

多方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心  
■ 出版 科学出版社



**2019**  
Vol.40 No.1  
第40卷 第1期

目 次

- 2015~2016年北京市3次空气重污染红色预警PM<sub>2.5</sub>成因分析及效果评估 ..... 吕皓, 魏巍, 周颖, 程水源, 王晓琦( 1 )  
长三角地区重点源减排对PM<sub>2.5</sub>浓度的影响 ..... 于燕, 王泽华, 崔雪东, 陈锋, 徐宏辉( 11 )  
上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析 ..... 戴海夏, 安静宇, 李莉, 黄成, 严茹莎, 朱书慧, 马英歌, 宋伟民, 阚海东( 24 )  
京津冀及周边地区PM<sub>2.5</sub>时空变化特征遥感监测分析 ..... 陈辉, 厉青, 李菅, 张连华, 毛慧琴, 周伟, 刘伟汉( 33 )  
MODIS C006气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性 ..... 王海林, 刘琼, 陈勇航, 孙冉, 李霞, 张华, 魏刚, 胡俊, 刘统强( 44 )  
气象因素对香港地区臭氧污染的影响 ..... 赵伟, 高博, 刘明, 卢清, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳( 55 )  
天津夏季边界层低层大气中PAN和O<sub>3</sub>的输送特征分析 ..... 姚青, 马志强, 林伟立, 刘敬乐, 王晓佳, 蔡子颖, 韩素芹( 67 )  
成都冬季PM<sub>2.5</sub>化学组分污染特征及来源解析 ..... 吴明, 吴丹, 夏俊荣, 赵天良, 杨清健( 76 )  
郑州市冬季天气PM<sub>2.5</sub>传输路径和潜在源分析 ..... 段时光, 姜楠, 杨留明, 张瑞芹( 86 )  
常州春季PM<sub>2.5</sub>中WSOC和WSON的污染特征与来源解析 ..... 李清, 黄雯倩, 马帅帅, 黄红缨, 叶招莲, 陈敏东( 94 )  
天津隧道机动车VOCs污染特征与排放因子 ..... 孙露娜, 刘妍, 赵静波, 孙世达, 宋从波, 张静, 李悦宁, 林应超, 王婷, 毛洪钧( 104 )  
机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征 ..... 梅德清, 朱宗宁, 孙天硕, 王向丽, 梅丛蔚, 肖政臻( 114 )  
超低排放路线下降煤烟气可凝结颗粒物在WFGD、WESP中的转化特性 ..... 杨柳, 张斌, 王康慧, 麻丁仁, 盛重义( 121 )  
超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性 ..... 阮仁晖, 谭厚章, 段钰锋, 杜勇乐, 刘鹤欣, 萧嘉繁, 杨富鑫, 张朋( 126 )  
北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放 ..... 张立坤, 李令军, 姜磊, 赵文慧, 鹿海峰, 王新辉, 邱昀( 135 )  
SCR装置对焦炉煤气燃烧废气中PCDD/Fs、PCBs和PCNs的协同脱除 ..... 任美慧, 樊芸, 王胜, 许亮, 张宁, 张雪萍, 陈吉平, 张海军( 143 )  
古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义 ..... 桂娟, 李宗省, 冯起, 卫伟, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 张百娟( 149 )  
夏季闽江CDOM的空间分布与降解特征 ..... 程琼, 庄婉娥, 王辉, 陈苇, 杨丽阳( 157 )  
亚热带河口陆基养虾塘水体CDOM三维荧光光谱平行因子分析 ..... 朱爱菊, 孙东耀, 谭季, 黄佳芳, 罗敏( 164 )  
基于UV-vis及EEMs解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量DOM的光谱特征及来源 ..... 周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 刘艳芳, 张磊, 李贵霞, 岳琳, 罗晓( 172 )  
分层型水源水库溶解性有机物性质及其膜污染特性 ..... 李凯, 王晓东, 黄廷林, 李舒, 刘双( 185 )  
重庆西部山区典型湖泊水-气界面CO<sub>2</sub>交换通量及其影响因素 ..... 罗佳辰, 倪茂飞, 李思悦( 192 )  
基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用 ..... 李渊, 李云梅, 郭宇龙, 张运林, 张毅博, 胡耀躲, 夏忠( 200 )  
巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征 ..... 李如忠, 阙凤翔, 熊鸿斌, 王莉( 211 )  
特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性:以成都市为例 ..... 丁瑶, 欧阳莉莉, 石清, 高平川, 赖承钱, 陈舒平, 贾滨洋, 姚刚( 219 )  
黄河中游(渭南—郑州段)全/多氟烷基化合物的分布及通量 ..... 李琦路, 程相会, 赵祯, 郭萌然, 袁梦, 华夏, 方祥光, 孙红文( 228 )  
重工业城市岩溶地下水多环芳烃污染特征及来源 ..... 苗迎, 孔祥胜, 李成展( 239 )  
沈抚新城地下水中PAHs的污染特征及健康风险评价 ..... 张士超, 姚宏, 向鑫鑫, 刘殷佐, 刘明丽, 鲁垠涛, 于晓华( 248 )  
多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险 ..... 付璐婧, 李一兵, 乔梦, 赵旭( 256 )  
原水水质对新型含Ca<sup>2+</sup>复合混凝剂混凝过程的影响 ..... 曲江东, 徐慧, 徐建坤, 段晋明, 门彬, 王东升( 263 )  
水体中磺胺甲噁唑间接光降解作用 ..... 李聪鹤, 车潇炜, 白莹, 石晓勇, 苏荣国( 273 )  
MoS<sub>2</sub>/BiOI复合光催化剂制备及其光催化氧化还原性能 ..... 张亮, 赵朝成, 高先瑶, 闫青云, 王帅军, 董培, 侯亚璐( 281 )  
纳米零价铜活化分子氧降解水中恩诺沙星 ..... 倪永炯, 程永清, 徐梦苑, 邱春根, 马晓雁, 李军, 邓靖( 293 )  
不同类型LDHs负载改性麦饭石对Cr(VI)吸附性能 ..... 张翔凌, 邓礼楚, 方晨佳, 雷雨, 何春艳, 高晨光, 赵双杰, 向洋( 300 )  
单层硅烷负载磁铁矿纳米颗粒的制备及除磷性能 ..... 邢明超, 谢强, 陈守慧, 吴德意( 310 )  
新生态型聚硅酸铁锰处理染料废水的优化 ..... 唐立朋, 魏群山, 吕强, 张弛, 刘亚男, 柳建设( 318 )  
不同外电压下自养型生物阴极还原硫酸盐的性能及生物膜群落响应 ..... 胡佳萍, 曾翠平, 骆海萍, 刘广立, 张仁铎, 卢耀斌( 327 )  
碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响 ..... 崔有为, 金常林, 王好韩, 李晶( 336 )  
进水C/P对SNEDPR系统脱氮除磷性能的影响 ..... 甄建园, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 都叶奇, 袁梦飞, 杜世明( 343 )  
不同污泥龄(SRT)对SNEDPR系统脱氮除磷影响 ..... 王晓霞, 甄建园, 赵骥, 于德爽, 都叶奇, 杜世明, 袁梦飞, 张帆( 352 )  
后置短程反硝化AOA-SBR工艺实现低C/N城市污水的脱氮除磷 ..... 巩秀珍, 于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 毕春雪, 都叶奇( 360 )  
缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行 ..... 李冬, 郭跃洲, 劳会妹, 曹美忠, 张杰( 369 )  
低温SNAD颗粒污泥工艺启动方式 ..... 李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰( 376 )  
不同取样尺度和数量下针阔混交林土壤呼吸的空间异质性 ..... 严俊霞, 孙琦, 李君剑, 李洪建( 383 )  
轮作方式对冬水田温室气体排放的影响 ..... 冯夕, 江长胜, 彭小乐, 李彦沛, 郝庆菊( 392 )  
紫色土N<sub>2</sub>O排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应 ..... 黄容, 高明, 王莹燕, 黎嘉成, 徐国鑫, 罗梅, 徐畅( 401 )  
岩溶地区不同土地利用方式土壤固碳细菌群落结构特征 ..... 张双双, 斯振江, 贾远航, 李强( 412 )  
丹江口库区库滨带植被土壤细菌群落多样性及PICRUSt功能预测分析 ..... 孙峰, 田伟, 张菲, 陈彦, 任学敏, 庞发虎, 李玉英, 姚伦广, 陈兆进( 421 )  
硫酸盐还原菌介导的吸附态砷的迁移转化 ..... 贾欠欠, 李伟, 王亚男, 段晋明, 刘玉灿( 430 )  
铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估 ..... 王洋洋, 李方方, 王笑阳, 杨志辉, 韩科, 阮心玲( 437 )  
新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响 ..... 杨伟光, 王美娥, 陈卫平( 445 )  
九江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价 ..... 林承奇, 黄华斌, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 林颖( 453 )  
草海典型高原湿地食物链中汞同位素组成特征 ..... 许议元, 何天容( 461 )  
Cd、Zn交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响 ..... 郭俊海, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 李厚恩, 徐铁兵, 周小勇, 叶勇, 于豹( 470 )  
不同浓度镧处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响 ..... 王起凡, 郭伟, 常青, 潘亮, 周昕南, 杨亮, 李娥( 480 )  
广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析 ..... 王俊能, 赵学敏, 胡国成, 钟松雄, 姚玲爱, 马千里, 许振成( 488 )  
6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响 ..... 邹亚丹, 徐擎擎, 张哿, 李富云, 李锋民( 496 )  
一种负载功能型微生物的营养缓释填料的制备及性能评价 ..... 冯克, 徐丹华, 成卓韦, 于建明, 陈建孟( 504 )  
《环境科学》征订启事(113) 《环境科学》征稿简则(238) 信息(93, 262, 342)

# 郑州市冬季大气PM<sub>2.5</sub>传输路径和潜在源分析

段时光<sup>1,2</sup>, 姜楠<sup>1,2\*</sup>, 杨留明<sup>1,2</sup>, 张瑞芹<sup>1,2\*</sup>

(1. 郑州大学化学与分子工程学院, 郑州 450001; 2. 郑州大学环境科学研究院, 郑州 450001)

**摘要:** 针对郑州市2017年12月~2018年2月的冬季气象数据和大气污染物质量浓度在线监测数据, 分析了气象条件对颗粒物浓度的影响。通过混合型单粒子拉格朗日综合轨迹(HYSPLIT)方法模拟了郑州市冬季48 h的气流后向轨迹, 同时进行了聚类分析, 并使用潜在源贡献因子(PSCF)方法和浓度权重轨迹(CWT)方法分析了郑州市冬季PM<sub>2.5</sub>的潜在污染来源和不同潜在源区对郑州市大气PM<sub>2.5</sub>浓度的贡献。结果表明, 低风速、高湿度和较少的降水是造成颗粒物污染严重的重要气象因素; 超过60%的后向轨迹来自西北方向, 其次是来自京津地区的轨迹占比为25.6%, 而来自南边和东边的轨迹只占7.5%和6.1%, 但对应着较高的PM<sub>2.5</sub>浓度; 郑州市冬季PM<sub>2.5</sub>的潜在源区主要是北部的京津冀传输通道城市, 包括焦作、开封、新乡、鹤壁、濮阳、安阳、邯郸和邢台, 此外, 相邻省份包括山西省、湖北省和安徽省部分区域对郑州市大气PM<sub>2.5</sub>污染水平也有着较大的影响和贡献。

**关键词:** 细颗粒物; 后向轨迹; 聚类分析; 潜在源贡献因子(PSCF); 浓度权重轨迹(CWT)

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)01-0086-08 DOI: 10.13227/j.hjxk.201805187

## Transport Pathways and Potential Sources of PM<sub>2.5</sub> During the Winter in Zhengzhou

DUAN Shi-guang<sup>1,2</sup>, JIANG Nan<sup>1,2\*</sup>, YANG Liu-ming<sup>1,2</sup>, ZHANG Rui-qin<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Chemistry and Molecular Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Research Institute of Environmental Science, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In this study, meteorological and air mass concentration data of Zhengzhou from December 2017 to February 2018 (winter) were used to quantify the influence of meteorological factors on the PM. The Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model was used to analyze the 48-hour backward trajectories and the cluster method was applied to classify the airflow backward trajectory. Moreover, the potential source contribution function and concentration-weighted trajectory analysis were applied to evaluate the transport pathways and sources of PM<sub>2.5</sub> in Zhengzhou. The results show that the heavy pollution in Zhengzhou during winter is mainly due to the low wind speed, high relative humidity, and low precipitation. The cluster analysis revealed that up to 60% of the back trajectories came from the northwest and 25.56% of the back trajectories came from the Beijing-Tianjin area. The airflow trajectories from the south and east account for 7.5% and 6.1% with higher PM<sub>2.5</sub> concentrations. The main potential sources of PM<sub>2.5</sub> in Zhengzhou during winter are located in Beijing-Tianjin-Hebei air pollution transmission channel cities including Jiaozuo, Kaifeng, Xinxiang, Hebi, Puyang, Anyang, Handan, and Xingtai. The adjacent provinces, including Shanxi, Hubei, and Anhui, also have great influence on the PM<sub>2.5</sub> in Zhengzhou.

**Key words:** PM<sub>2.5</sub>; backward trajectory; cluster analysis; potential source contribution function (PSCF); concentration-weighted trajectory (CWT)

近年来, 我国大气颗粒物污染问题日益突出, 并以细颗粒物PM<sub>2.5</sub>污染为主。PM<sub>2.5</sub>是指环境空气动力学当量直径≤2.5 μm的颗粒物, 对大气能见度、人体健康和全球气候有着重要的影响<sup>[1~3]</sup>。很多研究表明, 大气污染具有区域性特征, 污染物浓度不仅受本地排放源的影响, 还受到污染物的跨区域传输的影响<sup>[4~8]</sup>。后向轨迹模型(HYSPLIT)、潜在源贡献因子分析(potential source contribution function, PSCF)和浓度权重轨迹(concentration-weighted trajectory, CWT)是研究污染物输送扩散和潜在源识别方面的有效手段, 已被广泛用于区域污染物分布、扩散及传输特征研究。任传斌等<sup>[9]</sup>利用后向轨迹模型分析了北京城区PM<sub>2.5</sub>传输途径和潜在源区贡献, 并发现来自华北及黄淮平原的污染传

送是北京市城区四季PM<sub>2.5</sub>的主要贡献源; Liao等<sup>[10]</sup>利用PSCF和CWT分析方法发现四川盆地东南部和西部是成都冬季PM<sub>2.5</sub>主要潜在源区; Gao等<sup>[11]</sup>发现北京重污染期间较高的颗粒物浓度是由于一次污染物的累积、二次污染物的生成和北京周围地区排放的污染物的长距离传输共同作用的结果; 王郭臣等<sup>[12]</sup>使用后向轨迹模型发现天津气流输送存在明显的季节性特征, PM<sub>10</sub>和NO<sub>2</sub>的主要潜在源区集中在天津本地、邻近的河北省和山东省北

收稿日期: 2018-05-22; 修订日期: 2018-07-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0212400); 郑州市大气颗粒物源解析项目(20170053A)

作者简介: 段时光(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境化学, E-mail: shiguang77@163.com

\* 通信作者, E-mail: jiangn@zzu.edu.cn; rqzhang@zzu.edu.cn

部地区; Perrone 等<sup>[13]</sup>利用后向轨迹模式分析了长距离输送对地中海中部地区 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>1</sub> 的影响并发现地中海东南部区域对这两种污染物的浓度水平影响较大。

郑州市位于我国中部, 为河南省省会, 2016 年常住人口达 972 万人<sup>[14]</sup>; 经济发展迅速, 根据经济学人智库预测, 郑州市将在 2020 年成为与北上广等类似的新兴特大都市<sup>[15]</sup>。而城市空气质量堪忧, 根据国家环保部发布的重点区域和 74 个城市空气质量状况排名显示<sup>[16]</sup>, 郑州市空气质量年均排名分别为 2013 年倒数第 10、2014 年倒数第 9、2015 年倒数第 5 和 2016 年倒数第 7, 主要污染物为细颗粒物。目前关于郑州市大气 PM<sub>2.5</sub> 的研究主要集中 在 PM<sub>2.5</sub> 时空分布特征、组分特征和来源解析<sup>[17~22]</sup> 及健康风险<sup>[23, 24]</sup>, 而对重污染期间 PM<sub>2.5</sub> 的区域传输影响的综合系统研究鲜见报道。本文选取郑州市污染最严重的冬季为研究对象, 利用后向轨迹模型, 结合聚类分析、潜在源贡献因子分析和浓度权重轨迹方法, 探讨了影响郑州市冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 浓度的主要气团轨迹, 分析了其潜在源区和污染传送特征, 以期为本区域冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 污染联防联控提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

郑州市 2017 年 12 月 ~ 2018 年 2 月的 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO 和 O<sub>3</sub> 的质量浓度数据来自郑州市环境保护监测中心站(34. 77°N, 113. 70°E; 城区国控点), 该监测点位于郑州市中原区, 属于城市评价点, 可以反映郑州市城区的空气质量整体状况和变化趋势。温度、湿度、风速和降水的日均数据来自 Weather Underground (<https://www.wunderground.com>) 气象网站。后向轨迹模式所需的气象场数据来自美国国家环境预报中心(NCEP)的全球资料同化系统(GDAS)气象数据(<https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>)。

### 1.2 后向轨迹模型

本研究使用 HYSPLIT 模型来研究郑州市冬季污染物的来源和传输路径。HYSPLIT 后向轨迹模式是由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)与澳大利亚气象局联合研发的一种用于模拟分析气流运动、沉降和扩散的模式, 已广泛用于研究空气污染物的传输和来源分析。将郑州市环境空气质量监测站(34. 77°N, 113. 70°E)设为起始点。因为 500 m 高度能够准确地反映边界层的平均流场特征, 因此将模拟起始高度设置为 500 m<sup>[25]</sup>。分别以每天 00:00、

06:00、12:00、18:00 为后向轨迹模拟起始时间, 模拟轨迹时长为 48 h, 进行轨迹计算。使用 TrajStat 提供的 Angle Distance 算法对气流轨迹进行聚类分析<sup>[26]</sup>, 并在此基础上对每类轨迹对应的污染物浓度特征进行了统计分析。

### 1.3 潜在源贡献分析法

潜在源贡献函数(PSCF)是基于 HYSPLIT 模型用来确认污染物的区域来源的一种方法<sup>[27]</sup>。PSCF 方法是把研究区域划分为相等的小网格。为研究对象设置一个标准值, 将超过标准值的轨迹定义为污染轨迹。PSCF 值就是经过某一个网格  $ij$  的污染轨迹( $m_{ij}$ )个数与总轨迹个数( $n_{ij}$ )的比值, 即:

$$PSCF_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}}$$

PSCF 是一种条件概率, 当分母  $n_{ij}$  较小时, 计算的 PSCF<sub>ij</sub> 值会有很大的不确定性。为了减少不确定性, 引入权重因子, 将 PSCF 值乘以一个权重函数( $W_{ij}$ )<sup>[28, 29]</sup>, 即  $WPSCF = W_{ij} \times PSCF$ ,  $W_{ij}$  定义如下:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00 & (80 < n_{ij}) \\ 0.72 & (20 < n_{ij} \leq 80) \\ 0.42 & (10 < n_{ij} \leq 20) \\ 0.05 & (n_{ij} \leq 10) \end{cases}$$

### 1.4 浓度权重轨迹分析法

PSCF 值是一种条件概率, 无法确定研究区域的污染程度。因此, 进一步使用浓度权重轨迹分析法(CWT)来确定不同区域贡献的相对大小。CWT 模型是由 Seibert 等<sup>[29]</sup>与 Hsu 等<sup>[30]</sup>发展而来, 通过计算潜在源区气流轨迹权重浓度, 反映不同轨迹的污染程度。计算公式如下:

$$c_{ij} = \frac{1}{\sum_{l=1}^M \tau_{ijl}} \sum_{l=1}^M c_l \tau_{ijl}$$

式中,  $c_{ij}$  是网格  $ij$  的平均权重浓度,  $c_l$  是轨迹  $l$  经过网格  $ij$  对应的污染物浓度,  $\tau_{ijl}$  是轨迹  $l$  在网格  $ij$  的停留时间。同样, 为了减少较小的  $n_{ij}$  带来的不确定性, CWT 值也乘以权重函数  $W_{ij}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 气象条件

图 1 展示了郑州市 2017 年冬季的气象参数变化。平均气温是  $(2.8 \pm 3.6)^\circ\text{C}$ , 平均相对湿度是  $(45.1 \pm 21.7)\%$ , 平均风速是  $(2.7 \pm 1.7)\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。3 个月的总降水量是 12.7 mm, 其中 2017 年 12 月的降水只有 0.76 mm。能见度范围在 1 ~ 28 km, 其中能见度在 10 km 以下的天数占比为 68.6%。据报道, 将能见度小于 10 km 并且相对湿度小于 90% 定义为霾

天<sup>[31~33]</sup>. 郑州市 2017 年冬季霾天共有 56 d, 占比为 62.2%, 说明冬季污染严重. 经过统计分析, 霾天平均湿度和风速分别为 52.5% 和  $2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 非霾天平均湿度和风速分别为 25.2% 和  $3.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . 由图 1 可以看出, 较低的能见度对应着较高的湿度和较低的风速. 使用斯皮尔曼相关性分析方法计算了风速、湿度与能见度的相关性. 结果表明, 能见度与湿度呈现

很强的显著负相关( $r = -0.87, P < 0.01$ ), 能见度与风速呈现正相关性( $r = 0.53, P < 0.01$ ). 因此, 较高的湿度和较低的风速是冬季能见度降低的重要原因. 较高的湿度能够促进大气中颗粒物的吸湿增长和聚集<sup>[34]</sup>, 持续较低的风速则不利于水平方向上污染物的扩散. 另外, 较少的降水为污染天气颗粒物的累积提供有利的条件.

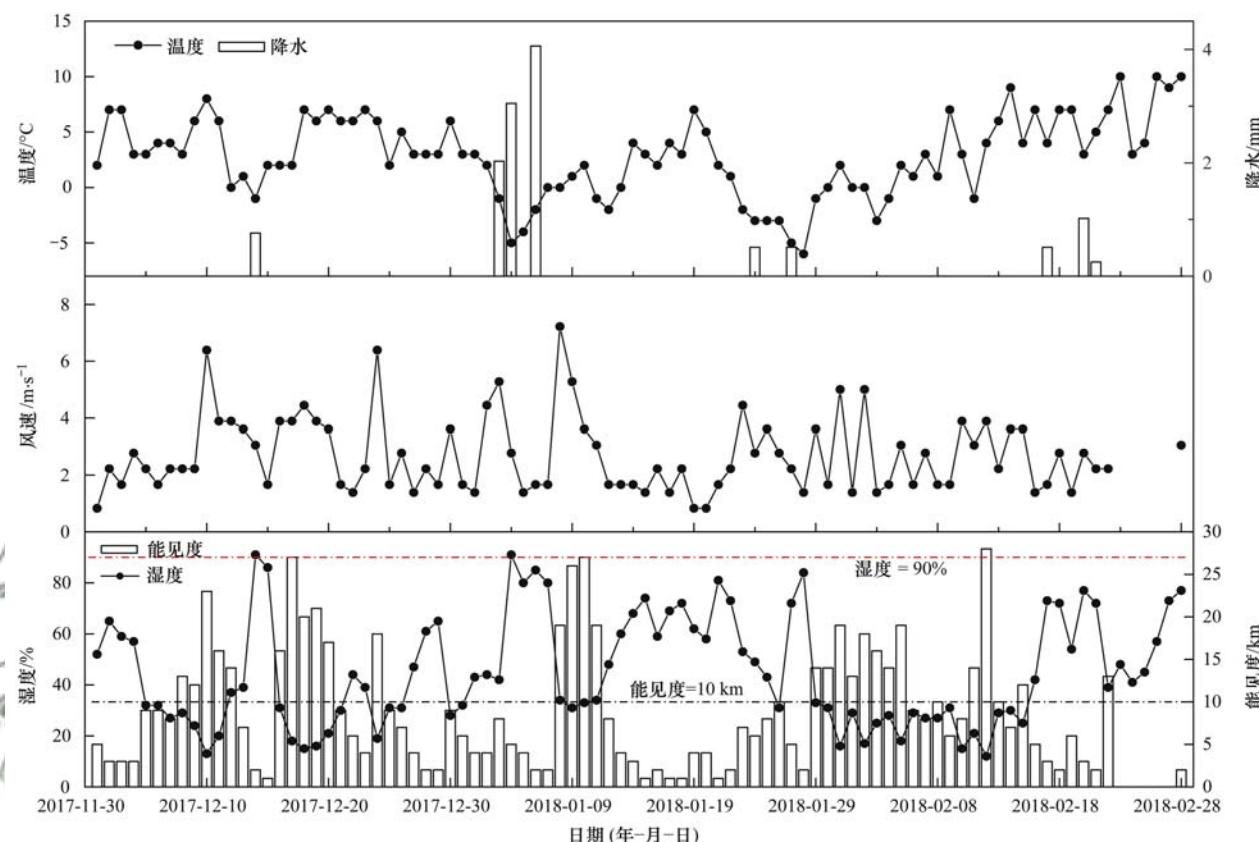


图 1 郑州市冬季温度、降水、风速、相对湿度和能见度的逐日变化

Fig. 1 Daily variation of the temperature, precipitation, wind speed, relative humidity, and visibility in Zhengzhou during winter

## 2.2 大气污染物质量浓度变化特征

图 2 展示了郑州市冬季  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{CO}$  和  $\text{O}_3$  的日均浓度, 表 1 列出了各污染物的月均浓度. 冬季  $\text{PM}_{2.5}$  日均浓度范围在  $18.1 \sim 355.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 平均浓度是  $(99.6 \pm 75.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ .  $\text{PM}_{10}$  日均浓度范围在  $44.8 \sim 407.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 平均浓度为  $(142.7 \pm 76.3) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ . 其中在 2018 年 1 月的  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  污染最严重, 平均浓度分别为  $118.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $152.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ; 2 月,  $\text{PM}_{2.5}$  浓度下

降至  $(85.9 \pm 58.1) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $\text{PM}_{10}$  下降至  $(135.1 \pm 55.2) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ . 根据我国 2012 年颁布的《环境空气质量标准》(GB 3095-2012), 研究期间有 48.9% 的天数超过了  $\text{PM}_{2.5}$  的二级日均标准限值  $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 38.9% 的天数超过了  $\text{PM}_{10}$  二级标准限值  $150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ . 气体污染物  $\text{NO}_2$  也处于较高污染水平, 其中 25 d 超过了日均值二级标准限值  $80 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 占比为 16.9%.  $\text{SO}_2$  日均浓度、 $\text{O}_3$  小时均值和日最大 8 h 平均浓度均不超标.

表 1 郑州市 2017 年冬季  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{CO}$  和  $\text{O}_3$  的平均浓度

Table 1 Average concentration of  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}$ , and  $\text{O}_3$  in Zhengzhou during winter 2017

日期(年-月)	$\text{PM}_{2.5}/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	$\text{PM}_{10}/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	$\text{SO}_2/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	$\text{NO}_2/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	$\text{CO}/\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\text{O}_3/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
2017-12	$94.5 \pm 70.8$	$139.8 \pm 69.7$	$23.8 \pm 6.7$	$61.8 \pm 20.5$	$1.3 \pm 0.5$	$29.6 \pm 14.2$
2018-01	$118.0 \pm 93.2$	$152.7 \pm 96.9$	$22.6 \pm 8.4$	$57.6 \pm 24.0$	$1.4 \pm 0.7$	$34.3 \pm 15.0$
2018-02	$85.9 \pm 58.1$	$135.1 \pm 55.2$	$21.5 \pm 7.1$	$41.9 \pm 15.5$	$1.2 \pm 0.3$	$55.3 \pm 15.3$
平均	$99.6 \pm 75.9$	$142.7 \pm 76.3$	$22.7 \pm 7.5$	$54.1 \pm 22.0$	$1.3 \pm 0.5$	$39.3 \pm 18.3$

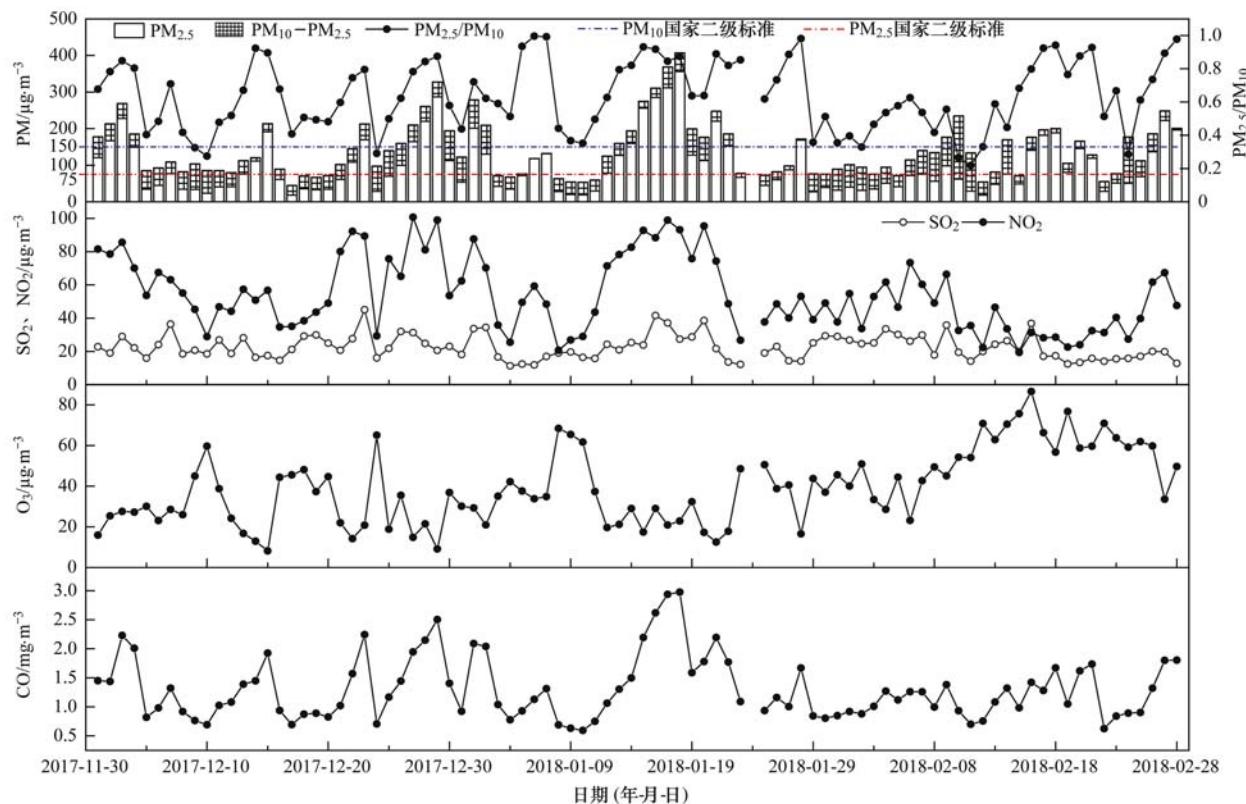


图2 郑州市冬季PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO和O<sub>3</sub>的浓度逐日变化  
Fig. 2 Daily variation of PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, and O<sub>3</sub> in Zhengzhou during winter

图2显示,郑州市冬季出现多次颗粒物浓度持续增加的污染状况,在颗粒物浓度上升期间,PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>的比值在不断增加,说明了颗粒物污染加重时,细颗粒物占比不断增加。SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>可以作为污染源的标识物,SO<sub>2</sub>主要由煤的燃烧排放,NO<sub>2</sub>主要来自机动车、燃煤电厂及天然气燃烧,而CO来自于能源的不完全燃烧过程(如:燃煤和机动车燃油)。图2中显示,SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO浓度变化与PM浓度变化相对应。表2列出了污染物之间的相关性,结果表明NO<sub>2</sub>和CO与PM<sub>2.5</sub>显著正相关,相关系数分别为0.60( $P < 0.01$ )和0.94( $P < 0.01$ ),说明PM<sub>2.5</sub>的浓度受到NO<sub>2</sub>和CO排放源的影响较大。SO<sub>2</sub>与PM<sub>2.5</sub>相关性较弱,相关系数仅为0.17。可能归因于郑州市对供暖使用的燃煤硫含量的控制以及脱硫效率的提高,导致硫化物相比较颗粒物的排放量比重较低<sup>[35]</sup>。另外,SO<sub>2</sub>和NO<sub>2</sub>是

PM<sub>2.5</sub>的前体物,可以通过气相氧化和多相反应在大气环境中被转化为硫酸盐和硝酸盐<sup>[36, 37]</sup>。

表3展示了气象条件与污染物之间的相关性,除了O<sub>3</sub>外,风速与其他污染物浓度都表现为负相关性,说明强风对污染的扩散稀释作用。二次污染物O<sub>3</sub>与PM<sub>2.5</sub>呈现负相关性( $r = -0.50$ ,  $P < 0.01$ )。这是由于颗粒物具有消光作用,可以吸收和散射太阳辐射,而对流层中的臭氧由光化学反应生成<sup>[38]</sup>,增加的颗粒物浓度会减弱太阳辐射从而影响O<sub>3</sub>的生成<sup>[39, 40]</sup>。O<sub>3</sub>与风速表现为正相关,可能因为较高的风速吹散了大气中的颗粒物,导致透射光照加强,增强的太阳辐射有利于O<sub>3</sub>的生成。湿度与PM<sub>2.5</sub>表现为显著正相关,较高的湿度不仅有利于半挥发性组分进入气溶胶相<sup>[41]</sup>,而且还会导致二次组分的生成和颗粒物的吸湿增长<sup>[2]</sup>。

表2 污染物之间的皮尔逊相关系数<sup>1)</sup>  
Table 2 Pearson's correlation coefficient for air pollutants

	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	CO	O <sub>3</sub>
PM <sub>2.5</sub>	1					
PM <sub>10</sub>	0.89 **	1				
SO <sub>2</sub>	0.17	0.25 *	1			
NO <sub>2</sub>	0.60 **	0.62 **	0.54 **	1		
CO	0.94 **	0.84 **	0.35 **	0.66 **	1	
O <sub>3</sub>	-0.50 **	-0.46 **	-0.31 **	-0.83 **	-0.59 **	1

1) \* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$

表 3 气象参数与污染物的皮尔逊相关系数<sup>1)</sup>

Table 3 Pearson's correlation coefficient for meteorological parameters and pollutants

	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	CO	O <sub>3</sub>
风速	-0.54 **	-0.48 **	-0.18	-0.62 **	-0.47 **	0.48 **
湿度	0.73 **	0.51 **	-0.33 **	0.28 **	0.60 **	-0.37 **
温度	0.20	0.28 **	0.23 *	0.07	0.17	0.25 *

1) \* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$

## 2.3 聚类分析

为了研究郑州市冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 污染水平受区域传输的影响程度以及污染物的传输方向, 本研究运用 HYSPLIT 模型进行轨迹模拟, 并进行聚类分析, 得到 6 条主要传输路径, 详见图 3。为了研究不同轨迹对污染物的影响, 将不同轨迹与其对应的污染物浓度的算术平均值相结合进行分析(表 4)。由图 3 和表 4 可知, 冬季来自西北方向的气流轨迹(轨迹 1、4 和 5)最多, 占总轨迹线的 60.8%。其次是来自京津冀地区的气流轨迹, 占比为 25.6%。来自南边和东边的轨迹最少, 占比分别为 7.50% 和 6.11%。其中来自南边的气流轨迹 3 对应的 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 浓度最高, 分别为 127.4  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和 166.1  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。轨迹 3 呈现相对较短的气流轨迹, 说明当时大气环境较为稳定, 易于污染物的积累; 对应较高的 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 质量浓度说明郑州市南部的排放源以及稳定的区域气象条件是郑州市高浓度颗粒物污染过程的重要原因。另外, 轨迹 3 对应的 NO<sub>2</sub> 浓度最高, 说明该轨迹经过的区域 NO<sub>2</sub> 排放量较大。由表 4 可以看出, 轨迹 1 对应的 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 浓度最低, 低于 2017 年冬季的平均值, 说明来自此方向

的气团较为清洁; 来自西北方向的轨迹 1、4、5 对应的 PM<sub>2.5</sub> 与 PM<sub>10</sub> 的比值相对较小, 可能归因于气流从西北方向的沙漠区域带来了更多的粗颗粒物, 而较长的气流轨迹说明风速较大, 也会造成更多扬尘污染; 轨迹 4 经过了京津冀传输通道, 其对应的 SO<sub>2</sub> 和 CO 浓度最高, 说明这些地区可能有更多的燃煤使用。

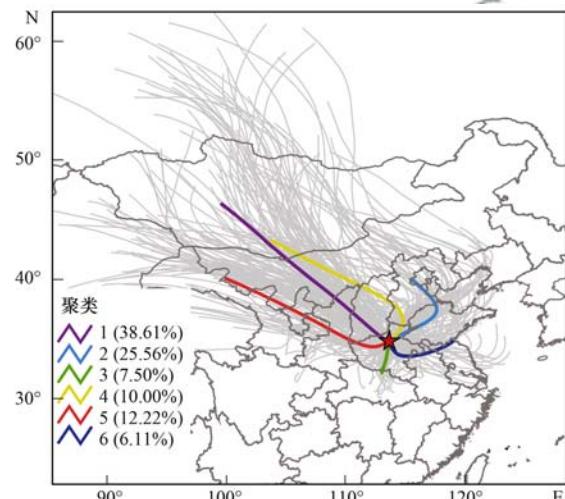


图 3 后向轨迹聚类分析结果

Fig. 3 Results for back-trajectory clusters

表 4 各轨迹的占比和对应的污染物平均浓度

Table 4 Ratio and mean concentrations of the pollution for all trajectory clusters arriving in Zhengzhou

轨迹	概率/%	PM <sub>2.5</sub> / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	PM <sub>10</sub> / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	SO <sub>2</sub> / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	NO <sub>2</sub> / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	CO/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub>
1	38.61	77.86	126.52	23.33	49.77	1.14	0.62
2	25.56	108.38	143.31	20.64	47.54	1.42	0.76
3	7.50	127.42	166.12	21.65	74.35	1.36	0.77
4	10.00	118.28	163.64	28.14	53.11	1.51	0.72
5	12.22	102.00	148.95	22.32	70.30	1.31	0.68
6	6.11	124.18	155.24	22.95	52.32	1.35	0.80

## 2.4 潜在源分析(WPSCF 和 WCWT)

为了确定郑州市冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 的潜在污染源分布, 利用 PSCF 模式进行了计算。将 HYSPLIT 计算的气流轨迹所覆盖的区域网格化, 网格大小为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , PM<sub>2.5</sub> 标准值设为《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 中的二级日均标准限值 75  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。计算结果见图 4(a), WPSCF 值越大表明该区域污染轨迹占比越大, 即对郑州市 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响越大。从中可见, WPSCF 高值区域主要集中

在郑州市北部, 包括: 新乡、开封、安阳、焦作、濮阳、鹤壁和邯郸这些京津冀传输通道中的城市, 其 PSCF 值在 0.6 以上。这说明除本地污染源排放以外, 这些区域污染传输对郑州 PM<sub>2.5</sub> 浓度有着较大的影响。郑州市周围区域, 包括洛阳、许昌、济源和商丘, 其 WPSCF 值超过 0.5。另外, 河南与湖北、山西、安徽和山东交界处的 WPSCF 值也超过了 0.4, 说明来自这些区域的污染传输在一定程度上也会导致郑州市大气 PM<sub>2.5</sub> 浓度增加。

将计算的气流轨迹所覆盖的区域网格化, 网格大小为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , 使用浓度权重轨迹方法确定潜在源区域对郑州PM<sub>2.5</sub>浓度贡献的大小。由图4(b)可以看出, 与WPSCF结果类似, 具有较高WCWT值的区域位于郑州市北部的京津冀传输通道城市, 包括: 焦作、新乡、开封、安阳、濮阳、鹤壁、邯郸和邢台, 其WCWT值大于 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;

洛阳和三门峡的北部区域、济源市、河南与山西交界处、河南与安徽交界处、河南与湖北交界处的WCWT值也大于 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。WCWT值较高说明这些区域对郑州市大气PM<sub>2.5</sub>浓度有着较大的贡献。而传输距离较长的西北区域WCWT值比较低( $<50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 对郑州市大气PM<sub>2.5</sub>浓度贡献相对较小。

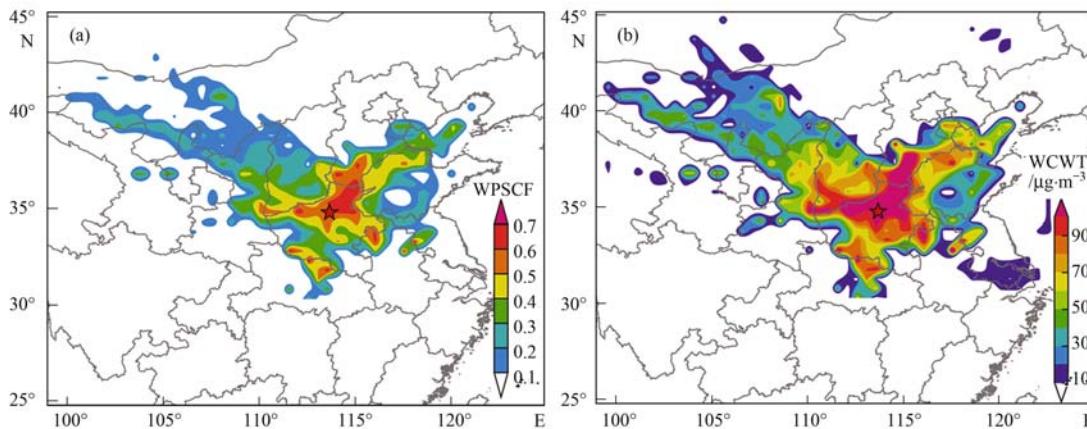


图4 郑州市冬季PM<sub>2.5</sub>潜在源贡献和浓度权重轨迹分析结果

Fig. 4 Results of the WPSCF and WCWT for PM<sub>2.5</sub> in Zhengzhou during winter

### 3 结论

(1) 郑州市冬季PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>的平均浓度分别为 $99.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $142.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 其中48.9%和38.9%的日均值超过了PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>的二级标准限值; 不利的气象条件, 包括较低的风速、较高的湿度和较少的降水是造成颗粒物浓度较高的重要原因, 且细颗粒物的快速增加是颗粒物污染加重的重要原因。

(2) 超过60%的气流轨迹来自西北方向, 轨迹线对应PM<sub>2.5</sub>与PM<sub>10</sub>浓度较低; 来自南边(7.5%)和西边(6.1%)轨迹较少, 但对应的PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>平均浓度最高; 经过京津冀传输通道的轨迹(轨迹4)对应的SO<sub>2</sub>和CO浓度最高, 来自南边的气流轨迹(轨迹3)对应的NO<sub>2</sub>浓度最高。

(3) 郑州市冬季大气PM<sub>2.5</sub>的WPSCF和WCWT结果分布类似, 其贡献高值区域主要分布在京津冀传输通道城市, 其次为河南省与山西省、湖北省和安徽省交界处区域, 这些区域的污染物传输会加重郑州市的PM<sub>2.5</sub>污染水平。

### 参考文献:

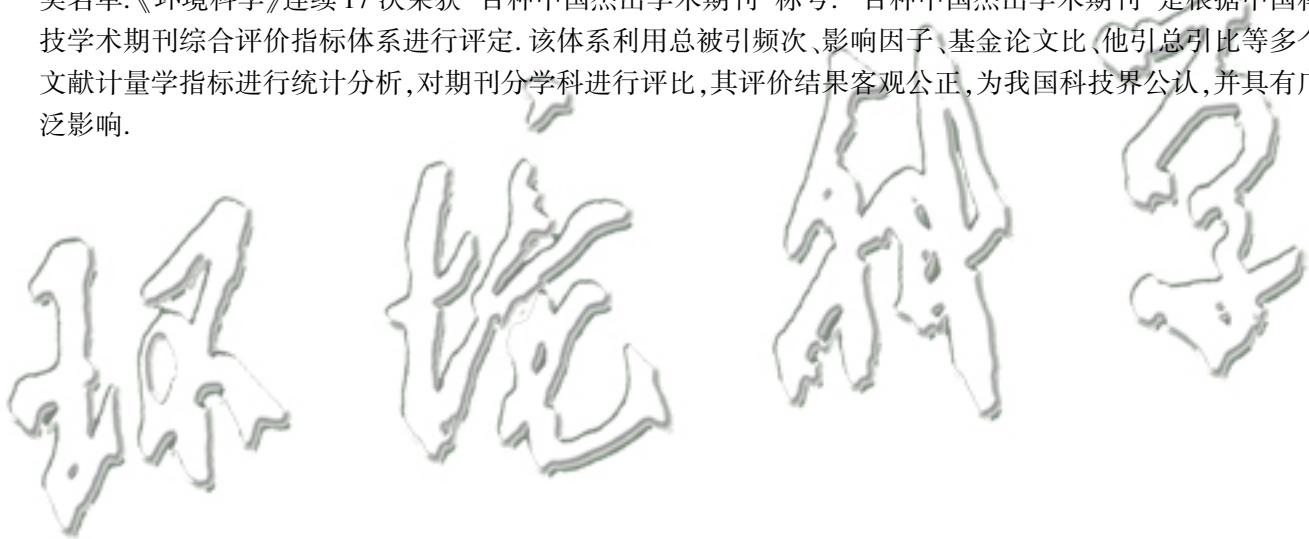
- [1] 郭新彪, 魏红英. 大气PM<sub>2.5</sub>对健康影响的研究进展[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1171-1177.  
Guo X B, Wei H Y. Progress on the health effects of ambient PM<sub>2.5</sub> pollution[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(13): 1171-1177.
- [2] Yang Y R, Liu X G, Qu Y, et al. Characteristics and formation mechanism of continuous extreme hazes in China: a case study in autumn of 2014 in the North China Plain [J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2015, 15 (7): 10987-11029.  
[3] Luan T, Guo X L, Guo L J, et al. Quantifying the relationship between PM<sub>2.5</sub> concentration, visibility and planetary boundary layer height for long-lasting haze and fog-haze mixed events in Beijing[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18(1): 203-225.  
[4] 王艳, 柴发合, 刘厚风, 等. 长江三角洲地区大气污染物水平输送场特征分析[J]. 环境科学研究, 2008, 21(1): 22-29.  
Wang Y, Chai F H, Liu H F, et al. Analysis on the characteristics of horizontal transport of the atmospheric pollutant over the Yangtze Delta[J]. Research of Environmental Sciences, 2008, 21(1): 22-29.  
[5] 薛文博, 付飞, 王金南, 等. 中国PM<sub>2.5</sub>跨区域传输特征数值模拟研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(6): 1361-1368.  
Xue W B, Fu F, Wang J N, et al. Numerical study on the characteristics of regional transport of PM<sub>2.5</sub> in China[J]. China Environmental Science, 2014, 34(6): 1361-1368.  
[6] 王芳, 陈东升, 程水源, 等. 基于气流轨迹聚类的大气污染输送影响[J]. 环境科学研究, 2009, 22(6): 637-642.  
Wang F, Chen D S, Cheng S Y, et al. Impacts of air pollutant transport based on air trajectory clustering [J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(6): 637-642.  
[7] 张志刚, 高庆先, 韩雪琴, 等. 中国华北区域城市间污染物输送研究[J]. 环境科学研究, 2004, 17(1): 14-20.  
Zhang Z G, Gao Q X, Han X Q, et al. The study of pollutant transport between the cities in north China [J]. Research of Environmental Sciences, 2004, 17(1): 14-20.  
[8] 王茜. 利用轨迹模式研究上海大气污染的输送来源[J]. 环境科学研究, 2013, 26(4): 357-363.  
Wang Q. Study of air pollution transportation source in Shanghai

- using trajectory model [J]. Research of Environmental Sciences, 2013, **26**(4): 357-363.
- [9] 任传斌, 吴立新, 张媛媛, 等. 北京城区 PM<sub>2.5</sub> 输送途径与潜在源区贡献的四季差异分析 [J]. 中国环境科学, 2016, **36**(9): 2591-2598.
- Ren C B, Wu L X, Zhang Y Y, et al. Analyze to the seasonal differences of transport pathways and potential source-zones of Beijing urban PM<sub>2.5</sub> [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(9): 2591-2598.
- [10] Liao T T, Wang S, Ai J, et al. Heavy pollution episodes, transport pathways and potential sources of PM<sub>2.5</sub> during the winter of 2013 in Chengdu (China) [J]. Science of the Total Environment, 2017, **584-585**: 1056-1065.
- Gao J J, Tian H Z, Cheng K, et al. The variation of chemical characteristics of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> and formation causes during two haze pollution events in urban Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2015, **107**: 1-8.
- [12] 王郭臣, 王珏, 信玉洁, 等. 天津 PM<sub>10</sub> 和 NO<sub>2</sub> 输送路径及潜在源区研究 [J]. 中国环境科学, 2014, **34**(12): 3009-3016.
- Wang G C, Wang J, Xin Y J, et al. Transportation pathways and potential source areas of PM<sub>10</sub> and NO<sub>2</sub> in Tianjin [J]. China Environmental Science, 2014, **34**(12): 3009-3016.
- [13] Perrone M R, Becagli S, Orza J A G, et al. The impact of long-range-transport on PM<sub>1</sub> and PM<sub>2.5</sub> at a Central Mediterranean site [J]. Atmospheric Environment, 2013, **71**: 176-186.
- [14] 国家统计局. 河南统计年鉴 2017 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [15] Economist Intelligence Unit. Supersized cities: China's 13 megalopolises [EB/OL]. <https://www.eiu.com/public/topical-report.aspx?campaignid=Megalopolis2012>. 2012-07.
- [16] 中华人民共和国生态环境部. 2013-2016 中国环境状况公报 [EB/OL]. <http://www.zhb.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/>. 2017-06-05.
- Jiang N, Guo Y, Wang Q, et al. Chemical composition characteristics of PM<sub>2.5</sub> in three cities in Henan, central China [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2017, **17**(10): 2367-2380.
- Wang Q, Jiang N, Yin S S, et al. Carbonaceous species in PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in urban area of Zhengzhou in China: seasonal variations and source apportionment [J]. Atmospheric Research, 2017, **191**: 1-11.
- Jiang N, Li Q, Su F C, et al. Chemical characteristics and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> between heavily polluted days and other days in Zhengzhou, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, **66**: 188-198.
- [20] Jiang N, Yin S S, Guo Y, et al. Characteristics of mass concentration, chemical composition, source apportionment of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> and health risk assessment in the emerging megacity in China [J]. Atmospheric Pollution Research, 2018, **9**(2): 309-321.
- Wang J, Geng N B, Xu Y F, et al. PAHs in PM<sub>2.5</sub> in Zhengzhou: concentration, carcinogenic risk analysis, and source apportionment [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, **186**(11): 7461-7473.
- [22] 陈强, 梅琨, 朱慧敏, 等. 郑州市 PM<sub>2.5</sub> 浓度时空分布特征及预测模型研究 [J]. 中国环境监测, 2015, **31**(3): 105-112.
- Chen Q, Mei K, Zhu H M, et al. Study on spatiotemporal variability of PM<sub>2.5</sub> concentrations and prediction model over Zhengzhou City [J]. Environmental Monitoring in China, 2015, **31**(3): 105-112.
- [23] Jiang N, Duan S G, Yu X, et al. Comparative major components and health risks of toxic elements and polycyclic aromatic hydrocarbons of PM<sub>2.5</sub> in winter and summer in Zhengzhou: based on three-year data [J]. Atmospheric Research, 2018, **213**: 173-184.
- [24] Jiang N, Wang K, Yu X, et al. Chemical characteristics and source apportionment by two receptor models of size-segregated aerosols in an emerging megacity in China [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2018, **18**(6): 1375-1390.
- [25] 赵恒, 王体健, 江飞, 等. 利用后向轨迹模式研究 TRACE-P 期间香港大气污染物的来源 [J]. 热带气象学报, 2009, **25**(2): 181-186.
- Zhao H, Wang T J, Jiang F, et al. Investigation into the source of air pollutants to hong kong by using backward trajectory method during the TRACE-P campaign [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2009, **25**(2): 181-186.
- [26] Wang Y Q, Zhang X Y, Draxler R R. TrajStat: GIS-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data [J]. Environmental Modelling & Software, 2009, **24**(8): 938-939.
- [27] Ashbaugh L L, Malm W C, Sadeh W Z. A residence time probability analysis of sulfur concentrations at grand Canyon National Park [J]. Atmospheric Environment, 1985, **19**(8): 1263-1270.
- Polissar A V, Hopke P K, Paatero P, et al. The aerosol at Barrow, Alaska: long-term trends and source locations [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(16): 2441-2458.
- [29] Seibert P, Kromp-Kolb H, Baltensperger U, et al. Trajectory analysis of high-alpine air pollution data [A]. In: Gryning S E, Millán M M (Eds.). Air Pollution Modeling and Its Application X. Boston, MA: Springer, 1994. 595-596.
- [30] Hsu Y K, Holsen T M, Hopke P K. Comparison of hybrid receptor models to locate PCB sources in Chicago [J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(4): 545-562.
- [31] Watson J G. 2002 Critical review-Visibility: science and regulation [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2002, **52**(6): 628-713.
- Wu D, Bi X Y, Deng X J, et al. Effect of atmospheric haze on the deterioration of visibility over the Pearl River Delta [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2007, **21**(2): 215-223.
- Liu X G, Gu J W, Li Y P, et al. Increase of aerosol scattering by hygroscopic growth: observation, modeling, and implications on visibility [J]. Atmospheric Research, 2013, **132-133**: 91-101.
- Fu X X, Wang X M, Hu Q H, et al. Changes in visibility with PM<sub>2.5</sub> composition and relative humidity at a background site in the Pearl River Delta region [J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, **40**: 10-19.
- [33] 马跃先, 孙明明, 张杰, 等. 小波分析在郑州市供暖期 PM<sub>2.5</sub> 浓度相关性分析中的应用 [J]. 环境工程学报, 2015, **9**(8): 3960-3964.
- Ma Y X, Sun M M, Zhang J, et al. Application of wavelet analysis in correlation analysis of PM<sub>2.5</sub> concentration in Zhengzhou City during heating period [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, **9**(8): 3960-3964.
- 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.
- [37] Seinfeld J H, Pandis S N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change [M]. New York: Wiley,

- 1998.
- [38] Chameides W L, Walker J C G. A time-dependent photochemical model for ozone near the ground [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1976, **81**(3): 413-420.
- [39] 邓雪娇, 周秀骥, 吴兑, 等. 珠江三角洲大气气溶胶对地面臭氧变化的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, **41**(1): 93-102.
- Deng X J, Zhou X J, Wu D, et al. Effect of atmospheric aerosol on surface ozone variation over the Pearl River Delta region[J]. *Science China Earth Science*, 2011 **54**(5): 744-752.
- [40] Ran L, Zhao C S, Geng F H, et al. Ozone photochemical production in urban Shanghai, China: analysis based on ground level observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, **114**(D15): D15301.
- [41] Hu X M, Zhang Y, Jacobson M Z, et al. Coupling and evaluating gas/particle mass transfer treatments for aerosol simulation and forecast [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, **113**(D11): D11208.

## 《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2018年11月1日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单。《环境科学》连续17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

Cause and Effect Evaluation of PM <sub>2.5</sub> During Three Red Alerts in Beijing from 2015 to 2016 .....	LÜ Zhe, WEI Wei, ZHOU Ying, et al. ( 1 )
Effects of Emission Reductions of Key Sources on the PM <sub>2.5</sub> Concentrations in the Yangtze River Delta .....	YU Yan, WANG Ze-hua, CUI Xue-dong, et al. ( 11 )
Health Benefit Analyses of the Clean Air Action Plan Implementation in Shanghai .....	DAI Hai-xia, AN Jing-yu, LI Li, et al. ( 24 )
Monitoring and Analysis of the Spatio-temporal Change Characteristics of the PM <sub>2.5</sub> Concentration Over Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Regions Based on Remote Sensing .....	CHEN Hui, LI Qing, LI Ying, et al. ( 33 )
Applicability of MODIS C006 Aerosol Products in a Typical Environmental Area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region .....	WANG Hai-lin, LIU Qiong, CHEN Yong-hang, et al. ( 44 )
Impact of Meteorological Factors on the Ozone Pollution in Hong Kong .....	ZHAO Wei, GAO Bo, LIU Ming, et al. ( 55 )
Transport Characteristics of PAN and O <sub>3</sub> in the Lower Atmosphere of the Boundary Layer in Tianjin in Summer .....	YAO Qing, MA Zhi-qiang, LIN Wei-li, et al. ( 67 )
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM <sub>2.5</sub> Chemical Components in Chengdu in Winter .....	WU Ming, WU Dan, XIA Jun-rong, et al. ( 76 )
Transport Pathways and Potential Sources of PM <sub>2.5</sub> During the Winter in Zhengzhou .....	DUAN Shi-guang, JIANG Nan, YANG Liu-ming, et al. ( 86 )
Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Carbon/Nitrogen in PM <sub>2.5</sub> During Spring in Changzhou .....	LI Qing, HUANG Wen-qian, MA Shuai-shuai, et al. ( 94 )
Pollution Characteristics and Emission Factors of VOCs from Vehicle Emissions in the Tianjin Tunnel .....	SUN Lu-na, LIU Yan, ZHAO Jing-bo, et al. ( 104 )
Size Distribution and Carbon Component Characteristics of Atmospheric Particulate Matter from Motor Vehicles .....	MEI De-qing, ZHU Zong-ning, SUN Tian-shuo, et al. ( 114 )
Conversion Characteristics of Combustible Particles from Coal-fired Flue Gas in WFGD and WESP .....	YANG Liu, ZHANG Bin, WANG Kang-hui, et al. ( 121 )
Particle Removal Characteristics of an Ultra-low Emission Coal-fired Power Plant .....	RUAN Ren-hui, TAN Hou-zhang, DUAN Yu-feng, et al. ( 126 )
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Fugitive Dust Emission of Building Sites in Beijing .....	ZHANG Li-kun, LI Ling-jun, JIANG Lei, et al. ( 135 )
Simultaneous Removal of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins/dibenzofurans, Polychlorinated Biphenyls, and Polychlorinated Naphthalenes From Flue Gases From Coke Gas Burning Using Selective Catalytic Reduction Equipment .....	REN Mei-hui, FAN Yun, WANG Sheng, et al. ( 143 )
Space-Time Characteristics and Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation in the Gulang River Basin .....	GUI Juan, LI Zong-xing, FENG Qi, et al. ( 149 )
Spatial Distribution and Degradation of CDOM in the Minjiang River in Summer .....	CHENG Qiong, ZHUANG Wan-e, WANG Hui, et al. ( 157 )
Parallel Factor Analysis of Fluorescence Excitation Emission Matrix Spectroscopy of CDOM from the Mid-culture Period of Shrimp Ponds in a Subtropical Estuary .....	ZHU Ai-ju, SUN Dong-yao, TAN Ji, et al. ( 164 )
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter With Different Relative Molecular Weight from Rainwater From Summer and Autumn in the Zhoucun Reservoir Based on UV-Vis and EEMs .....	ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, et al. ( 172 )
Characteristics and Fouling Potential of Dissolved Organic Matter in a Stratified Source Water Reservoir .....	LI Kai, WANG Xiao-dong, HUANG Ting-lin, et al. ( 185 )
Water-Air Interface CO <sub>2</sub> Exchange Flux of Typical Lakes in a Mountainous Area of the Western Chongqing and Their Influencing Factors .....	LUO Jia-chen, NI Mao-fei, LI Si-yue ( 192 )
Reconstruction of Water Hyperspectral Remote Sensing Reflectance Based on Sparse Representation and Its Application .....	LI Yuan, LI Yun-mei, GUO Yu-long, et al. ( 200 )
Nitrification Rates and Pollution Characteristics of Sediments with Different Geomorphic Features in the Shiwuli Stream, Chaohu Lake Basin .....	LI Ru-zhong, QUE Feng-xiang, XIONG Hong-bin, et al. ( 211 )
Distribution and Bioavailability of Phosphorus in Surface Sediments in Megalopolis; A Case Study of Chengdu .....	DING Yao, OUYANG Li-li, SHI Qing, et al. ( 219 )
Distribution and Fluxes of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Middle Reaches of the Yellow River ( Weinan-Zhengzhou Section ) .....	LI Qi-lu, CHENG Xiang-hui, ZHAO Zhen, et al. ( 228 )
Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Karst Groundwater System in a Strongly Industrial City .....	MAO Ying, KONG Xiang-sheng, LI Cheng-zhan ( 239 )
Pollution Characteristic and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Groundwater of Shen-Fu New City in the Hunhe River Basin .....	ZHANG Shi-chao, YAO Hong, XIANG Xin-xin, et al. ( 248 )
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Wastewater-Receiving Rivers in Beijing .....	FU Lu-jing, LI Yi-bing, QIAO Meng, et al. ( 256 )
Influence of the Coagulation Mechanism on the Coagulation Performances Using New Composite Coagulants; Role of the Raw Water Characteristics .....	QU Jiang-dong, XU Hui, XU Jian-kun, et al. ( 263 )
Indirect Photodegradation of Sulfamethoxazole in Water .....	LI Cong-he, CHE Xiao-wei, BAI Ying, et al. ( 273 )
Fabrication of the Heterojunction Photocatalyst MoS <sub>2</sub> /BiOI and Its Investigation of Its Photocatalytic Reduction and Oxidation Activities .....	ZHANG Liang, ZHAO Chao-cheng, GAO Xian-yao, et al. ( 281 )
Nanoscale Zero-valent Copper-Activated Molecular Oxygen for the Degradation of Enrofloxacin in Water .....	NI Yong-jiong, CHENG Yong-qing, XU Meng-yuan, et al. ( 293 )
Adsorption of Cr( VI) in Water by Maifanite Modified with Different LDHs Coatings .....	ZHANG Xiang-ling, DENG Li-chu, FANG Chen-jia, et al. ( 300 )
Preparation of the Silane Monolayer on Magnetite Nanoparticles and Its Performance with Respect to Phosphate Removal from Water .....	XING Ming-chao, XIE Qiang, CHEN Shou-hui, et al. ( 310 )
Optimization of Dyeing Wastewater Treatment with New Eco-friendly Polysilicate Ferromanganese .....	TANG Li-peng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, et al. ( 318 )
Sulfate Reduction and Microbial Community of Autotrophic Biocathode in Response to Externally Applied Voltage .....	HU Jia-ping, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, et al. ( 327 )
Effect of Carbon Sources on the Accumulation of Endogenous Polymers and Denitrification in the O/A-F/F Mode .....	CUI You-wei, JIN Chang-jin, WANG Hao-han, et al. ( 336 )
Effect of the Influent C/P Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of the SNEDPR System .....	ZHEN Jian-yuan, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, et al. ( 343 )
Effect of Different Sludge Retention Time ( SRT ) Operations on the Nutrient Removal Characteristics of a SNEDPR System .....	WANG Xiao-xia, ZHEN Jian-yuan, ZHAO Ji, et al. ( 352 )
Denitrification and Phosphorus Removal from Low C/N Urban Sewage Based on a Post-Partial Denitrification AOA-SBR Process .....	GONG Xiu-zhen, YU De-shuang, YUAN Meng-fei, et al. ( 360 )
Startup and Stabilization of Nitrosation in an Anoxic-aerobic Continuous-flow Reactor with Granules .....	LI Dong, GUO Yue-zhou, LAO Hui-me, et al. ( 369 )
Startup Strategies for the SNAD Granular Sludge Process at Low Temperature .....	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, et al. ( 376 )
Effect of the Sampling Scale and Number on the Heterogeneity of Soil Respiration in a Mixed Broadleaf-conifer Forest .....	YAN Jun-xia, SUN Qi, LI Jun-jian, et al. ( 383 )
Effects of the Crop Rotation on Greenhouse Gases from Flooded Paddy Fields .....	FENG Xi, JIANG Chang-sheng, PENG Xiao-le, et al. ( 392 )
Response of the Soil N <sub>2</sub> O Emission and Ammonia-oxidizing Microorganism Community to the Maize Straw Return with Reducing Fertilizer in Purple Soil .....	HUANG Rong, GAO Ming, WANG Ying-yan, et al. ( 401 )
Community Structure of CO <sub>2</sub> -fixing Soil Bacteria from Different Land Use Types in Karst Areas .....	ZHANG Shuang-shuang, JIN Zhen-jiang, JIA Yuan-hang, et al. ( 412 )
Composition and Predictive Functional Analysis of Rhizosphere Bacterial Communities in Riparian Buffer Strips in the Danjiangkou Reservoir, China .....	SUN Feng, TIAN Wei, ZHANG Fei, et al. ( 421 )
Migration and Transformation of Adsorbed Arsenic Mediated by Sulfate Reducing Bacteria .....	JIA Qian-qian, LI Wei, WANG Ya-nan, et al. ( 430 )
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Farmland Soil Around a Lead and Zinc Smelter .....	WANG Yang-yang, LI Fang-fang, WANG Xiao-yan, et al. ( 437 )
Effect of a Mining and Smelting Plant on the Accumulation of Heavy Metals in Soils in Arid Areas in Xinjiang .....	YANG Wei-guang, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping ( 445 )
Assessment of the Speciation and Pollution of Heavy Metals in Paddy Soils from the Jialong River Basin .....	LIN Cheng-q, HUANG Hua-bin, HU Gong-ren, et al. ( 453 )
Characteristics of Stable Mercury Isotopic Compositions in the Food Web of the Caohai Lake .....	XU Yi-yuan, HE Tian-rong ( 461 )
Interaction of Cd and Zn Affecting the Root Morphology and Accumulation of Heavy Metals in <i>Sedum aizoon</i> .....	GUO Jun-me, YANG Jun-xing, YANG Jun, et al. ( 470 )
Effects of Different Concentrations of Lanthanum on the Growth and Uptake of Pb by Maize Grown Under Moderate Lead Stress .....	WANG Qi-fan, GUO Wei, CHANG Qing, et al. ( 480 )
Distribution and Bioaccumulation Characteristics of Cadmium in Fish Species from the Longjiang River in the Guangxi Autonomous Region .....	WANG Jun-neng, ZHAO Xue-min, HU Guo-cheng, et al. ( 488 )
Influence of Six Digestion Methods on the Determination of Polystyrene Microplastics in Organisms Using the Fluorescence Intensity .....	ZOU Ya-dan, XU Qing-qing, ZHANG Ge, et al. ( 496 )
Preparation of a Nutritional Slow-release Packing Material with Function Microorganisms and Its Characteristics Evaluation .....	FENG Ke, XU Dan-hua, CHENG Zhuo-wei, et al. ( 504 )