective classification of persistent pollution weather types in the Beijing area[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, **21**(11): 8863-8882.
- [27] Wang Y X, Zhang Q Q, Jiang J K, *et al.* Enhanced sulfate formation during China's severe winter haze episode in January 2013 missing from current models[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, **119**(17): 10425-10440.
- [28] 苗青青, 姜楠, 张瑞芹, 等. 中原城市群典型城市秋冬季大气 PM_{2.5}污染特征及溯源[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 19-29.
- Miao Q Q, Jiang N, Zhang R Q, *et al.* Characteristics and sources of PM_{2.5} pollution in typical cities of the central plains urban agglomeration in autumn and winter[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 19-29.
- [29] 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.
- [30] Ye X X, Song Y, Cai X H, *et al.* Study on the synoptic flow patterns and boundary layer process of the severe haze events over the North China Plain in January 2013[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **124**: 129-145.
- [31] Hu X M, Hu J, Gao L, *et al.* Multisensor and multimodel monitoring and investigation of a wintertime air pollution event ahead of a cold front over eastern China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, **126**(10), doi: 10.1029/2020JD033538.
- [32] Guo J P, Niu T, Wang F, *et al.* Integration of multi-source measurements to monitor sand-dust storms over North China: a case study[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2013, **27**(4): 566-576.
- [33] Zhang R Y, Wang G H, Guo S, *et al.* Formation of urban fine particulate matter[J]. *Chemical Reviews*, 2015, **115**(10): 3803-3855.
- [34] Ge B Z, Wang Z F, Lin W L, *et al.* Air pollution over the North China Plain and its implication of regional transport: a new sight from the observed evidences[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **234**: 29-38.
- [35] Wu D W, Fung J C H, Yao T, *et al.* A study of control policy in the Pearl River Delta region by using the particulate matter source apportionment method[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **76**: 147-161.
- [36] Xiao Z S, Miao Y C, Du X H, *et al.* Impacts of regional transport and boundary layer structure on the PM_{2.5} pollution in Wuhan, Central China[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **230**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117508.
- [37] Yu C, Zhao T L, Bai Y Q, *et al.* Heavy air pollution with a unique "non-stagnant" atmospheric boundary layer in the Yangtze River middle basin aggravated by regional transport of PM_{2.5} over China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(12): 7217-7230.
- [38] Hu W Y, Zhao T L, Bai Y Q, *et al.* Importance of regional PM_{2.5} transport and precipitation washout in heavy air pollution in the Twain-Hu Basin over Central China: observational analysis and WRF-Chem simulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **758**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143710.
- [39] 祁海霞, 崔春光, 赵天良, 等. 2015 年冬季湖北省 PM_{2.5}重污染传输特征及影响天气系统的数值模拟[J]. 气象, 2019, **45**(8): 1113-1122.

- Qi H X, Cui C G, Zhao T L, *et al.* Numerical simulation on the characteristics of PM_{2.5} heavy pollution and the influence of weather system in Hubei Province in winter 2015 [J]. *Meteorological Monthly*, 2019, **45**(8): 1113-1122.
- [40] Zhou Y, Bai Y Q, Yue Y Y, *et al.* Characteristics of the factors influencing transportation and accumulation processes during a persistent pollution event in the middle reaches of the Yangtze River, China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, **10**(5): 1420-1434.
- [41] Huth R. A circulation classification scheme applicable in GCM studies[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2000, **67**(1-2): 1-18.
- [42] Bernaards C A, Jennrich R I. Gradient projection algorithms and software for arbitrary rotation criteria in factor analysis [J]. *Educational and Psychological Measurement*, 2005, **65**(5): 676-696.
- [43] Hou X W, Fei D D, Kang H Q, *et al.* Seasonal statistical analysis of the impact of meteorological factors on fine particle pollution in China in 2013-2017[J]. *Natural Hazards*, 2018, **93**(2): 677-698.
- [44] Zhao X J, Zhao P S, Xu J, *et al.* Analysis of a winter regional haze event and its formation mechanism in the North China Plain [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(11): 5685-5696.
- [45] Yu Y, Xu H H, Jiang Y J, *et al.* A modeling study of PM_{2.5} transboundary transport during a winter severe haze episode in southern Yangtze River Delta, China [J]. *Atmospheric Research*, 2021, **248**; doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105159.
- [46] Hu W Y, Zhao T L, Bai Y Q, *et al.* Contribution of regional PM_{2.5} transport to air pollution enhanced by Sub-Basin topography: a modeling case over Central China [J]. *Atmosphere*, 2020, **11**(11), doi: 10.3390/atmos1111258.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2021年12月27日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议发布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单。《环境科学》连续20次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号。“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定,该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响。

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i> (3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i> (3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i> (3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i> (3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i> (3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i> (4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i> (4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i> (4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i> (4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i> (4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i> (4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i> (4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water: A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i> (4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i> (4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i> (4127)
Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i> (4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i> (4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shayu County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i> (4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i> (4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i> (4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i> (4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i> (4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i> (4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i> (4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i> (4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i> (4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i> (4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i> (4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i> (4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i> (4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i> (4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qiu, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i> (4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i> (4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i> (4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i> (4402)