

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

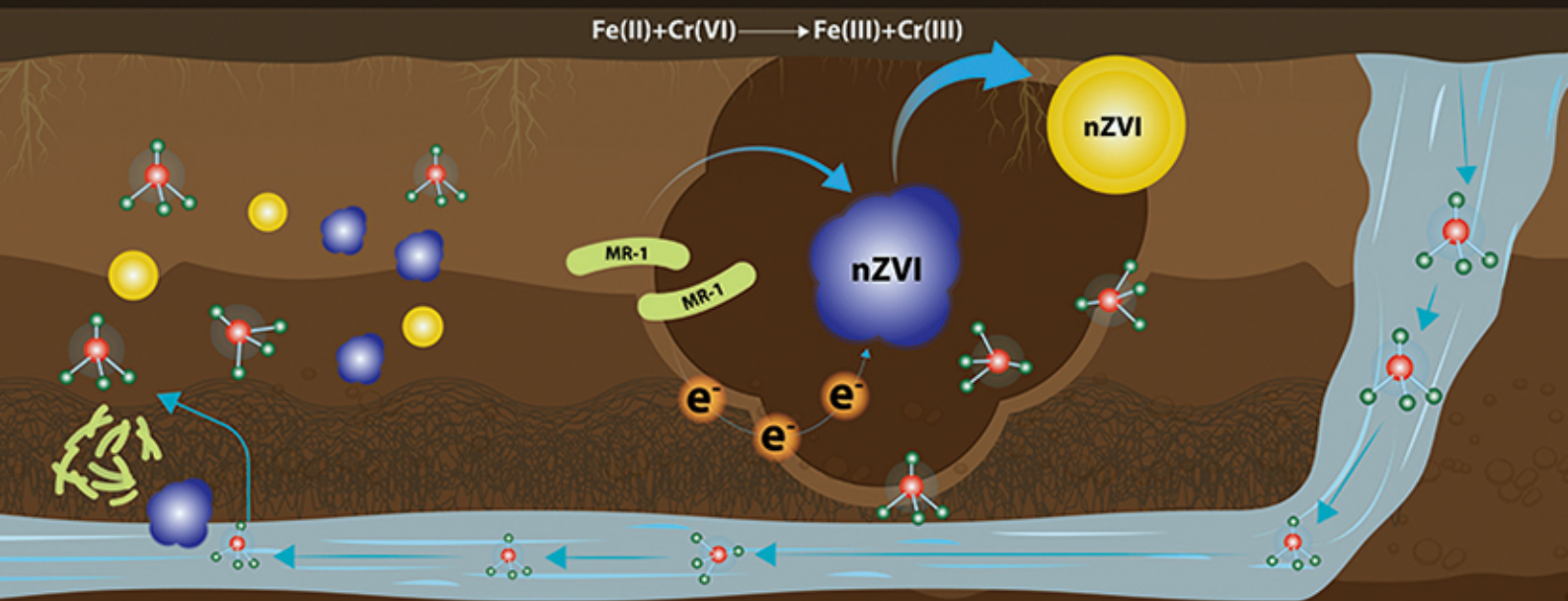
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制

廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年9月

第42卷 第9期
Vol.42 No.9

目次

北京市 2014~2020 年 PM _{2.5} 和 O ₃ 时空分布与健康效应评估	陈菁, 彭金龙, 徐彦森 (4071)
京津冀地区高分辨率 PM _{2.5} 浓度时空变化模拟与分析	杨晓辉, 宋春杰, 范丽行, 张凌云, 魏强, 李夫星, 王丽艳, 王卫 (4083)
京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对 PM _{2.5} 污染影响	邵玄逸, 王晓琦, 钟巍盛, 王瑞鹏 (4095)
太行山两侧污染物传输对横谷城市气溶胶的影响分析	王雁, 郭伟, 闫世明, 裴坤宁, 李明明, 陈二萍 (4104)
嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析	张颖龙, 李莉, 吴伟超, 吕升, 秦阳, 祝新明, 高晋徽, 唐倩, 夏峰 (4116)
基于机器学习算法的新冠疫情管控对河南省空气质量影响的模拟分析	魏煜, 徐起翔, 赵金帅, 张瑞芹 (4126)
新乡市大气 PM _{2.5} 载带金属元素季节分布、来源特征与健康风险	刘桓嘉, 贾梦珂, 刘永丽, 赵艺洁, 郑爱华, 刘恒志, 徐肃阳, 肖晴晴, 苏晓燕, 任言 (4140)
黄渤海气溶胶中砷的分布特征和季节变化	袁帅, 王艳, 刘汝海, 种习习, 刘晓雨, 邵龙 (4151)
天津市 2020 年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源	李立伟, 肖致美, 杨宁, 蔡子颖, 闫斌峰, 元洁, 白宇, 郑乃源, 唐邈 (4158)
中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素	何超, 慕航, 杨璐, 王丹璐, 邱彦峰, 叶志祥, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 洪松 (4168)
乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究	张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 刘晓, 郭文凯, 李光耀, 陈梅 (4180)
珠江三角洲海岸背景区大气 VOCs 污染特征与来源	云龙, 李成柳, 张明棣, 何龙, 郭键锋 (4191)
永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析	孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 王艺璇, 裴宏伟, 沈彦军 (4202)
汉江中下游水质时空变异与驱动因素识别	程兵芬, 张远, 夏瑞, 张楠, 张新飞 (4211)
环境持久性药物在江苏省地表水中的污染水平、分布特征及生态风险评估	赵美美, 范德玲, 古文, 汪贞, 梁梦园, 刘济宁, 张志 (4222)
柳江流域河流溶解态重金属时空分布及污染评价	张婉军, 辛存林, 于爽, 刘齐, 曾鹏 (4234)
雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价	师环环, 潘羽杰, 曾敏, 黄长生, 侯清芹, 皮鹏程, 彭红霞 (4246)
龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评价	谢浩, 梁永平, 李军, 邹胜章, 申豪勇, 赵春红, 王志恒 (4257)
硫氧同位素解析典型岩溶地下河流域硫酸盐季节变化特征和来源	任坤, 潘晓东, 兰干江, 彭聪, 梁嘉鹏, 曾洁 (4267)
包头南海湿地磷形态及污染源定量识别	拜亚红, 钱晨歌, 袁思静, 谢子嫣, 来凌子, 张敏, 刘颖, 苗春林 (4275)
城市新城区公园沟塘沉积物磷释放风险及影响因素分析	李如忠, 宋敏, 杨继伟 (4287)
水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析	齐冉, 张灵, 杨帆, 颜昌宙 (4296)
锰砂人工湿地对污染物的强化去除	马权, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (4304)
4 种典型沉水植物对去除磷污染底泥的应用效果	陶理, 王沛芳, 袁秋生, 王洵, 胡斌 (4311)
输水情景下白洋淀好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应	周石磊, 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 于明会, 姚波, 崔建升, 罗晓 (4319)
木屑生物炭在雨水径流中的氮磷淋出和吸附特性	孟依柯, 王媛, 汪传跃 (4332)
海州湾潮间带沙蚕对沉积物微塑料的指示作用	王嘉旋, 宋可心, 孙一鑫, 方涛, 李瑾祯, 张涛, 冯志华 (4341)
纳米二氧化钛与镉对斜生栅藻 (<i>Scenedesmus obliquus</i>) 生长的拮抗效应及其作用机制	王璞, 赵丽红, 朱小山 (4350)
螺旋霉素废水处理过程中菌群结构、水质特征及抗性基因之间关系分析	武彩云, 李慧莉, 覃彩霞, 佟娟, 魏源送 (4358)
整合铁对厌氧铁氨氧化脱氮效能及微生物群落的影响	廖宏燕, 宋诚, 万柳杨, 时绍鹏, 王兴祖 (4366)
溶解氧对低碳源城市污水处理系统脱氮性能与微生物群落的影响	池玉蕾, 石炬, 任童, 王晓昌, 金鹏康 (4374)
间歇梯度曝气下缩短 SRT 强化短程 SNEDPR 系统脱氮除磷	张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张杰 (4383)
生物膜系统中部分反硝化实现特性	于莉芳, 张兴秀, 张琼, 王晓玉, 彭党聪, 张日霞 (4390)
厌氧推流进水对反硝化除磷好氧颗粒污泥系统的影响	李冬, 曹思雨, 王琪, 张杰 (4399)
不同好氧/缺氧时长联合分区排泥优化生活污水短程硝化反硝化除磷颗粒系统运行	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (4406)
中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的 Meta 分析	张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 杨兰芳, 赵永存, 黄标 (4414)
青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价	杜昊霖, 王莺, 王劲松, 姚玉璧, 周悦, 刘晓云, 芦亚玲 (4422)
电子垃圾拆解区土壤-农作物系统中镉元素的空间分布特征及其风险评价	张璐瑶, 赵科理, 傅伟军 (4432)
改性生物炭特性表征及对冶炼厂周边农田土壤铜镉形态的影响	王鑫宇, 孟海波, 沈玉君, 王佳锐, 张曦, 丁京涛, 周海宾, 李春燕, 程琼仪 (4441)
组配改良剂联合锌肥对土壤-水稻系统镉迁移转运的影响	周坤华, 周航, 王子钰, 刘雅, 刘佳伟, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4452)
不同结构改良剂对铜镉污染土壤水稻生长和重金属吸收的影响	魏玮, 李平, 郎漫 (4462)
1 株草螺属植物内生菌 R-13 的分离鉴定及对龙葵吸收土壤镉的影响	鹿杰, 刘月敏, 黄永春, 王常荣, 刘斌, 刘仲齐, 黄益宗, 黄雁飞, 张长波 (4471)
不同地区土壤古菌群落对重金属污染响应	李雨桐, 杨杉, 张艺, 范例, 刘坤, 张晟 (4481)
高通量测序分析黄土高原退耕还林区土壤细菌群落特征	刘晓华, 魏天兴 (4489)
餐厨垃圾生物发酵液对黄土丘陵区土壤质量的影响试验	邵立明, 任俊达, 吕凡, 章骅, 何晶晶 (4500)
秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系	马震菲, 胡汗, 李益, 郭鑫鑫, 任成杰, 赵发珠 (4510)
电活性微生物激活生物炭/零价铁协同钝化 Cr(VI) 及机制	廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚 (4520)
降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响	蒿廉伊, 张丽华, 谢忠奎, 赵锐锋, 王军锋, 郭亚飞, 高江平 (4527)
氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米 N ₂ O 排放的影响	符佩娇, 吉恒宽, 何秋香, 汤水荣, 王鸿浩, 伍延正, 孟磊 (4538)
负载 NH ₄ ⁺ -N 生物炭对土壤 N ₂ O-N 排放和 NH ₃ -N 挥发的影响	马晓刚, 何建桥, 陈玉蓝, 李德天, 刘川, 董建新, 郑学博 (4548)
微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响	张秀玲, 鄢紫薇, 王峰, 王玺, 徐晗, 胡荣桂, 严昶, 林杉 (4558)
1985~2019 年中国全氟辛酸酯基化合物的动态物质流分析	王佳钰, 陈景文, 唐伟豪, 崔蕴晗, 王中钰, 宋国宝, 陈伟强 (4566)
《环境科学》征订启事(4201) 《环境科学》征稿简则(4340) 信息(4382, 4537, 4565)	

太行山两侧污染物传输对横谷城市气溶胶的影响分析

王雁, 郭伟, 闫世明*, 裴坤宁, 李明明, 陈二萍

(山西省气象科学研究所, 太原 030002)

摘要: 利用 2017 ~ 2019 年太行山横谷城市阳泉 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 逐时浓度资料 and 对应时刻风速风向数据, 结合 HYSPLIT 后向轨迹模型通过聚类分析、潜在源贡献因子和浓度权重轨迹方法分析了横谷城市气流输送特征及对阳泉市气溶胶的影响, 并进一步探讨了太行山两侧大气污染物的交换特征。阳泉市气溶胶日变化为单峰单谷型, 冬季最高值出现在 10:00 ~ 11:00, 其他季节多在 09:00, 最小值均在 15:00 ~ 16:00; 月际变化呈 1 月最高、8 月最低。受横谷地形影响, 地面风向以偏东风和偏西风频率最高; 除小风天气外, 春秋季节偏西风引起的沙尘天气和冬季偏东风输送也会引起阳泉市气溶胶浓度升高; 后向轨迹结合污染特征显示, 各季节污染轨迹占比为春季 26.2%、秋季 36.4% 和冬季 33.7%, 主要分布在阳泉的西南和东南区域, 冬季在东北区域也有分布; 山脉两侧均存在显著的细颗粒物传输, 而起源或途经太行山西侧的轨迹粗颗粒物输送亦相对较多; 污染轨迹中偏西气流输送对 PM_{10} 超标率影响更大, 偏东气流则主要影响 $PM_{2.5}$ 的超标率。不同季节阳泉市气溶胶主要污染潜在源区存在差异, 春季为西南和东南两区域; 秋季为西南及偏南区域, 冬季主要位于偏南和偏东方向区域, 山西东南部及与河南北部交界区域是主要的污染贡献源区, 太行山两侧通过并距通道进行大气污染物的相互传输过程显著, 其中东向西的 $PM_{2.5}$ 传输影响更显著。

关键词: 太行山; 横谷城市; 气溶胶; 输送通道; 后向轨迹

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)09-4104-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202102142

Influence of Pollutant Transport from Both Sides of the Taihang Mountains on Cross-Valley Urban Aerosols

WANG Yan, GUO Wei, YAN Shi-ming*, PEI Kun-ning, LI Ming-ming, Chen Er-ping

(Shanxi Province Institute of Meteorological Sciences, Taiyuan 030002, China)

Abstract: Based on hourly concentration data of PM_{10} and $PM_{2.5}$ from 2017 to 2019 and wind speed and direction data at the corresponding times in Yangquan, an urban valley of the Taihang Mountains, the characteristics of air transport in a cross-valley urban area and their influence on aerosols in Yangquan were analyzed using the HYSPLIT model, cluster analysis, and the potential source contribution factor and concentration weight trajectory methods. The pollutant transport characteristics on the east and west sides of the Taihang Mountains were evaluated. The diurnal variation of the aerosols showed a single peak and single valley, with continuous improvements in aerosol concentration from evening to the morning of the next day. The maximum aerosol concentration occurs at 10:00-11:00 in winter and at 09:00 in other seasons, whereas the minimum value occurs at 15:00-16:00. The monthly mean aerosol concentration in Yangquan was highest in January and lowest in August, and PM_{10} was also high in March and April. The most frequent surface wind directions in Yangquan are easterly and westerly due to the topography of the cross valley. The average concentrations of aerosols were highest in the calm wind weather. Furthermore, the dust weather caused by the westerly wind in spring and autumn and the easterly transport in winter also causes an increase in aerosol concentration in Yangquan. The backward trajectories in combination with the pollution characteristics showed that 26.2% of the pollution trajectories are in spring, 36.4% are in autumn, and 33.7% are in winter, and that these are mainly distributed in the southwest and southeast of Yangquan and also in the northeast in winter. There was significant fine particle transport on both sides of the mountains, and the trajectories originating from or passing through the west side of the Taihang Mountains also transport coarse particles. As indicated by the pollution trajectory, the westerly air transport has an impact on PM_{10} in excess of the standard rate. The easterly transport has larger noise and mainly affects the exceedance rate of $PM_{2.5}$. The main potential source areas of aerosol pollution in Yangquan differ in different seasons. The potential source areas are to the southwest and southeast of Yangquan in spring, the southwest and south of Yangquan in autumn, and the south and east of Yangquan in winter. The areas with high PSCF and CWT in $PM_{2.5}$ were in the southeast region, but those for PM_{10} were in the southwest region. The area southeast of Shanxi and the border area north of Henan are the main source areas. Based on the influence of aerosol pollution transmission in Yangquan, the cross-valley urban area is affected simultaneously by the areas east and west of the Taihang Mountains, especially by $PM_{2.5}$ transport from east to west.

Key words: Taihang Mountain; cross-valley urban; aerosol; conveying channel; backward trajectories

中国北方地区频繁发生的区域性霾天气对人体健康^[1-3]和公众活动^[4-5]造成了很大的影响,引起

收稿日期: 2021-02-23; 修订日期: 2021-03-16

基金项目: 山西省自然科学基金项目(201601D011084, 201901D111465); 山西省气象局重点项目(SXKZDDQ20185105, SXKZDDW20205203)

作者简介: 王雁(1972~), 女, 高级工程师, 主要研究方向为大气环境, E-mail: qksy@126.com

* 通信作者, E-mail: qksym@126.com

了全社会的广泛关注. 污染天气成因复杂, 往往是大气污染物的大量排放^[6]、不利气象条件^[7]、地形条件^[8]、二次转化^[9]和区域传输^[10]共同作用的结果, 因此, 污染天气多呈现复合型 and 区域型的特征^[11]. 而针对污染天气治理的政策建议中, 开展区域联防联控则是最多被提及的控制对策之一^[12,13], 可见区域传输对各城市的大气质量均有显著影响, 也是出现大范围重污染天气的重要原因. 不同地区受大气污染物输送影响不同, 薛文博等^[14]分析了全国各省市 $PM_{2.5}$ 及主要组分受外来源的贡献比例, 海南 $PM_{2.5}$ 年均浓度受省外源贡献最高为 71%, 京津冀地区的北京、天津和石家庄分别为 37%、42% 和 33%, 汾渭平原的山西和陕西年均均为 31%. 不同时期区域传输产生的影响也有差异, 以北京为例, 秋冬季受西南气流输送影响, 易发生 $PM_{2.5}$ 为主的污染天气^[15]; 春季则受偏北气团影响, 冷空气将内蒙和甘肃等地的沙尘输送到北京, 叠加本地霾污染形成复合型污染天气^[16,17]. 区域输送同时受地形影响, 我国 $PM_{2.5}$ 污染最严重的两个区域京津冀地区和汾渭平原以太行山相隔, 东侧的“邯郸-邢台-石家庄-保定-北京”是影响北京最典型的传输通道^[18], 西侧沿着汾河谷地向北输送是引起太原重污染天气的主要原因之一^[19,20]. 太行山大部区域海拔在 1 200 m 以上, 天然对东西两侧的污染物进行了隔离, 但太行山存在多条东西向横谷 (太行八陉)^[21~22], 为太行山两侧污染物的局部交换提供了通道. 井陉是联通太原盆地

和华北平原最主要的通道, 太原盆地北端的气旋环流与盆地中南部的偏南气流在井陉通道辐合向东输送^[23], 而河北太行山山前出现的山风与偏南风在保定和石家庄等地形成辐合^[24], 在偏东风作用下沿着井陉通道向西输送.

本文以该通道核心城市阳泉为研究对象, 运用地面风速风向和后向轨迹模型等气流传输方法, 分析井陉横谷的气流输送特征以及对阳泉市气溶胶浓度的影响, 进而了解特殊地形对大气污染物传输的作用以及两大污染地区的污染物输送特征, 以期为跨区域大气联防联控提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

井陉通道位于太行山中段, 是太行八陉第五陉, 处在上党高地北部的山地与忻定盆地南沿的系舟山之间, 海拔最低处仅 350 m, 阳泉市地处井陉通道内太原、石家庄两个省会城市的中间位置 (图 1), 是以煤炭、铝矾土和燃煤发电工业为主的重工业城市, 本地大气污染物的排放量较大, 霾天气频发^[25]. 根据中国生态环境部发布的近两年全国城市环境空气质量报告, 阳泉市的环境空气质量综合指数评价综合排名靠后, 自 2018 年 6 月参加全国重点城市排名以来, 平均排名为 140 名 (共 168 个城市, 截至 2020 年 5 月), 大气污染状况不容乐观^[25].

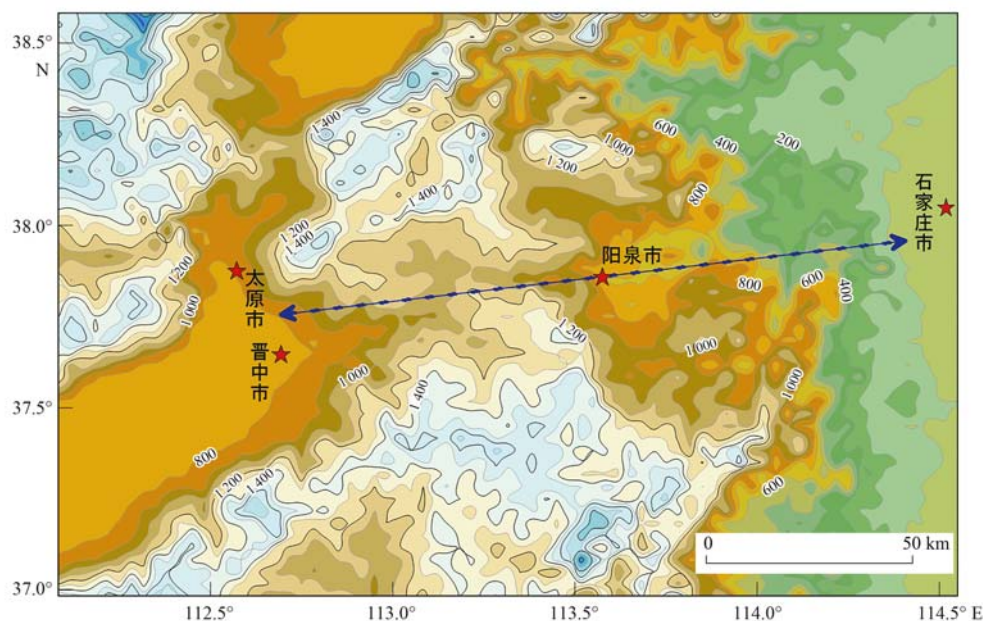


图 1 井陉通道及周边地区地形示意

Fig. 1 Topographic map of the Jingxing passageway and its surrounding areas

1.2 后向轨迹模式及聚类方法

本研究采用 HYSPLIT4 模式来分析阳泉市大气污染物的来源轨迹, 该模式被广泛应用于大气输送

研究及污染过程分析中^[26~28]. 本研究的后向轨迹计算起始高度选取为 300 m, 轨迹运行时间选择为 72 h, 时间间隔取为 1 h, 聚类分析基于轨迹风向角度的

二分 K 均值法^[20]. 用于后向轨迹模式计算的气象场资料(2017 年 1 月至 2019 年 12 月)为美国国家环境预报中心(NCEP)提供的全球资料同化系统(global data assimilation system, GDAS)数据, 每日 4 个时次, 即 00:00、06:00、12:00 和 18:00 UTC, 水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$. 同时收集阳泉市 2017~2019 年逐时 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度资料以及对应时刻的地面风向风速数据, 环境和气象数据分别来源于山西省生态环境监测中心和山西省气象信息中心.

1.3 潜在源贡献因子分析法和浓度权重轨迹分析法

潜在源贡献因子分析法(potential source contribution function, PSCF)和浓度权重轨迹分析法(concentration weighted trajectory method, CWT)常被用于定位潜在污染源区位置并定量给出污染贡献大小. PSCF 是基于条件概率函数发展而来的一种方法, 基于气流轨迹分析来识别可能源区, 通过结合气团轨迹和某要素值(如污染物浓度值等)来给出可能的污染排放源方位; CWT 是一种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的方法, 可以定量给出每个网格的平均权重浓度, PSCF 和 CWT 的计算公式参见文献[20].

2 结果与讨论

2.1 阳泉市气溶胶污染特征分析

阳泉市为京津冀“2+26”城市之一, 气溶胶污染严重. 图 2 给出了阳泉市基于 2017~2019 年逐时 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度的日变化和月际变化特征. 结果显

示, 阳泉市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度有相似的日变化特征, 冬季最高值出现较晚在 10:00~11:00, 其他季节多在 09:00, 均在 15:00~16:00 降到最低; 但阳泉市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度均在夜间呈持续上升状态, 即两种污染物浓度的日变化均表现为单峰单谷型, 同太原^[29]、北京^[30]和石家庄^[31]等城市双峰分布不同, 阳泉夜间未出现污染物的下降, 这可能与污染物的输送有关. 进一步分析 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 在不同时段的积累特征显示, $PM_{2.5}$ 在 16:00~21:00 的积累增加速度快于 PM_{10} , 这可能源于晚高峰期间二次气溶胶的快速增加^[32,33], 午夜后 PM_{10} 的积累上升过程则较 $PM_{2.5}$ 显著, 表明不同时间段两种污染物的来源有所差异, PM_{10} 的来源较 $PM_{2.5}$ 更广泛.

从逐月变化来看, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度均在 1 月最高, 此后逐渐下降, 其中 PM_{10} 浓度在 3 月和 4 月仍保持在较高水平, 可能与春季大风沙尘影响有关, $PM_{2.5}$ 浓度则表现为持续下降的特征, 二者均在 8 月达到全年最低. 从各月的气溶胶浓度日变化情况看, PM_{10} 小时浓度在 4 月的 08:00~09:00 最高, $PM_{2.5}$ 小时浓度在 1 月的 11:00 最高, 小时浓度最低值均出现在 8 月的 16:00. 冬季 PM_{10} 浓度在 1 d 内高浓度时段维持较长, 并延续到春季的 3~4 月, 其最高小时浓度 1 月出现在 10:00~11:00, 随着逆温层破坏时间逐渐提前, 2~4 月最高小时浓度出现时段也逐渐提前, 全天高浓度维持时间缩短. $PM_{2.5}$ 浓度也类似, 但从春季开始 1 d 内高浓度时段明显缩短, 秋冬季再次增长.

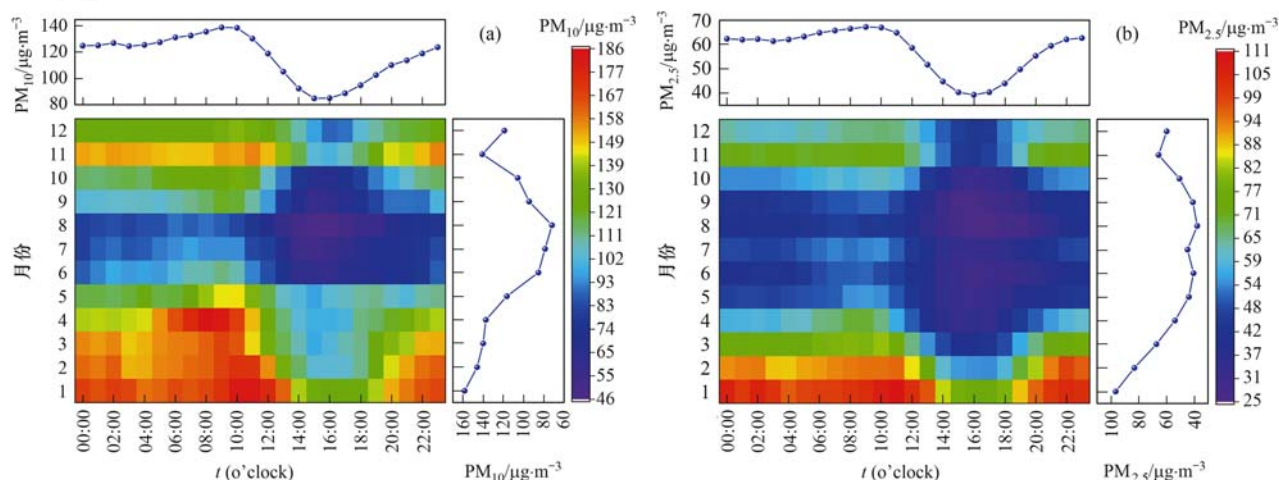


图 2 2017~2019 年阳泉市气溶胶月、日变化

Fig. 2 Diurnal and monthly variations of aerosols in Yangquan from 2017 to 2019

2.2 近地面风对气溶胶污染的影响

为了了解阳泉市地面气流特征, 图 3 给出了阳泉市 2017~2019 风频玫瑰图并叠加了 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的浓度. 从中可以看出, 阳泉市近地面风受地形影响明显, 东风频率最高, 其次是西北风, 冬季西风频率

也较高. 不同风速风向气溶胶浓度差异显著. 小风($<2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 下同)各个季节都出现了 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度值较高的现象, 冬季小风下 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的浓度分别为 $176.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $110.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 可见小风天气易造成阳泉气溶胶的累积. 冬季偏东风下 PM_{10}

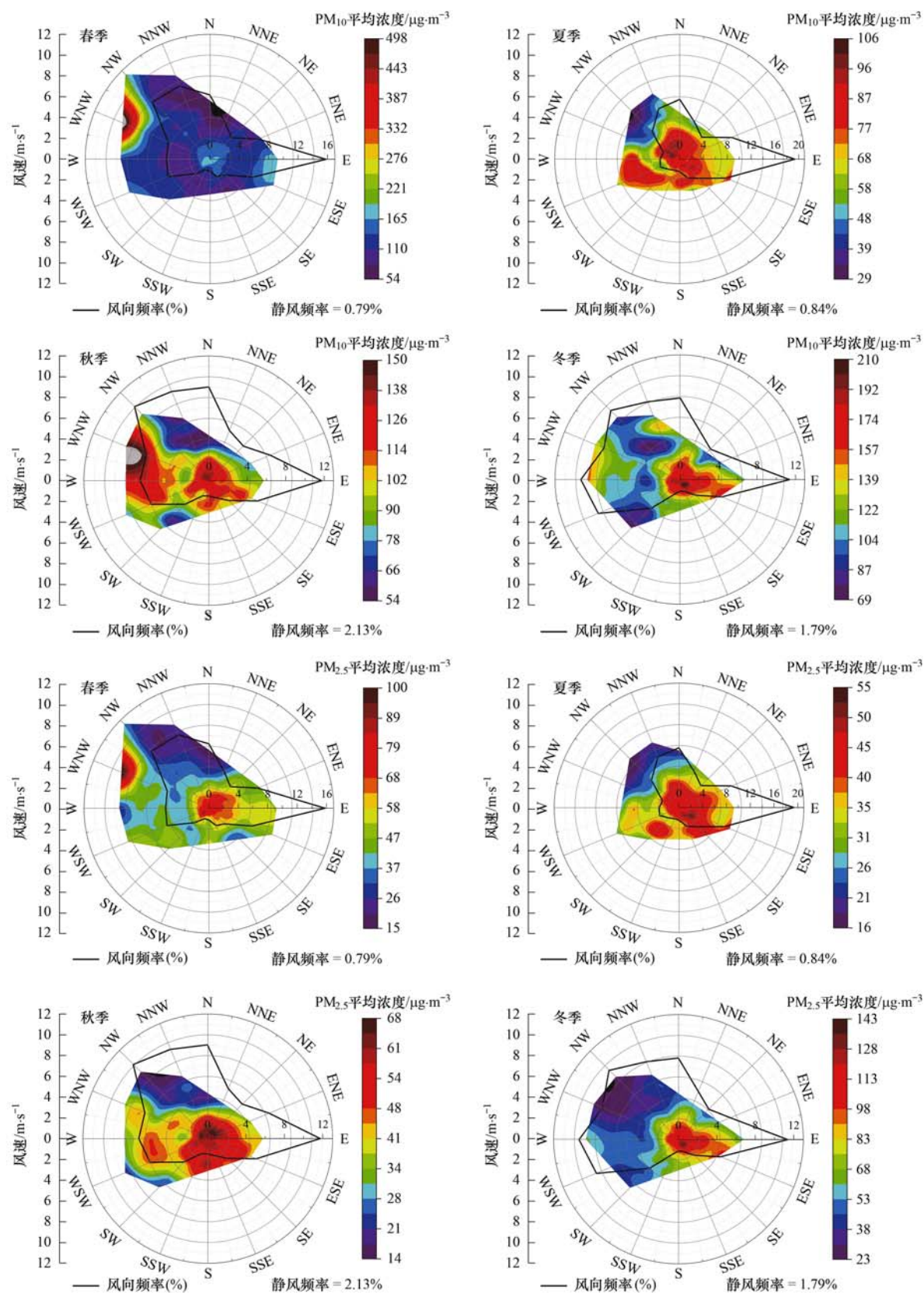


图3 2017~2019年阳泉市风向风速与PM₁₀和PM_{2.5}浓度关系

Fig. 3 Relationships between wind direction and wind speed and PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations in Yangquan from 2017 to 2019

和PM_{2.5}浓度均高于其他风向,风速在2~4 m·s⁻¹时PM_{2.5}平均浓度仍超过90 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,表明偏东气流中携带有较高浓度的气溶胶,体现出了传输过程对阳泉气溶胶污染的影响.春秋季大于6 m·s⁻¹西偏北

风下也会出现气溶胶浓度偏高,春季大于5 m·s⁻¹偏东风下PM₁₀浓度也接近小风浓度,原因可能是春秋季风速较大时会引起沙尘天气沿着并径横谷地区从东西两个方向进行传输,导致该处粒径气溶胶浓

度升高. 总的来说, 北偏西风下阳泉市两种气溶胶浓度均较低, 污染物清除效果明显.

2.3 输送路径分析

采用后向轨迹模式计算了 2017 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日到达阳泉市的逐时后向轨迹. 采用二分 K 均值法对其进行聚类, 得到阳泉市四季的聚类后向轨迹, 表示气溶胶输送的主要通道, 见图 4. 轨迹的路线和方向表示气团在到达计算点(阳泉市)所经过的地区, 根据其长短可以判断出气团移动的速度, 长轨迹对应移动快速的气团, 短轨迹对应

移动缓慢的气团. 以太行山为界, 将输送到阳泉市的气流轨迹分为偏东和偏西方向两类, 图 4 给出了不同轨迹分型的比例特征, 以红色标注代表偏东方向气流, 黑色标注代表偏西方向气流. 不同季节偏东气流比例分别为: 春季 38.0%、夏季 66.1%、秋季 40.1% 和冬季 25.5%, 即夏季更多受偏东气流影响, 而冬季更多受偏西气流输送影响; 另一方面, 从输送轨迹距离上来看, 偏东方向以短距离输送为主, 偏西方向中西南气流也以短距离输送为主, 西北方向为长距离输送.

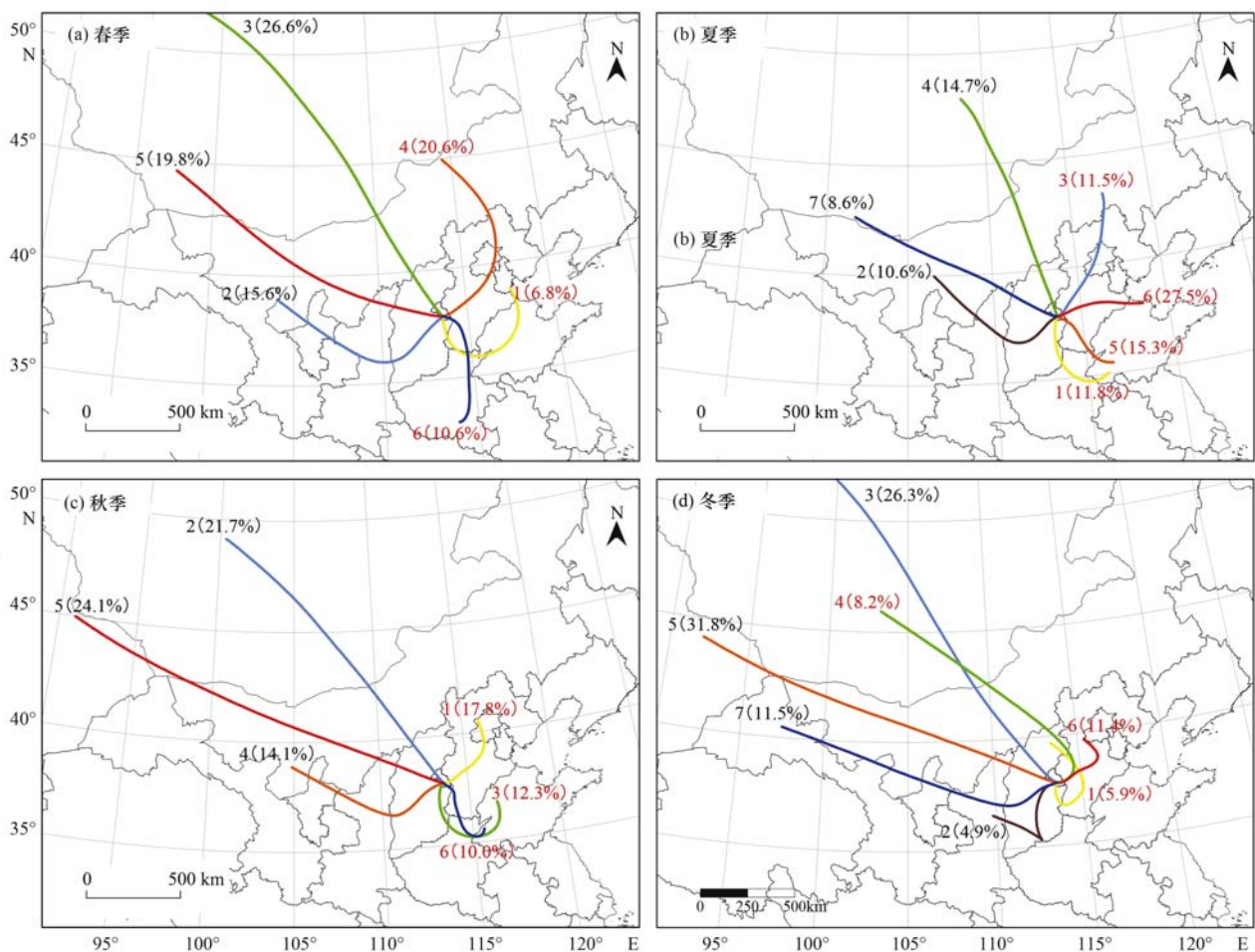


图 4 2017~2019 年阳泉市四季聚类轨迹

Fig. 4 Trajectory clusters of different seasons in Yangquan from 2017 to 2019

2.4 不同输送路径下阳泉市气溶胶浓度特征分析

为了了解不同输送路径下阳泉市两种气溶胶浓度, 图 5 给出了各季聚类轨迹分组占比及污染占比情况. 本节污染占比计算方法为首先计算阳泉市逐时浓度之和 (2017~2019 年逐时浓度共计 17 520 条), 收集每型轨迹到达阳泉时本地气溶胶浓度, 进一步计算每型聚类轨迹下气溶胶浓度之和, 每型轨迹总浓度占所有轨迹总浓度的比例即为污染占比, 即当轨迹污染占比高于轨迹占比 ($>2\%$), 可判断为污染轨迹.

从图 5(a) 可以看出, 春季西南轨迹 2 和东南轨迹 6 下两种气溶胶污染占比均高于轨迹占比, 偏西轨迹 5 下 PM_{10} 污染占比也较高, 表明春季西南和东南输送轨迹为污染轨迹, 偏西气流输送则更多带来粗颗粒物; 夏季 [图 5(b)] 偏东轨迹 6 下两种气溶胶浓度占比均高于轨迹占比, 偏南轨迹 1 和东南轨迹 5 下 $PM_{2.5}$ 浓度占比也高于轨迹占比, 表明夏季偏南、东南、偏东气流输送主要影响 $PM_{2.5}$ 浓度, 由于夏季太行山周边地区整体污染较轻, 区域传输过程对阳泉的影响也较弱; 秋季 [图 5(c)] 西南轨迹 4 下

两种气溶胶浓度占比均高于轨迹占比, 东南轨迹 3 和 6 下 $PM_{2.5}$ 浓度占比也高于轨迹占比, 即偏南方向的这 3 条轨迹均为污染轨迹, 表明秋季东南气流以 $PM_{2.5}$ 输送为主, 而西南气流则同时输送两种气溶胶; 冬季[图 5(d)]西南轨迹 2 和东北轨迹 6 下两种气溶胶占比均高于轨迹占比, 西南轨迹 7 和偏东轨迹 1 下 $PM_{2.5}$ 的占比也高于轨迹占比, 即 4 条轨迹

均为污染轨迹, 表明冬季西南、东北、偏东输送气流均对阳泉市气溶胶浓度有显著影响. 总的来看, 各季节污染轨迹均为中短距离轨迹, 主要分布于阳泉的西南和东南区域, 冬季在东北区域也有分布, 从污染物来看, 起源或途经太行山西侧的轨迹同时影响两种气溶胶, 起源于太行山东侧的轨迹则更多影响 $PM_{2.5}$ 浓度超标率.

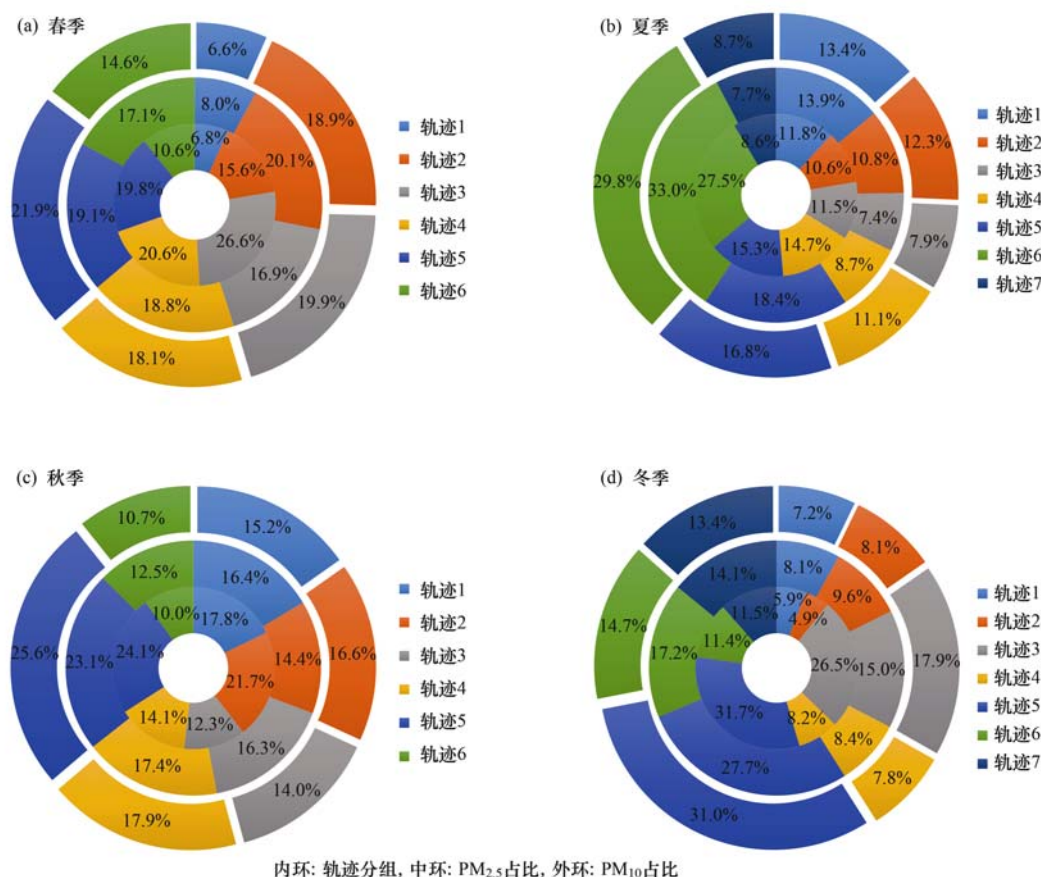


图 5 2017 ~ 2019 年阳泉市四季不同聚类轨迹下 PM_{10} and $PM_{2.5}$ 的浓度占比

Fig. 5 Proportions of PM_{10} and $PM_{2.5}$ under different trajectory clusters in Yangquan from 2017 to 2019

2.5 不同输送路径下阳泉市气溶胶超标特征分析

图 6 给出了不同季节不同轨迹下 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的超标率(以超环境空气质量二级标准限值计), 可以看出, 各个季节的污染轨迹下阳泉市气溶胶浓度超标均比较严重, 其中春季各个输送路径 PM_{10} 的超标率均高于 $PM_{2.5}$, 而冬季各个输送路径的超标率 PM_{10} 均低于 $PM_{2.5}$, 其他季节则根据输送路径的不同, 互有高低, 表现出污染输送来源不同造成污染特征的不同. 春季两类污染轨迹中来自华北平原轨迹 6 下的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 超标率接近, 均在 50% 以上, 而来自偏西轨迹 2 下的 PM_{10} 超标率达 41.1%, 高于 $PM_{2.5}$, 表明春季东部传输来的两种气溶胶浓度均较高, 而西部则以粗颗粒物输送为主. 夏季各类轨迹的污染物超标概率均较低, 其中轨迹 1、5 和 6 下 $PM_{2.5}$ 的超标概率相对稍高, 且均为偏东方向气流,

表明夏季偏东气流输送是造成阳泉市 $PM_{2.5}$ 浓度超标的主要原因; 值得注意的是, 西南轨迹 2 下 PM_{10} 的超标比例为夏季最高, 是影响阳泉夏季 PM_{10} 浓度的重要轨迹. 秋季污染轨迹 3、4 和 6 下 $PM_{2.5}$ 的超标率均超过 30%, 其中偏东方向的轨迹 3 和轨迹 6 主要引起 $PM_{2.5}$ 浓度超标, 而轨迹 4 下 PM_{10} 的超标概率为秋季最高, 达到 42.9%, 表明偏西方向的输送是引起阳泉秋季 PM_{10} 超标概率显著升高的主要原因. 冬季是气溶胶污染最重的季节, 除轨迹 3 外, 其他各型轨迹均易造成本地气溶胶浓度超标, 且均以 $PM_{2.5}$ 超标为主; 污染轨迹 1、2、6 和 7 下 $PM_{2.5}$ 的超标比例均超过 50%, 其中轨迹 2 下 $PM_{2.5}$ 超标比例最高, 达到 92.6%, 轨迹 6 和轨迹 1 下 $PM_{2.5}$ 超标率亦高达 71.0% 和 68.4%; 轨迹 3 为来自北偏西方向的长距离输送路径, 代表冬季气溶胶的主要清除气

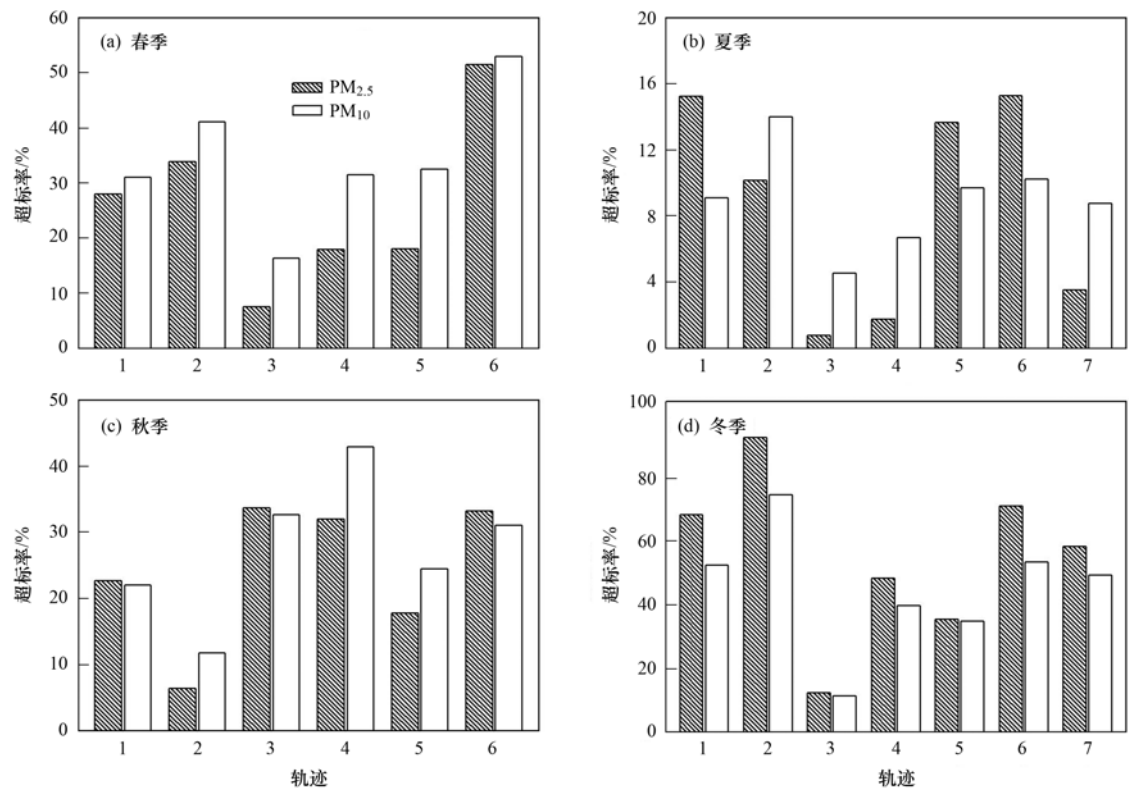
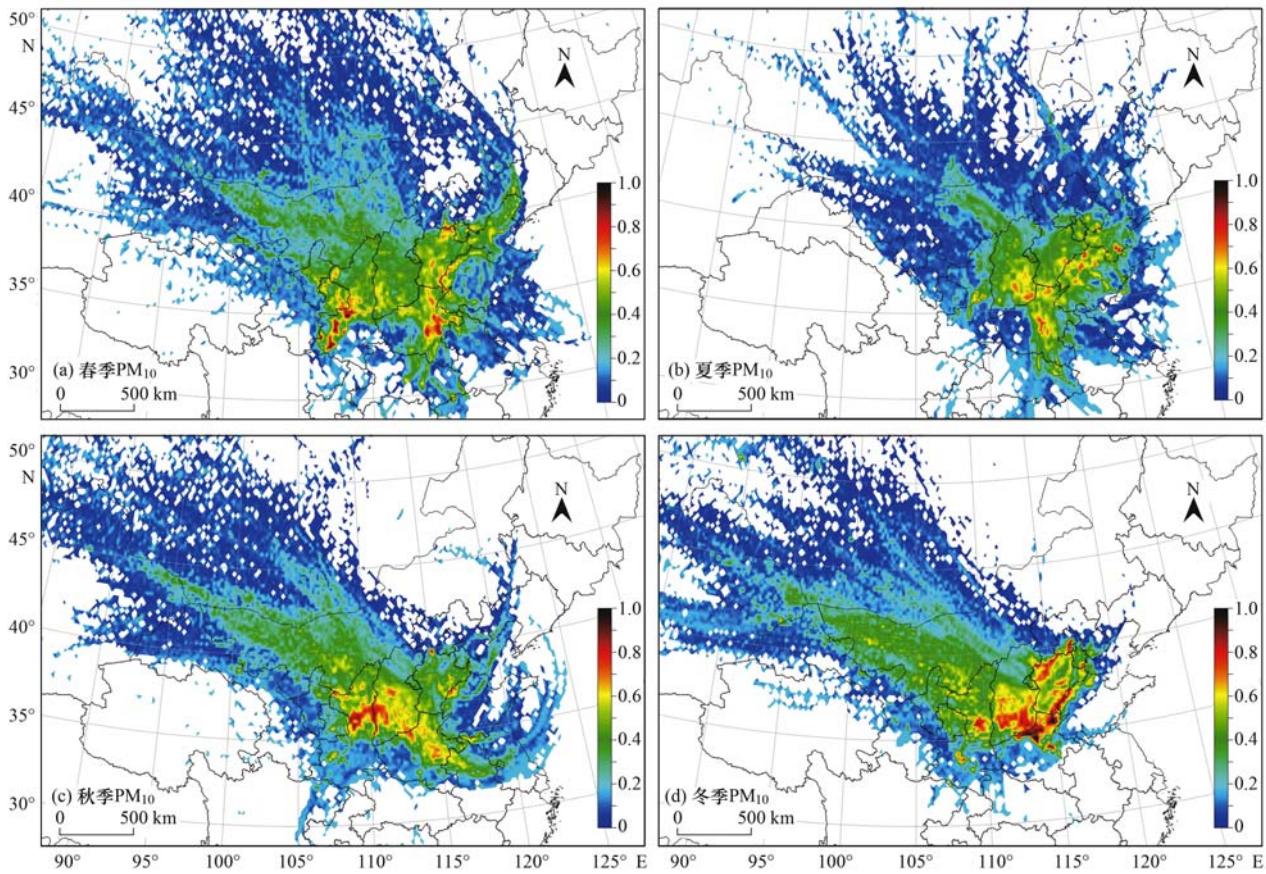


图 6 2017~2019 年阳泉市四季聚类轨迹 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 超标率

Fig. 6 Rates of standard exceedance of PM₁₀ and PM_{2.5} under different trajectory clusters in Yangquan from 2017 to 2019



图例表示 PSCF 值

图 7 2017~2019 年阳泉市 PM₁₀ 潜在源区贡献分析

Fig. 7 PM₁₀ PSCF analysis in Yangquan from 2017 to 2019

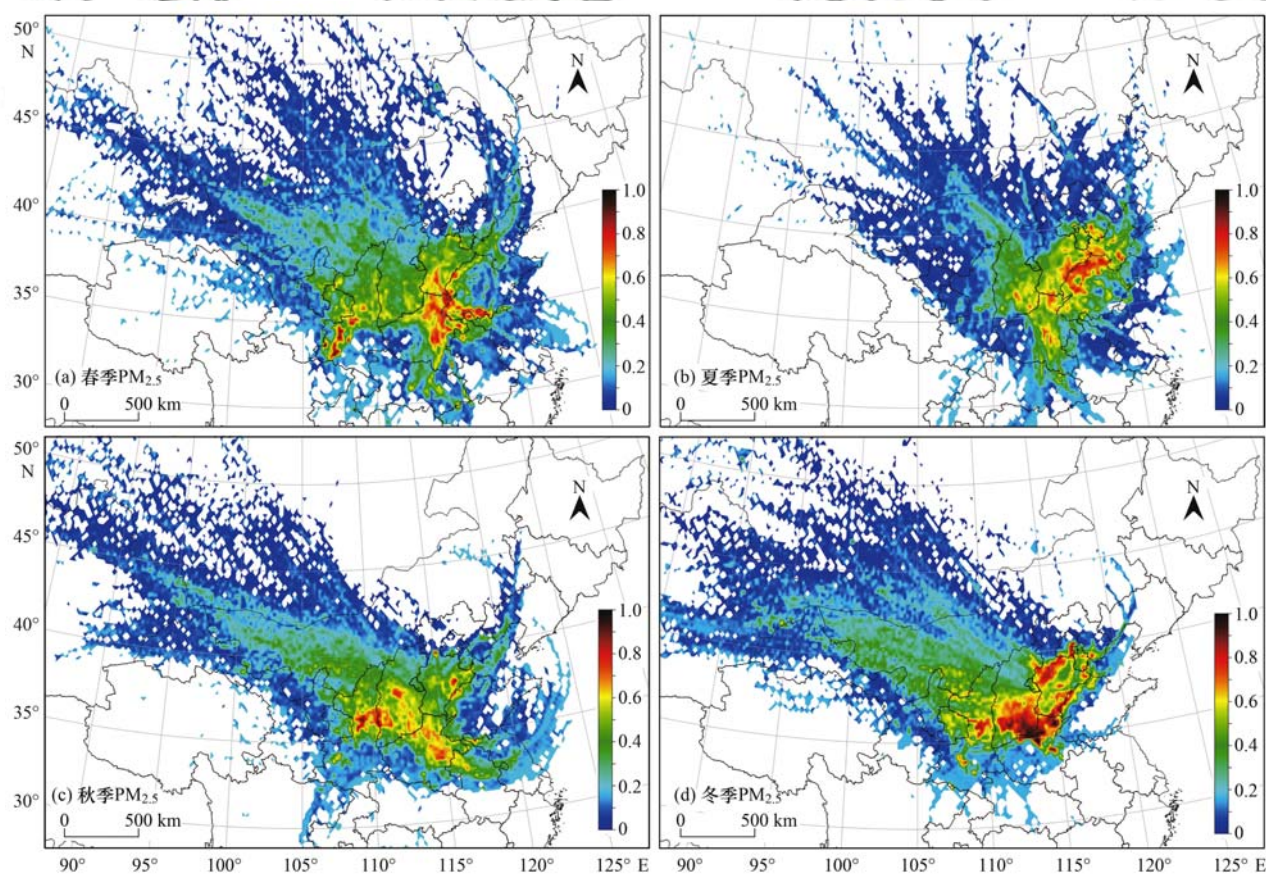
流轨迹. 总的来看, 污染轨迹下阳泉市气溶胶的超标比例均明显偏高, 偏西方向的气流输送对 PM_{10} 超标率影响更大, 偏东气流输送则主要引起 $PM_{2.5}$ 的超标率上升.

2.6 潜在源区分析

将气流轨迹的聚类分析结果结合 $PM_{2.5}$ ^[34] 或 PM_{10} ^[35] 浓度采用潜在源贡献因子分析法 (PSCF) 和浓度权重轨迹分析法 (CWT) 来定位潜在污染源区位置并定量给出污染贡献大小^[36,37]. PSCF 值是指超过阈值浓度的轨迹与所有轨迹数的比值, 其分布区域被解释为受体点的污染潜在源区, PSCF 的计算值越大, 表明该网格对计算点阳泉市 PM_{10} 浓度的影响越大. 阳泉市 2017 ~ 2019 年 PM_{10} 污染潜在源区贡献计算结果见图 7, 阳泉市春季 PM_{10} 主要潜在源区 (贡献 0.7 以上) 主要分为西南和偏东两片区域, 其中西南方向为位于陕西中南偏西部的延安、宝鸡、汉中一带区域, 偏东方向主要为河北中南部及河南东部、北部区域, 这些潜在源区的气团主要沿着偏南轨迹通过中距离输送到达阳泉; 夏季 PM_{10} 主要潜在源区位于阳泉的偏东及偏南方向, 包括山西东南部、河南中东部以及河北东南部和山东西北部, 偏西

南方向的陕西中部延安一带的影响较春季减弱. 秋季气溶胶潜在源区主要位于阳泉的西南及偏南方向, 包括山西中南部、陕西中部、河南北东部, 范围相对较大, 其中偏西南方向 PSCF 值更高, 此外河北东部与山东西北交界处也有一片范围较小的污染潜在源区. 冬季主要污染潜在源区位于偏南和偏东方向区域, PSCF 高值区范围较其他 3 个季节更大, 包括山西东南部、河南北部和河北东南部与山东西北部交界区域等. 阳泉市 PM_{10} 潜在源区的分布在春夏季较为分散, 秋季较为集中, 冬季集中且分布区域大.

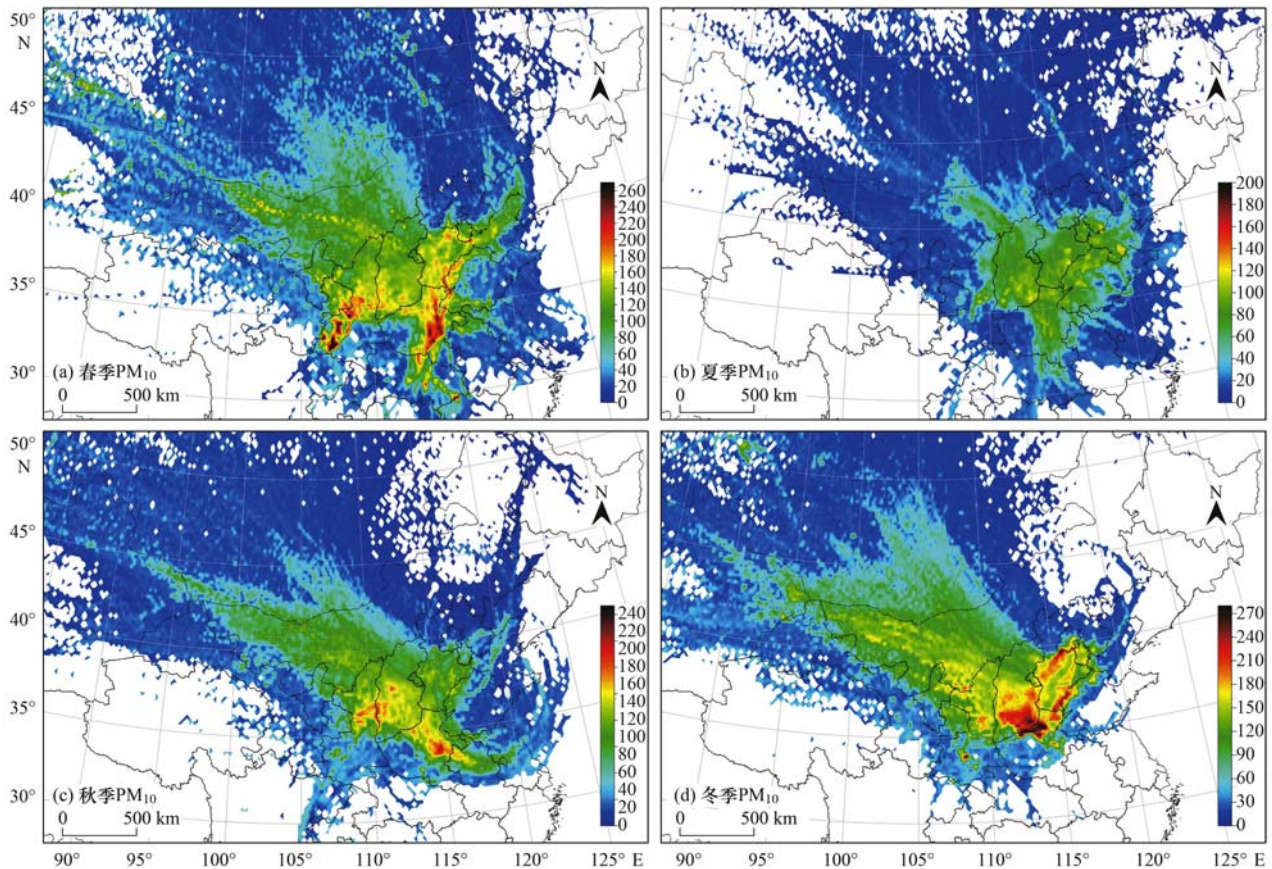
图 8 给出了阳泉市 $PM_{2.5}$ 的 PSCF 分析结果, $PM_{2.5}$ 的 PSCF 结果与 PM_{10} 大致相似, 春季 $PM_{2.5}$ 高值区与 PM_{10} 的基本相同, 但是偏东方向的河南东北部、河北南部和山东西南部这一片潜在源区范围明显更大, 而西北方向区域的 $PM_{2.5}$ 潜在贡献明显低于 PM_{10} . 夏季和秋季 $PM_{2.5}$ 主要污染潜在源区同 PM_{10} 一致, 但 PSCF 值更高. 冬季 $PM_{2.5}$ 的 PSCF 高值区达 0.9 以上的区域更多, 包括山西东南部、河南北部和河北东南部与山东西北部交界区域等, 表明冬季气溶胶污染以 $PM_{2.5}$ 更为显著. 阳泉市 $PM_{2.5}$ 潜在源区的分布在春季较 PM_{10} 更大且偏东方向较为集中, 夏



图例表示 PSCF 值

图 8 2017 ~ 2019 年阳泉市 $PM_{2.5}$ 潜在源区贡献分析

Fig. 8 $PM_{2.5}$ PSCF analysis in Yangquan from 2017 to 2019



图例表示 PM_{10} 浓度, 单位 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
图 9 2017~2019 年阳泉市 PM_{10} 浓度权重轨迹分析结果
 Fig. 9 PM_{10} CWT analysis in Yangquan from 2017 to 2019

季在京津冀地区较为集中, 秋季在西南方向较为集中, 冬季亦在偏南和偏东区域十分集中且高值区分布范围大。

运用 CWT 分析可以进一步给出该区域对受体点的浓度贡献大小, 从图 9 可以看出, 春季对阳泉市 PM_{10} 浓度贡献超过 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上的区域主要是陕西延安、宝鸡、汉中一带、河南东北部、河北中南部以及内蒙中西部; 夏季各潜在源区的污染浓度权重均不高, 对阳泉市的 PM_{10} 在 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下。秋季偏东南方向潜在源区的污染浓度权重高于西南方向的污染潜在源区, 河南东北部对阳泉市的 PM_{10} 贡献达 $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 西南方向陕西中部的 PM_{10} 浓度贡献亦可达 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。冬季对阳泉市 PM_{10} 浓度贡献较高的地区位于山西东南部与河南北部交界处达 $250 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

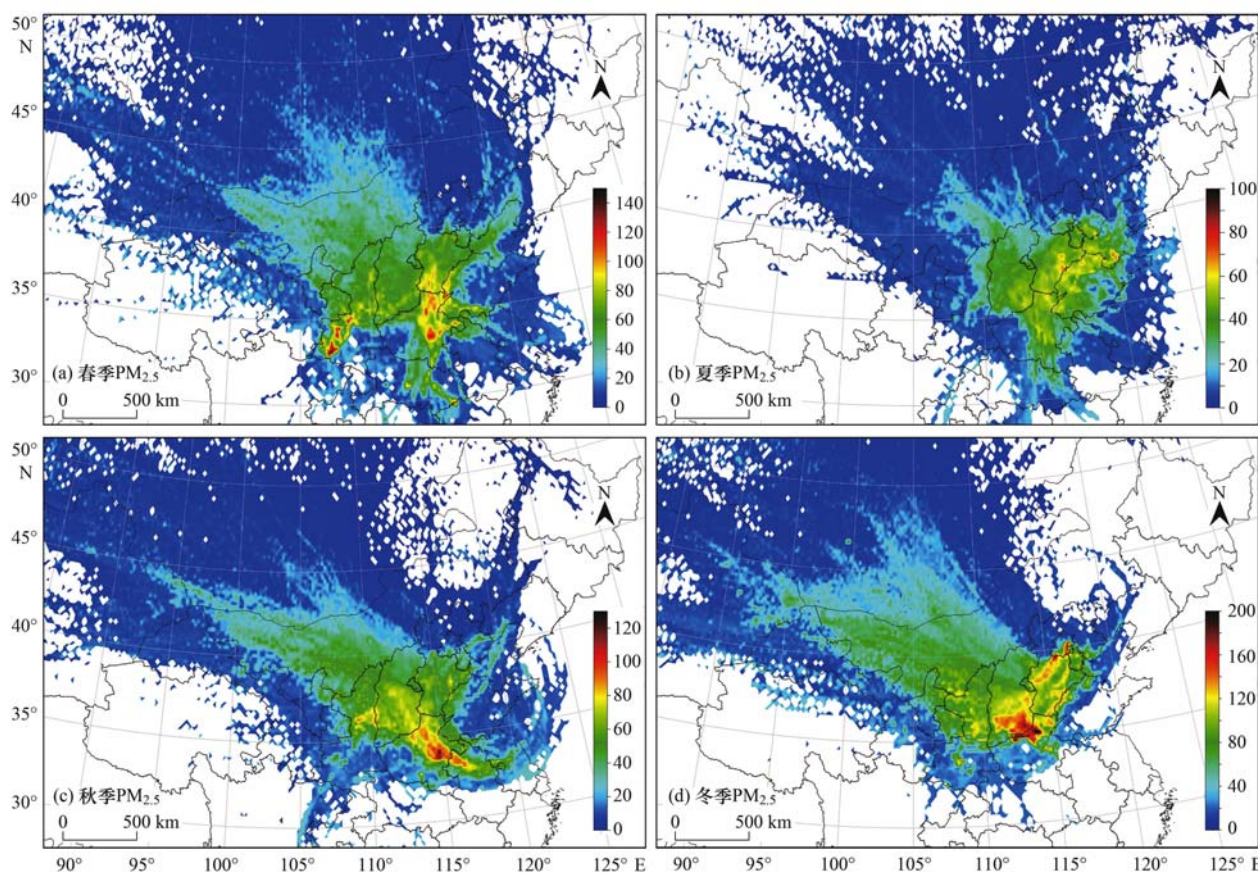
阳泉 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的 CWT 计算结果表明(图 10), 春季贡献较高的区域与 PM_{10} 一致, 浓度贡献达 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上, 表明春季两个潜在区域可能会同时输送 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 。夏季各潜在源区的污染浓度权重均不高, 对阳泉市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度贡献在 $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下。与 PSCF 结果不同, 秋季偏东南方向潜在源区的

污染浓度权重明显高于西南方向, 河南东北部对阳泉市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度贡献达到 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 表明秋季偏东区域以输送 $\text{PM}_{2.5}$ 为主, 偏西以 PM_{10} 为主。冬季对阳泉市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度贡献达到 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的区域位于山西东南部与河南北部交界处, 与 PSCF 结果不同的是, 冬季汾河谷地作为对阳泉市重要的潜在源区, 但对阳泉 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献低于山西东南部与河南北部。

综上所述表明, 太行山两侧均有区域影响阳泉市气溶胶浓度, 即太行山两侧各季节通过各自传输通道^[18~20]向北输送并在井陘通道进行传输和交换; 不同季节传输特征不同, 春季在东西两个方向上均有输送, 西向东传输以粗颗粒为主, 东向西则以细颗粒物为主; 夏季传输影响较弱; 秋季细颗粒存在有双向传输, 同时西向东有一定量的粗颗粒输送; 冬季也为双向输送, 其中东向西的细颗粒输送影响更显著。

3 结论

(1) 阳泉市气溶胶日变化呈单峰单谷型变化, 傍晚到翌日清晨气溶胶浓度呈持续上升特征, 冬季最高值出现在 10:00~11:00, 其他季节多在 09:00,



图例表示 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度, 单位 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
图 10 2017 ~ 2019 年阳泉市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度权重轨迹分析结果
Fig. 10 $\text{PM}_{2.5}$ CWT analysis in Yangquan from 2017 to 2019

最小值均在 15:00 ~ 16:00; 气溶胶月际变化显著, 1 月最高, 8 月最低. 气流输送受横谷地形影响显著, 地面风向以偏东风和偏西风频率最高. 全年小风天气气溶胶浓度最高, 冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度达 $110.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 冬季偏东气流下污染物输送使 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超过 $90 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 春秋季偏西风引起的沙尘天气也显著影响气溶胶浓度.

(2) 太行山两侧通过井陘横谷进行气溶胶输送交换过程显著. 除夏季外, 到达阳泉的传输路径中均存在明显的污染轨迹, 各季节污染轨迹占比为春季 26.2%、秋季 36.4% 和冬季 33.7%; 污染轨迹主要分布在阳泉的西南和东南区域, 冬季在东北区域也有分布; 从污染物来看, 山脉两侧均存在显著的细颗粒传输, 而起源或途经太行山西侧的轨迹同时也输送粗颗粒; 污染轨迹下阳泉市气溶胶的超标比例均明显偏高, 偏西轨迹对 PM_{10} 超标率影响更大, 偏东轨迹则主要影响 $\text{PM}_{2.5}$ 的超标率; 春季各个输送路径 PM_{10} 的超标率均高于 $\text{PM}_{2.5}$, 冬季则相反.

(3) 潜在源贡献因子分析和浓度权重轨迹分析结果具有一致性, 春季阳泉市气溶胶主要污染潜在源区包括西南和东南两片区域; 夏季各潜在源区的

污染浓度权重均不高; 秋季气溶胶主要污染潜在源区位于阳泉的西南及偏南方向, 其中 $\text{PM}_{2.5}$ 的 PSCF 值及 CWT 值偏东南更高, 而 PM_{10} 的 PSCF 值及 CWT 值偏西南方向更高; 冬季阳泉市气溶胶主要污染潜在源区位于偏南和偏东方向区域, 其中山西南部及与河南北部交界区域是主要的污染贡献源区. 太行山两侧通过井陘通道进行大气污染物的相互传输过程显著, 其中东向西的细颗粒传输影响更显著.

参考文献:

- [1] Song C B, He J J, Wu L, *et al.* Health burden attributable to ambient $\text{PM}_{2.5}$ in China [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 575-586.
- [2] Fu X S, Li L, Lei Y L, *et al.* The economic loss of health effect damages from $\text{PM}_{2.5}$ pollution in the central plains urban agglomeration [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(20): 25434-25449.
- [3] 张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 等. 2013 ~ 2017 年中国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染防治的健康效益评估 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 513-522.
- [4] Zhang M J, Su F C, Xu Q X, *et al.* Health impact attributable to the control of $\text{PM}_{2.5}$ pollution in China during 2013-2017 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 513-522.
- [4] 张礁石, 陆亦怀, 桂华侨, 等. APEC 会议前后北京地区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征及气象影响因素 [J]. *环境科学研究*, 2016,

- 29(5): 646-653.
- Zhang J S, Lu Y H, Gui H Q, *et al.* Variations of PM_{2.5} pollution and related meteorological factors before and after the 2014 APEC conference in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(5): 646-653.
- [5] 王申博, 娄亚敏, 徐艺斐, 等. 郑州市民运会期间大气 PM_{2.5} 改善效果评估[J]. *环境科学*, 2020, **41**(7): 3004-3011.
- Wang S B, Lou Y M, Xu Y F, *et al.* Evaluation of the reduction in PM_{2.5} concentration during the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3004-3011.
- [6] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. *科学通报*, 2013, **58**(13): 1178-1187.
- Zhang X Y, Sun J Y, Wang Y Q, *et al.* Factors contributing to haze and fog in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(13): 1178-1187.
- [7] 姚青, 蔡子颖, 刘敬乐, 等. 气象条件对2009-2018年天津地区 PM_{2.5} 质量浓度的影响[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(1): 65-75.
- Yao Q, Cai Z Y, Liu J L, *et al.* Effects of meteorological conditions on PM_{2.5} concentration in Tianjin from 2009 to 2018 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(1): 65-75.
- [8] 刘引鸽, 周欢欢, 赵阿玲, 等. 河谷型城市一次大气持续重污染特征及其原因分析——以宝鸡市为例[J]. *环境污染与防治*, 2019, **41**(11): 1286-1290.
- Liu Y G, Zhou H H, Zhao A L, *et al.* Characteristics of continuous heavy pollution in a valley city and its causes: a case study of Baoji City [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2019, **41**(11): 1286-1290.
- [9] Zhang Q, Quan J N, Tie X X, *et al.* Effects of meteorology and secondary particle formation on visibility during heavy haze events in Beijing, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **502**: 578-584.
- [10] 李雁宇, 李杰, 杨文夷, 等. 2018年汾渭平原及其周边地区大气颗粒物的传输特征[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(3): 779-791.
- Li Y Y, Li J, Yang W Y, *et al.* Transport characteristics of atmospheric particulates in Fenwei Plain and its surrounding regions in 2018 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(3): 779-791.
- [11] Chang X, Wang S X, Zhao B, *et al.* Contributions of inter-city and regional transport to PM_{2.5} concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei region and its implications on regional joint air pollution control [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **660**: 1191-1200.
- [12] 刘建国, 谢品华, 王跃思, 等. APEC 前后京津冀区域灰霾观测及控制措施评估[J]. *中国科学院院刊*, 2015, **30**(3): 368-377.
- Liu J G, Xie P H, Wang Y S, *et al.* Haze observation and control measure evaluation in Jing-Jin-Ji (Beijing, Tianjin, Hebei) Area during the period of the Asia-Pacific Economic Cooperation (APEC) meeting [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2015, **30**(3): 368-377.
- [13] 何伟, 张文杰, 王淑兰, 等. 京津冀地区大气污染联防联控机制实施效果及完善建议[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(10): 1696-1703.
- He W, Zhang W J, Wang S L, *et al.* Effects and improvement suggestions on air pollution joint prevention and control mechanism in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(10): 1696-1703.
- [14] 薛文博, 付飞, 王金南, 等. 中国 PM_{2.5} 跨区域传输特征数值模拟研究[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(6): 1361-1368.
- Xue W B, Fu F, Wang J N, *et al.* Numerical study on the characteristics of regional transport of PM_{2.5} in China [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(6): 1361-1368.
- [15] 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.
- [16] 金同俊, 祁建华, 郝梓延, 等. 一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1562-1574.
- Jin T J, Qi J H, Xi Z Y, *et al.* Impact of a dust event on the size distribution of metal elements in atmospheric aerosols at a coastal region and over the ocean [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1562-1574.
- [17] 杨阳, 李杏茹, 陈曦, 等. 春季沙尘过程北京市不同粒径大气气溶胶污染特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5315-5322.
- Yang Y, Li X R, Chen X, *et al.* Analysis of different particle sizes, pollution characteristics, and sources of atmospheric aerosols during the spring dust period in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5315-5322.
- [18] 胡京南, 柴发合, 段青春, 等. 京津冀及周边地区秋冬季 PM_{2.5} 爆发式增长成因与应急管控对策[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(10): 1704-1712.
- Hu J N, Chai F H, Duan J C, *et al.* Explosive growth of PM_{2.5} during the autumn and winter seasons in the Jing-Jin-Ji and surrounding area and its control measures with emergency response [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(10): 1704-1712.
- [19] Zhou Z J, Liu R, Zhang Z Y. Characteristics of winter haze pollution in the Fenwei Plain and the possible influence of EU during 1984-2017 [J]. *Earth and Space Science*, 2020, **7**(6), doi: 10.1029/2020EA001134.
- [20] 闫世明, 王雁, 郭伟, 等. 太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 4801-4809.
- Yan S M, Wang Y, Guo W, *et al.* Characteristics, transportation, pathways, and potential sources of air pollution during autumn and winter in Taiyuan [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 4801-4809.
- [21] 王尚义. 吕议太行八陬及其历史变迁 [J]. *地理研究*, 1997, **16**(1): 68-76.
- Wang S Y. A brief discussion on the eight Taihang passages and their vicissitudes in the history [J]. *Geographical Research*, 1997, **16**(1): 68-76.
- [22] 徐杰, 高战武, 宋长青, 等. 太行山山前断裂带的构造特征 [J]. *地震地质*, 2000, **22**(2): 111-122.
- Xu J, Gao Z W, Song C Q, *et al.* The structural characters of the piedmont fault zone of Taihang Mountain [J]. *Seismology and Geology*, 2000, **22**(2): 111-122.
- [23] 牛仁亮, 任阵海. 大气污染跨区域影响研究: 山西大气污染影响北京的案例分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [24] 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.
- [25] 王成, 闫雨龙, 谢凯, 等. 阳泉市秋冬季 $PM_{2.5}$ 化学组分及来源分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1036-1044.
Wang C, Yan Y L, Xie K, *et al.* Analysis of chemical components and sources of $PM_{2.5}$ during autumn and winter in Yangquan City [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1036-1044.
- [26] 中国环境监测总站. 全国城市空气质量报告[R]. 北京: 中国环境监测总站, 2018-2020.
- [27] 姚森, 张晗宇, 王晓琦, 等. 2016 年 1 月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 534-545.
Yao S, Zhang H Y, Wang X Q, *et al.* Air pollution characteristics and quantitative evaluation of multi-scale transport in the Beijing-Tianjin-Hebei region in January, 2016 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 534-545.
- [28] Chen Y, Xie S D, Luo B. Seasonal variations of transport pathways and potential sources of $PM_{2.5}$ in Chengdu, China (2012-2013) [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2018, **12**(1), doi: 10.1007/s11783-018-1009-z.
- [29] Yu H, Feng J L, Su X F, *et al.* A seriously air pollution area affected by anthropogenic in the central China: temporal-spatial distribution and potential sources [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, **42**(10): 3199-3211.
- [30] 姬艺珍, 郭伟, 胡正华, 等. 太原市 $PM_{2.5}$ 积累特征及重污染天气成因分析[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(3): 853-862.
Ji Y Z, Guo W, Hu Z H, *et al.* Accumulation characteristics of $PM_{2.5}$ and the causes of serious pollution weather in Taiyuan city, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(3): 853-862.
- [31] 苗蕾, 廖晓农, 王迎春. 基于长时间序列的北京 $PM_{2.5}$ 浓度日变化及气象条件影响分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(8): 2836-2846.
Miao L, Liao X N, Wang Y C. Diurnal variation of $PM_{2.5}$ mass concentration in Beijing and influence of meteorological factors based on long term date [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 2836-2846.
- [32] 付桂琴, 张杏敏, 尤凤春, 等. 气象条件对石家庄 $PM_{2.5}$ 浓度的影响分析[J]. *干旱气象*, 2016, **34**(2): 349-355.
Fu G Q, Zhang X M, You F C, *et al.* Effect of meteorological conditions on $PM_{2.5}$ concentration in Shijiazhuang of Hebei [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2016, **34**(2): 349-355.
- [33] Tian S S, Liu Y Y, Wang J, *et al.* Chemical compositions and source analysis of $PM_{2.5}$ during autumn and winter in a heavily polluted city in China [J]. *Atmosphere*, 2020, **11**(4), doi: 10.3390/atmos11040336.
- [34] Zhang Y Y, Lang J L, Cheng S Y, *et al.* Chemical composition and sources of PM_1 and $PM_{2.5}$ in Beijing in autumn [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **630**: 72-82.
- [35] Bao Z E, Chen L H, Li K W, *et al.* Meteorological and chemical impacts on $PM_{2.5}$ during a haze episode in a heavily polluted basin city of eastern China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **250**: 520-529.
- [36] 王郭臣, 王珏, 信玉洁, 等. 天津 PM_{10} 和 NO_2 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_{10} and NO_2 in Tianjin [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(12): 3009-3016.
- [37] Fan W Z, Qin K, Xu J, *et al.* Aerosol vertical distribution and sources estimation at a site of the Yangtze River Delta region of China [J]. *Atmospheric Research*, 2019, **217**: 128-136.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing, from 2014 to 2020	CHEN Jing, PENG Jin-long, XU Yan-sen (4071)
High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, FAN Li-hang, <i>et al.</i> (4083)
Impacts of Anthropogenic Emission Reduction and Meteorological Conditions on PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of Beijing-Tianjin-Hebei in Winter	SHAO Xuan-yi, WANG Xiao-qi, ZHONG Yi-sheng, <i>et al.</i> (4095)
Influence of Pollutant Transport from Both Sides of the Taihang Mountains on Cross-Valley Urban Aerosols	WANG Yan, GUO Wei, YAN Shi-ming, <i>et al.</i> (4104)
Variation Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in Winter in Jiashan	ZHANG Ying-long, LI Li, WU Wei-chao, <i>et al.</i> (4116)
Simulation Analysis of the Impact of COVID-19 Pandemic Control on Air Quality in Henan Province based on Machine Learning Algorithm	WEI Yu, XU Qi-xiang, ZHAO Jin-shuai, <i>et al.</i> (4126)
Seasonal Variation, Source Identification, and Health Risk of PM _{2.5} -bound Metals in Xinxiang	LIU Huan-jia, JIA Meng-ke, LIU Yong-li, <i>et al.</i> (4140)
Distribution Characteristics and Seasonal Variations of Arsenic in Atmospheric Aerosols over the Yellow Sea and Bohai Sea	YUAN Shuai, WANG Yan, LIU Ru-hai, <i>et al.</i> (4151)
Extinction Characteristics of Aerosols and the Contribution of Pollution Sources to Light Extinction During Three Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2020 in Tianjin	LI Li-wei, XIAO Zhi-mei, YANG Ning, <i>et al.</i> (4158)
Spatial Variation of Surface Ozone Concentration During the Warm Season and Its Meteorological Driving Factors in China	HE Chao, MU Hang, YANG Lu, <i>et al.</i> (4168)
Exploring Characteristics and Causes of Summer Ozone Pollution Based on Process Analysis in Wuhai	ZHANG Rui-xin, CHEN Qiang, XIA Jia-qi, <i>et al.</i> (4180)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric VOCs in the Coastal Background of the Pearl River Delta	YUN Long, LI Cheng-liu, ZHANG Ming-di, <i>et al.</i> (4191)
Hydrochemical Characteristics and Factors of Surface Water and Groundwater in the Upper Yongding River Basin	KONG Xiao-le, YANG Yong-hui, CAO Bo, <i>et al.</i> (4202)
Temporal and Spatial Variations in Water Quality of Hanjiang River and Its Influencing Factors in Recent Years	CHENG Bing-fen, ZHANG Yuan, XIA Rui, <i>et al.</i> (4211)
Pollution Level, Distribution Characteristic, and Ecological Risk Assessment of Environmentally Persistent Pharmaceutical Pollutants in Surface Water of Jiangsu Province	ZHAO Mei-mei, FAN De-ling, GU Wen, <i>et al.</i> (4222)
Spatial and Temporal Distribution and Pollution Evaluation of Soluble Heavy Metals in Liujiang River Basin	ZHANG Wan-jun, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4234)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater of Leizhou Peninsula	SHI Huan-huan, PAN Yu-jie, ZENG Min, <i>et al.</i> (4246)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements in Groundwater of Longzici Spring Area	XIE Hao, LIANG Yong-ping, LI Jun, <i>et al.</i> (4257)
Seasonal Variation and Sources Identification of Dissolved Sulfate in a Typical Karst Subterranean Stream Basin Using Sulfur and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LAN Gan-jiang, <i>et al.</i> (4267)
Phosphorus Fractions and Quantitative Identification of Pollution Sources in Nanhai Wetland, Baotou	BAI Ya-hong, QIAN Chen-ge, YUAN Si-jing, <i>et al.</i> (4275)
Release Risk of Phosphorus by Sediments and Its Influencing Factors in Ponds and Ditches of a New Urban District Park	LI Ru-zhong, SONG Min, YANG Ji-wei (4287)
Effect of Hydraulic Residence Time on Removal Efficiency of Pollutants in Subsurface Flow Constructed Wetlands and Analysis of Denitrification Mechanism	QI Ran, ZHANG Ling, YANG Fan, <i>et al.</i> (4296)
Enhanced Removal of Pollutants in Constructed Wetlands with Manganese Sands	MA Quan, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (4304)
Application Effect of Four Typical Submerged Macrophytes on Removing Cadmium from Polluted Sediment	TAO Li, WANG Pei-fang, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i> (4311)
Structure of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Response to Dissolved Organic Matter in Baiyangdian Lake During the Water Delivery Period	ZHOU Shi-lei, ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (4319)
Nitrogen and Phosphorus Leaching Characteristics and Adsorption Properties of Hardwood Biochar in Stormwater Runoff	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue (4332)
Indicator Function of Ragworm (<i>Nereididae</i>) on Sediment Microplastic in Haizhou Bay Intertidal Zone	WANG Jia-xuan, SONG Ke-xin, SUN Yi-xin, <i>et al.</i> (4341)
Antagonistic Effect and Mechanism of Nano Titanium Dioxide and Cadmium on the Growth of <i>Scenedesmus obliquus</i>	WANG Pu, ZHAO Li-hong, ZHU Xiao-shan (4350)
Mutual Influence Between Microbial Community, Wastewater Characteristics, and Antibiotic Resistance Genes During Spiramycin Production Wastewater Treatment	WU Cai-yun, LI Hui-li, QIN Cai-xia, <i>et al.</i> (4358)
Effect of Chelated Iron on Nitrogen Removal Efficiency and Microbial Community Structure in the Anaerobic Ferric Ammonium Oxidation	LIAO Hong-yan, SONG Cheng, WAN Liu-yang, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Dissolved Oxygen on Nutrient Removal Performance and Microbial Community in Low Carbon/Nitrogen Municipal Wastewater Treatment Process	CHI Yu-lei, SHI Xuan, REN Tong, <i>et al.</i> (4374)
Shortening SRT of Intermittent Gradient Aeration to Realize Nitrogen and Phosphorus Removal in Short-range SNEDPR System	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (4383)
Characteristics of Partial Denitrification in Biofilm System	YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, ZHANG Qiong, <i>et al.</i> (4390)
Effect of Anaerobic Plug-flow on Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Aerobic Granular Sludge with Intermittent Aeration	LI Dong, CAO Si-yu, WANG Qi, <i>et al.</i> (4399)
Combining Different Aerobic/Anoxic Durations with Zoned Sludge Discharge to Optimize Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules in Domestic Sewage	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (4406)
Meta-analysis of the Effects of Metal Mining on Soil Heavy Metal Concentrations in Southwest China	ZHANG Jian-lin, QU Ming-kai, CHEN Jian, <i>et al.</i> (4414)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau	DU Hao-lin, WANG Ying, WANG Jin-song, <i>et al.</i> (4422)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Cadmium Pollution in Soil-crops system of an E-waste Dismantling Area	ZHANG Lu-yao, ZHAO Ke-li, FU Wei-jun (4432)
Characteristics of Modified Biochars and Their Immobilization Effect on Cu and Cd in Polluted Farmland Soil Around Smelter	WANG Xin-yu, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, <i>et al.</i> (4441)
Combined Effects of Soil Amendment and Zinc Fertilizer on Accumulation and Transportation of Cadmium in Soil-Rice System	ZHOU Kun-hua, ZHOU Hang, WANG Zi-yu, <i>et al.</i> (4452)
Effects of Different Soil Conditioners on Rice Growth and Heavy Metal Uptake in Soil Contaminated with Copper and Cadmium	WEI Wei, LI Ping, LANG Man (4462)
Isolation and Identification of the Plant Endophyte R-13 and Its Effect on Cadmium Accumulation in <i>Solanum nigrum</i> L.	PANG Jie, LIU Yue-min, HUANG Yong-chun, <i>et al.</i> (4471)
Response of Soil Archaeal Community to Heavy Metal Pollution in Different Typical Regions	LI Yu-tong, YANG Shan, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4481)
High-throughput Sequencing Analysis of Soil Bacterial Community in the Grain for Green Project Areas of the Loess Plateau	LIU Xiao-hua, WEI Tian-xing (4489)
Experimental Influence of Food Waste Fermentation Broth on the Soil Quality in a Loess Hilly Area	SHAO Li-ming, REN Jun-da, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4500)
Stability of Soil Aggregates at Different Altitudes in Qinling Mountains and Its Coupling Relationship with Soil Enzyme Activities	MA Huan-fei, HU Han, LI Yi, <i>et al.</i> (4510)
Reactivation of Passivated Biochar/Nanoscale Zero-Valent Iron by an Electroactive Microorganism for Cooperative Hexavalent Chromium Removal and Mechanisms	LIAO Cong-jian, ZHAO Xiao-lei, LIU Kai, <i>et al.</i> (4520)
Influence of Precipitation Change on Soil Respiration in Desert Grassland	HAO Lian-yi, ZHANG Li-hua, XIE Zhong-kui, <i>et al.</i> (4527)
Effects of Nitrogen Fertilizer Application Times and Nitrification Inhibitor on N ₂ O Emission from Potted Maize	FU Pei-jiao, JI Heng-kuan, HE Qiu-xiang, <i>et al.</i> (4538)
Gaseous Nitrogen Emission from Soil After Application of NH ₄ ⁺ -N Loaded Biochar	MA Xiao-gang, HE Jian-qiao, CHEN Yu-lan, <i>et al.</i> (4548)
Effects of Microplastics Addition on Soil Organic Carbon Mineralization in Citrus Orchard	ZHANG Xiu-ling, YAN Zi-wei, WANG Feng, <i>et al.</i> (4558)
Dynamic Material Flow Analysis of Perfluorooctane Sulfonate in China; 1985-2019	WANG Jia-yu, CHEN Jing-wen, TANG Wei-hao, <i>et al.</i> (4566)