

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年1月

第43卷 第1期
Vol.43 No.1

目次

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价	彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严 (1)
植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述	陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 张纪兆, 王浩达 (11)
基于铁泥的磁性水处理材料制备及应用进展	曾辉平, 翟龙雪, 李冬, 张杰 (26)
不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的 Meta 分析	阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 曾贤刚 (37)
北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析	赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 田平, 盛久江, 周崑, 肖伟, 杜远谋, 卢俐, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (46)
武汉冬季大气 PM _{2.5} 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析	蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 曾昕, 陈楠, 祁士华 (61)
运城市 PM _{2.5} 时空分布特征和潜在源区季节分析	王姝涛, 张强, 温肖宇, 冀乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 翟程凯 (74)
中国东部冷锋推进中的 PM _{2.5} 三维结构变化特征	牟南南, 朱彬, 卢文 (85)
粤港澳大湾区大气中硝基多环芳烃污染特征与风险评估	李彦希, 谢丹平, 黎玉清, 金梦, 丁紫荣, 闫雅楠, 赵波 (93)
西南地区大型综合工业区和周边区域大气 VOCs 污染特征及健康风险评估	李陵, 张丹, 胡伟, 徐芹, 吴虹, 袁睿, 蒲茜, 郝宇杭, 唐志欣, 赖明敏 (102)
拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析	余家燕, 韩燕, 陈木兰, 张惠芳, 陈阳, 刘建国 (113)
杭州 COVID-19 期间大气 VOCs 体积分数变化特征	林旭, 严仁娣, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平 (123)
上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用	金丹 (132)
铜川市秋冬季大气 VOCs 特征及其 O ₃ 和 SOA 形成潜势分析	易宵霄, 李姜豪, 李光华, 路珍珍, 孙智钢, 高健, 邓顺熙 (140)
电子垃圾拆解回收 VOCs 排放特征与排放因子	谢丹平, 黄忠辉, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕 (150)
不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系	伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅 (160)
淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析	王雨燕, 杨文, 王秀艳, 王帅, 白瑾丰, 程颖 (170)
昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险	庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 包宇斋, 宁平, 张朝能, 向峰 (180)
城市路面积尘微塑料污染特征	方芹, 牛司平, 陈予东, 于江华 (189)
塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源	宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东 (199)
赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评估	吴天宇, 李江, 杨爱江, 李彦澄, 陈瑀, 何强, 马凯, 胡霞, 王斌, 艾佳, 钟雄 (210)
无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素	李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志 (220)
白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评估	陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪志 (230)
九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系	刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 林惠荣, 胡恭任, 于瑞莲 (239)
北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价	胡小红, 左德鹏, 刘波, 黄振芳, 徐宗学 (247)
城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析	刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭道宇 (256)
苏州景观河道表层沉积物间隙水-上覆水中 DOM 特性分析	李超男, 何杰, 朱学惠, 李学艳 (267)
苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征	叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 武宇圣, 黄天寅 (277)
信号分子强化改性挂膜沸石持续抑制沉积物中氨氮释放	徐金兰, 许洋, 李修民, 国森, 刘成海 (285)
三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响	田盼, 李亚莉, 李莹杰, 李虹, 王丽婧, 宋林旭, 纪道斌, 赵星星 (295)
李家水库春季分层期 nirS 型反硝化菌群特征分析	梁伟光, 黄廷林, 张海涵, 杨尚业, 刘凯文, 李程遥, 温成成, 李伟涛, 蔡晓春 (306)
岗南水库沉积物好氧反硝化菌群落时空分布特征	张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓 (314)
宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评估	王晓东, 田伟, 张雪艳 (329)
快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素;以珠江三角洲为例	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 李备 (339)
长三角一体化示范区青浦区水环境中 22 种 PPCPs 的多介质分布特征及风险评估	张智博, 段艳平, 沈嘉豪, 俞文韬, 罗鹏程, 涂耀仁, 高峻 (349)
洞庭湖及入湖河流中 209 种多氯联苯同类物分布特征与风险评估	黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 崔婷婷, 赵兴茹 (363)
基于流量和溶存浓度的河流水系氧化亚氮释放量估算	李冰清, 胡敏鹏, 王铭烽, 张育福, 吴昊, 周佳, 吴铭彬, 戴之舟, 陈丁江 (369)
三峡库区万州段河流水-气界面 CO ₂ 通量支干流对比及影响机制初探	秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏 (377)
功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对重金属废水中 Pb ²⁺ 的吸附行为	廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱廷省, 任嗣利 (387)
铁氮共掺杂生物炭对二级水溶解性有机物的吸附特性与长效性评价	吴晨曦, 许路, 金鑫, 石烜, 金鹏康 (398)
沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性	邓翠兰, 邓露, 汪晓军, 陈振国 (409)
温度对 ANAMMOX 生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析	吴珊, 王淑雅, 王芬, 季民 (416)
填料对 ANAMMOX 污泥活性恢复的影响及菌群特征	罗景文, 杨津津, 李绍康, 赵昕宇, 杨一飞, 韩嘉琛, 李翔 (424)
基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析	夏子书, 白一茹, 王幼奇, 高小龙, 阮晓晗, 钟艳霞 (432)
浙中典型硫铁矿农田土壤重金属含量特征及健康风险	成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰 (442)
农产品视角的城郊黑土地农田重金属风险分区	吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉 (454)
基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素	宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌 (463)
调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应	李林峰, 王艳红, 李义纯, 唐明灯, 李奇, 艾绍英 (472)
设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估	董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 (481)
电子垃圾拆解固废-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估	张亚萍, 吕占禄, 王先良, 张峰, 郭凌川, 丁秀丽, 张金良 (490)
雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评估	梁晓晖, 解启来, 郑芊, 杨北辰, 叶金明, 唐成金 (500)
重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响	郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕 (510)
长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响	吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 梁彩群, 陈佳瑞, 王国梁, 刘国彬 (521)
土地利用变化后不同种植年限香榧土壤微生物群落的组成及多样性	姜宽雯, 梁辰飞, 张勇, 蒋仲龙, 董佳琦, 吴家森, 傅伟军 (530)
化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响	杨文娜, 余添, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 徐曼, 王子芳, 高明 (540)
秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征	薛悦, 康海斌, 杨航, 冰德叶, 晁志, 张凯, 王得祥 (550)
全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响	闵文豪, 王春丽, 王莉玮, 易廷辉, 卞京军, 支梅, 孙琪惠, 宿锦锦, 赵秀兰 (560)
秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响	万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 白鹤, 杨学云, 顾江新 (569)

运城市 PM_{2.5} 时空分布特征和潜在源区季节分析

王斌涛¹, 张强^{1*}, 温肖宇¹, 窦乃超¹, 赵文婷¹, 罗淑贞¹, 陈志¹, 瞿程凯²

(1. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127; 2. 中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 基于2019年3月~2020年2月环境空气质量监测数据, 分析了运城市 PM_{2.5} 污染的时空分布特征, 并利用 HYSPLIT 后向轨迹模型和聚类分析等方法探讨不同季节运城市 PM_{2.5} 污染的输送路径和潜在源区。结果表明, 运城市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 冬季最高 (111.24 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 夏季最低 (30.02 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 秋冬季均大于 0.6, 表明运城市秋冬两季颗粒物污染以细颗粒物为主; 空间上 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 年均值呈现北部和中部高、东部和西部低的分布特征, 高值区 PM_{2.5} 与 SO₂、NO₂ 和 CO 呈显著强相关, 表明本地排放对高值区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 影响较大, 春季和冬季最高值分别位于河津市 (58.50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和稷山县 (142.33 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 夏季最高值位于南部的平陆县 (36.92 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 秋季则为中部的盐湖区 (62.94 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。输送分析表明, 春季和冬季主要受西北向输送气团的影响, 其占比可达 58.69% 和 55.77%, 夏季主要为偏东和偏南向气团, 秋季来自河南西南部的短距离输送气团污染占比最大, 为 32.89%; 潜在源区范围春夏最小, 秋季开始变大, 冬季范围最广且贡献最大, 最主要源区春夏位于河南西部和中部, 秋冬集中在陕西、河南和山西这 3 省交界区域以及陕西西部。

关键词: PM_{2.5}; 时空分布; 后向轨迹; 输送路径; 潜在源区

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0074-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202104154

Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of PM_{2.5} in Yuncheng City

WANG Yun-tao¹, ZHANG Qiang^{1*}, WEN Xiao-yu¹, DOU Nai-chao¹, ZHAO Wen-ting¹, LUO Shu-zhen¹, CHEN Zhi¹, QU Cheng-kai²

(1. College of Urban and Environmental Science, Northwestern University, Xi'an 710127, China; 2. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The spatiotemporal distribution characteristics of PM_{2.5} pollution in Yuncheng City were analyzed based on the ambient air quality monitoring data from March 2019 to February 2020, and the hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectory (HYSPLIT) and cluster analysis were used to discuss the contamination transportation pathway and the distribution of potential pollution sources affecting PM_{2.5} in Yuncheng City in different seasons. The results showed that the PM_{2.5} concentration in Yuncheng was the highest in winter (111.24 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) and the lowest in summer (30.02 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ was greater than 0.6 in autumn and winter, indicating that the particulate matter pollution in Yuncheng City in autumn and winter was mainly fine particulate matter; spatially, the annual mean value of PM_{2.5} presented distribution characteristics that were high in the northern and central regions and low in the eastern and western regions. The high-value areas of PM_{2.5} were significantly and strongly correlated with SO₂, NO₂, and CO, indicating that local emissions contributed to the high values. The highest values in spring and winter were located in Hejin City (58.50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) and Jishan County (142.33 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), and the highest values in summer and autumn were located in Pinglu County (36.92 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) and the Salt Lake area (62.94 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), respectively. Transportation analysis showed that spring and winter were mainly affected by air masses transporting northwestward, accounting for 58.69% and 55.77%. In summer, air masses were mainly eastward and southward, and in autumn, pollution was from short-distance transport air masses from southwestern Henan. The largest ratio was 32.89%; the potential source area was the smallest in spring and summer; it then began to grow in autumn, and it was the widest in the winter and had the highest contribution. The main source area in spring and summer was located in western and central Henan, and in autumn and winter, source areas were concentrated at the junction of Shaanxi, Shanxi, and Henan and west of Shaanxi.

Key words: PM_{2.5}; spatiotemporal distribution; backward trajectory; transport pathway; potential source contribution

随着经济和城市化进程的飞速发展,我国面临着严峻的大气污染问题,尤其是细颗粒物(PM_{2.5})污染^[1-3]。有研究表明,PM_{2.5}的时空分布特征存在显著的区域性差异,其主要受本地排放强度^[4]、地形起伏度^[5,6]、植被覆盖度^[7]和气象条件^[8,9]等因素影响。不同区域 PM_{2.5}的首要污染来源也有所差异,如北京为机动车排放源^[10],天津^[11]和郑州^[12]为二次污染源和机动车排放源、南京^[13]为工业源和二次污染源、太原^[14]为二次污染源和燃煤源等。因此,研究 PM_{2.5}本地化的时空特征及其来源对于科学治理当地颗粒物污染起着重要作用。此外,PM_{2.5}又

因其具有空间溢出效应,存在跨区域传输^[15-17],邵玄逸等^[18]的研究发现,北京市和唐山市 PM_{2.5}外来传输贡献可达 48.74% 和 30.67%,主要来自临近局地,西北通道和西南通道的输送;段时光等^[19]利用后向轨迹模型分析了郑州市秋冬季 PM_{2.5}的传输路径和潜在源区,发现京津冀传输通道城市群是郑州

收稿日期: 2021-04-16; 修订日期: 2021-07-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(SQ2019YFC020023); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41807342); 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG-05-32)

作者简介: 王斌涛(1994~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气环境, E-mail: wangyuntao@stumail.nwu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: zhang-qiang@nwu.edu.cn

市 PM_{2.5} 污染的首要贡献源; Kong 等^[20] 的研究利用 PSCF 和 CWT 方法分析发现四川盆地的南部、东南部和东部是成都市 PM_{2.5} 污染的主要源区. 分析区域大气污染输送路径和潜在源区, 研究城市与周边区域的传输影响, 对于区域间大气污染联防联控工作有着重要意义.

本文以汾渭平原典型城市——运城市为研究对象, 汾渭平原产业结构偏重, 能源结构偏煤, 交通运输结构以公路为主, 加上不利于扩散的地形和气象条件, 导致污染形势严峻. 目前, 针对汾渭平原 PM_{2.5} 污染已经开展了较多研究^[21~23]. 李雁宇等^[24] 的研究指出, 汾渭平原东部 PM_{2.5} 浓度白天高晚上低, 周末比周内高 0.2%, 空间上渭南市污染最为严重, 其次为运城市、洛阳市, 三门峡市污染最轻; 黄小刚等^[25] 研究了汾渭平原 PM_{2.5} 污染的地形效应, 发现 PM_{2.5} 污染与地形起伏度存在明显的负空间自相关性, 洛阳盆地和西安至临汾间的冲击平原污染最为严重; 张海东^[26] 的研究发现, 西安冬季 PM_{2.5} 污染的主要潜在源区位于关中地区、山西运城以及河南三门峡、洛阳地区. 运城市位于汾渭平原核心位置, 且处在西安至临汾冲击平原的污染传输带上, 其大气质量好坏对于周边城市有着重要影响, 运城市 2019 年 PM_{2.5} 年均浓度为 61 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 与 2018 年持平, 在汾渭平原城市群中排名从倒 4 降为倒 3, 这表明运城市 PM_{2.5} 污染问题仍然比较突出, 是汾渭平原颗粒物污染最为严重的城市之一^[27]. 已有学者对运城市颗粒物的化学组成^[28] 和来源解析^[29] 做了相关研究, 但是针对运城市 PM_{2.5} 污染的本地化时空分布特征和区域传输影响的研究还较为鲜见.

基于此, 本文结合 2019 年 3 月~2020 年 2 月 PM_{2.5} 浓度监测数据, 分析运城市 PM_{2.5} 污染的时空分布特征, 同时利用 TrajStat 软件提供的聚类分析、潜在源贡献因子分析和浓度权重轨迹分析, 研究运城市不同季节 PM_{2.5} 区域传输特征及其潜在源区, 以期对运城市 PM_{2.5} 治理和减排政策制定提供科学依据, 同时为汾渭平原城市群大气污染联防联控治理提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

运城市位于山西省西南部, 北依吕梁山, 东峙中条山, 西、南与陕西、河南隔黄河相望, 地形以低山、丘陵、平原和黄土地貌为主, 相对海拔差异较大, 气候属暖温带大陆性季风气候, 冬季寒冷干燥, 夏季高温多雨, 年均气温 13℃, 年均降雨 537 mm, 约 50% 降雨量集中在 7~9 月, 受地形和气候因素

影响, 降雨量从东南向西北递减^[30,31]. 综合地形地貌、气候因素、第二产业布局和社会经济发展状况, 本研究将运城市划分为北部地区(新绛、稷山、河津、万荣、闻喜)、西部地区(临猗、永济)、东部地区(垣曲、绛县)、南部地区(夏县、芮城、平陆)和中心城区(盐湖区)五大片区(图 1), 本文在此分区基础上分析 PM_{2.5} 空间分布特征.



图 1 运城市五大片区分区示意

Fig. 1 Divisional schematic diagram of five regions in Yuncheng City

1.2 数据来源

运城市 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 逐小时浓度数据来源于国家空气质量联网监测管理平台 (<http://60.222.230.181:4017>), 对应时段为 2019 年 3 月 1 日至 2020 年 2 月 29 日. 后向轨迹模型 (HYSPLIT) 所用气象场资料来源于 NCEP (美国国家环境预报中心) 提供的 GDAS (全球资料同化系统) 数据 (<ftp://arlftp.arl.hq.noaa.gov/pub/archives/gdas1>), 该数据每日 4 个时次, 分别为 00:00, 06:00, 12:00, 18:00 (UTC, 世界时), 空间分辨率为 1° × 1°. 本研究季节划分春季为 3~5 月, 夏季为 6~8 月, 秋季为 9~11 月, 冬季为 12 月~次年 2 月.

1.3 HYSPLIT 模型

HYSPLIT 模型是由美国国家海洋大气管理中心 (NOAA) 和澳大利亚气象局共同研发的一种用以计算和分析气流运动、沉降以及扩散的专业模型, 可用来分析多种气象要素输入场、多种物理过程以及不同类型污染物的排放源^[32,33], 该模型平流和扩散计算采用拉格朗日方法, 能够直观地表现出气流或粒子的运动轨迹^[34], 被广泛应用于研究大气污染物的传输特征与来源分析.

本研究利用 TrajStat 软件^[35] 对运城市进行后向轨迹计算、聚类统计、PSCF 和 CWT 分析, 将运城市市中心 (35.02°N, 110.99°E) 作为轨迹模拟起始点, 起始高度设置为 300m, 该高度既能够反映区域间气流的流动特征, 又可减少近地面摩擦力对其的

影响^[36]. 每日计算 4 个时次(00:00, 06:00, 12:00, 18:00, UTC), 模拟时长为 24h, 依据 Angle Distance 算法^[37] 和总空间方差 (total spatial variance, TSV)^[38] 的突变点进行聚类, 并结合各季节气流所对应污染物的浓度进行统计分析.

1.4 潜在源贡献因子分析(PSCF)

PSCF 是一种基于 HYSPLIT 后向轨迹终点的受体模型, 可用来识别大气污染物的潜在来源^[39~41]. PSCF 函数基于空间网格进行概率计算, 本文将研究区域按照 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 划分网格, 按文献^[42] 设定 $\rho(\text{PM}_{2.5}) = 75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 为秋冬季阈值, 春夏两季由于污染较轻, 阈值设定为当季日均浓度的 75 分位数^[43], 当轨迹对应的浓度高于此阈值时, 认为该轨迹为污染轨迹. PSCF 值为经过网格 ij 的污染轨迹端点数 m_{ij} 与该网格内所有轨迹端点数 n_{ij} 的比值, 即:

$$\text{PSCF}_{ij} = m_{ij}/n_{ij} \quad (1)$$

由于 PSCF 是一种条件概率, 当网格内轨迹端点数 (n_{ij}) 比较小时, 可能会使计算结果存在较大不确定性, 为此引入权重系数 W_{ij} 来增强其统计平衡以降低误差^[44], 当某一网格内端点数小于研究区内所有网格平均端点数的 2 倍时, 就使用 W_{ij} 乘以 PSCF_{ij} , 即 $\text{WPSCF}_{ij} = W_{ij} \times \text{PSCF}_{ij}$, 权重系数 W_{ij} 定义为^[45]:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.0, & n_{ij} > 2\text{Avg} \\ 0.75, & \text{Avg} < n_{ij} \leq 2\text{Avg} \\ 0.5, & 0.5\text{Avg} < n_{ij} \leq \text{Avg} \\ 0.15, & 0 < n_{ij} \leq 0.5\text{Avg} \end{cases} \quad (2)$$

1.5 浓度权重轨迹分析(CWT)

PSCF 只能反映网格污染轨迹的占比, 并不能体现污染轨迹对于受点的污染贡献. 因此, 本文采用浓

度权重轨迹(CWT)分析法^[46,47] 来计算源区格网的浓度权重, 分析各个轨迹源区对于受点污染的贡献大小, CWT 计算公式为:

$$\text{CWT}_{ij} = \left(\sum_{l=1}^M \tau_{ijl} \right)^{-1} \cdot \sum_{l=1}^M C_l \tau_{ijl} \quad (3)$$

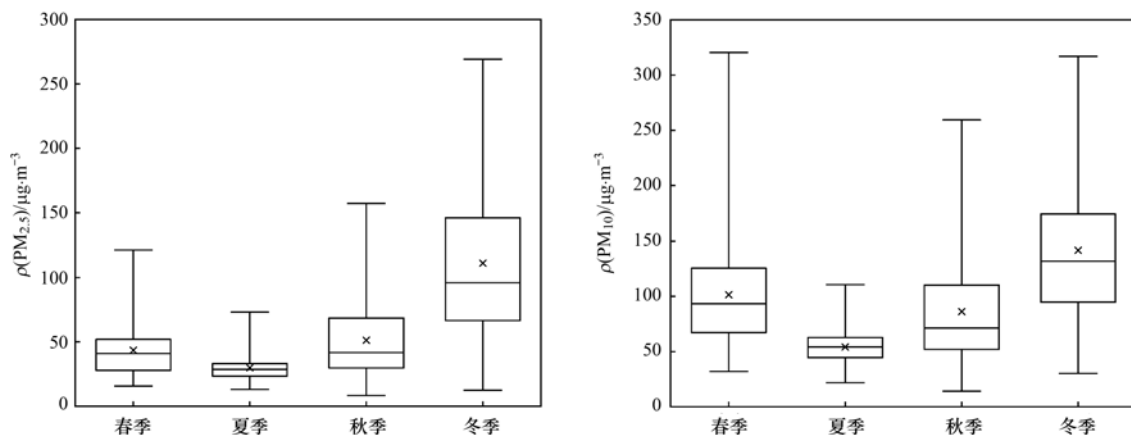
式中, CWT_{ij} 是网格 ij 对应的 $\text{PM}_{2.5}$ 平均权重浓度, l 是轨迹, C_l 是轨迹 l 经过网格 ij 时所对应 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度, τ_{ijl} 为轨迹 l 在网格 ij 内的停留时间(可用网格内轨迹端点数来代替), 为减少误差, CWT 同样适用 PSCF 引用的权重系数 W_{ij} , 即:

$$\text{WCWT}_{ij} = W_{ij} \times \text{CWT}_{ij}$$

2 结果与讨论

2.1 颗粒物浓度时间分布特征

2019 年 3 月 ~ 2020 年 2 月, 运城市颗粒物污染较为严重, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 年均值为 $58.95 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $\rho(\text{PM}_{10})$ 年均值为 $95.86 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 分别比文献^[42] 中年均值二级浓度限值高 68% 和 36.94%, 分别高出汾渭平原年均值 10.55% 和 4.72%, 高出山西省年均值 27.32% 和 8.06%, $\text{PM}_{2.5}$ 污染较 PM_{10} 更为严重. 由图 2 和图 3 可知, 不同季节颗粒物浓度差异较大. $\rho(\text{PM}_{10})$ 表现为冬季高, 夏季低, 春秋居中且相差不大的季节特征, 四季大小为: 冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季, 浓度依次为 141.85、101.55、86.26 和 $54.18 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 表现为冬季最高, 夏季最低, 秋季大于春季的季节特征, 四季大小为: 冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季, 浓度依次为 111.24、51.36、43.67 和 $30.02 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 从月份来看, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 1 月最高, 可达 $135.92 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 7 月最低, 为 $28.93 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $\rho(\text{PM}_{10})$ 1 月最高, 为 $161.29 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 8 月最低, 为 $52.07 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 最高值出现在



上下短横线分别代表最大和最小浓度, 矩形代表位于 25% 下四分位数和 75% 上四分位数之间的浓度,

矩形中的 × 号和横线分别代表均值和中位数

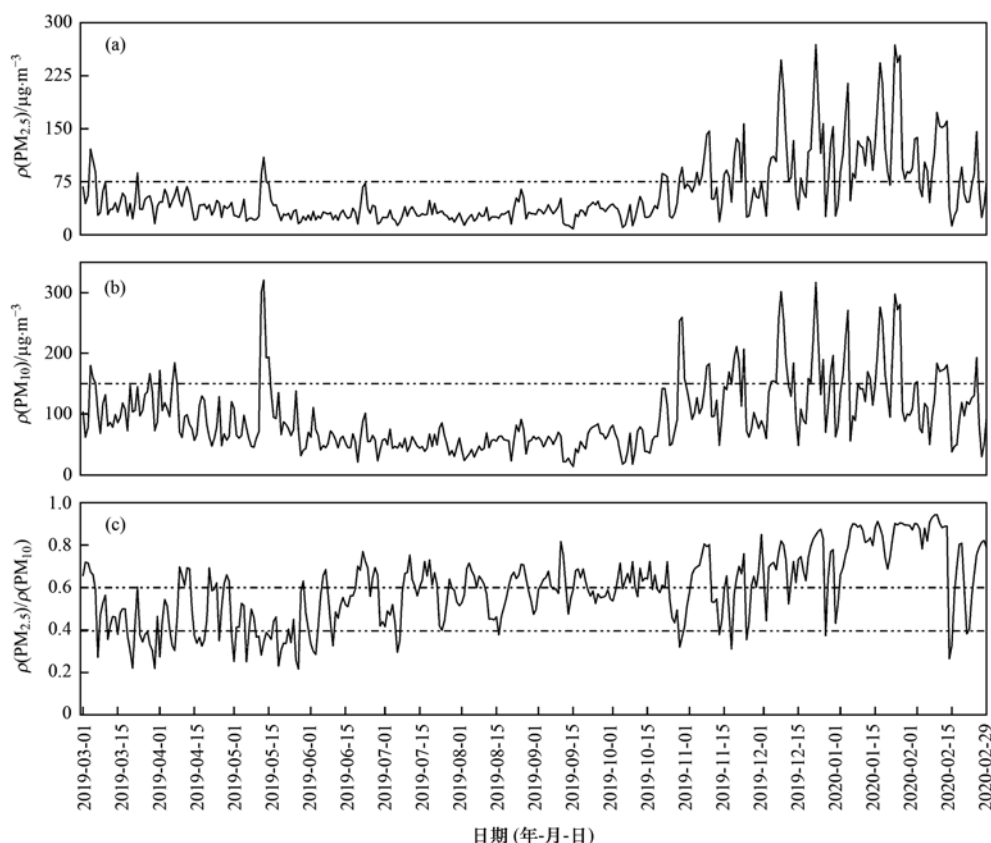
图 2 运城市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 季节变化特征

Fig. 2 Seasonal changes in $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} in Yuncheng City

12月22日,为 $269.20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,当日 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 达到 0.90,细颗粒物污染严重, $\rho(PM_{10})$ 最高值出现在5月13日,为 $320.50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,当日 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 为 0.28,主要为粗颗粒物污染.此外,10月至次年2月之间颗粒物污染持续时间长,波动剧烈,这是由于采暖期化石燃料的大量使用增大了污染物的排放量,加之运城市冬季高湿静稳天气频发,不利于污染物的扩散,容易形成区域持续性污染.

$PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 的比值可以反映区域内大气细颗

粒物与粗颗粒物的占比,运城市 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 季节均值变化特征为:冬季(0.76) > 秋季(0.61) > 夏季(0.56) > 春季(0.45),秋冬季 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 均大于 0.6,说明这两个季节细颗粒物污染更为严重.从图 3(c) 可以明显看出,运城市 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 小于 0.4 的主要集中在 3~6 月之间,说明运城市春夏两季粗颗粒物污染事件较多,而且从春到冬, $PM_{2.5}/PM_{10}$ 呈逐渐上升趋势,细颗粒物污染随季节逐渐严重.



图(a)和(b)中虚线为环境空气质量标准日均值二级浓度限值,(c)中虚线为分界线

图3 运城市 $PM_{2.5}$, PM_{10} 和 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 逐日变化特征

Fig. 3 Daily variations of $PM_{2.5}$, PM_{10} and $PM_{2.5}/PM_{10}$ in Yuncheng City

2.2 $PM_{2.5}$ 空间分布特征

为分析运城市 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布特征,本研究对2019年运城市区及所属区县共29个站点的 $PM_{2.5}$ 年均值和季节均值进行了空间插值,结果见图4,插值采用 Arcgis 克里金插值法(Kriging)^[48],该方法可较好地表征大气污染物的空间分布特征^[49].同时考虑到各个污染物之间的协同性,也分别做了 SO_2 、 NO_2 、 CO 和 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 年均值的空间分布,结果见图5.

由图4可知,运城市 $PM_{2.5}$ 年均值呈现北部和中部高,东部和西部低的污染特征,北部新稷河一带 $\rho(PM_{2.5})$ 最高,区间可达 $62.58 \sim 72.66 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,西部垣曲县 $PM_{2.5}$ 污染最轻, $\rho(PM_{2.5})$ 为 37.11

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

Pearson 相关性分析可知(表1),运城市 $PM_{2.5}$ 与 SO_2 、 NO_2 、 CO 和 PM_{10} 均为显著正相关关系($P < 0.01$),尤其是北部地区和中心城区,其 $PM_{2.5}$ 与 SO_2 、 NO_2 和 CO 相关性均在 0.6 以上,属于强相关, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 相关性高达 0.918 和 0.878,属极强相关,这表明该区域 $PM_{2.5}$ 与 SO_2 、 NO_2 、 CO 和 PM_{10} 具有强同源性. SO_2 和 CO 来自于工业排放和化石燃料的燃烧, NO_2 主要来源于汽车尾气排放^[50],如图5(a)~5(c)所示, SO_2 、 NO_2 和 CO 高值区均集中在北部地区,这是由于运城北部属于工业区,分布着大量冶金、发电、建材和石油化工等高排放企业,化石燃料使用量大,而且原辅料、燃料和产品都是通

过重型柴油车公路运输,污染物排放量大,加之北部地区和中心城区属于盆地,地势较低,年平均风速较小,不利于污染物扩散,导致 $\text{PM}_{2.5}$ 污染严重. 而东部和西南部属于山区地形,产业主要以农、林业为主,污染物排放少,加之山脉阻挡作用,区域传输较少,所以 $\text{PM}_{2.5}$ 污染较轻.

此外,由图 5(d) 可知,北部地区和中心城区 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 相对较小,这说明该区域粗颗粒物污染更为严重, PM_{10} 不仅受人为源排放影响,还与沙尘传输有关^[16],该区域位于西安-临汾冲击平原的中心位置,易受到来自西安、咸阳、渭南和临汾等地沙尘的传输.

表 1 运城市 $\text{PM}_{2.5}$ 与 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 PM_{10} 的 Pearson 相关系数¹⁾

Table 1 Pearson's correlation coefficient between $\text{PM}_{2.5}$,

SO_2 , NO_2 , CO , and PM_{10} in Yuncheng City				
地区	SO_2	NO_2	CO	PM_{10}
北部地区	0.698 **	0.683 **	0.869 **	0.918 **
东部地区	0.215 **	0.381 **	0.733 **	0.774 **
西部地区	0.589 **	0.663 **	0.699 **	0.859 **
南部地区	0.471 **	0.541 **	0.754 **	0.799 **
中心城区	0.622 **	0.636 **	0.790 **	0.878 **

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

运城市 $\text{PM}_{2.5}$ 空间分布季节变化如图 6 所示. 春季运城市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 主要分布在 $34.03 \sim 58.50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,高值区集中在北部地区,与年均值分

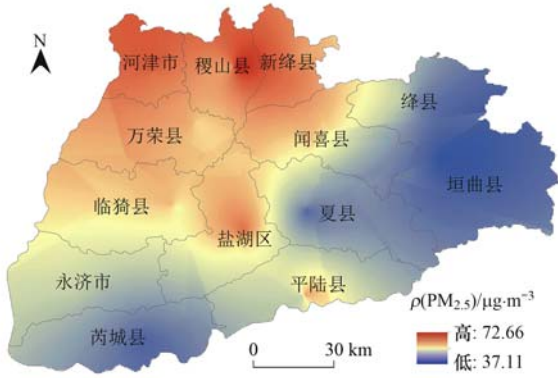


图 4 运城市年均 $\text{PM}_{2.5}$ 空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution of average annual mass concentration of $\text{PM}_{2.5}$ in Yuncheng City

布相比,盐湖区污染相对较轻,这可能是由于采暖期结束,本地排放量降低,再加上春季来自西北方位的气团传输距离较长,风力损耗严重,对盐湖区传输较少. 夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 空间分布与春季大体一致,但污染较轻,除去平陆县 ($36.92 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 之外, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均低于国家一级限值,这是由于夏季温度上升,大气热力条件增强,加剧大气湍流的交换,有利于污染物的扩散^[51]. 而平陆县 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 较高可能是受到了三门峡和洛阳等地的传输影响,由于其地处中条山脉间的峡口处,从后文气流传输结果来看,来自东南部的气团都是经此峡口进入运城. 秋季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 主要分布在 $32.72 \sim 62.94 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,较夏季污染加重,

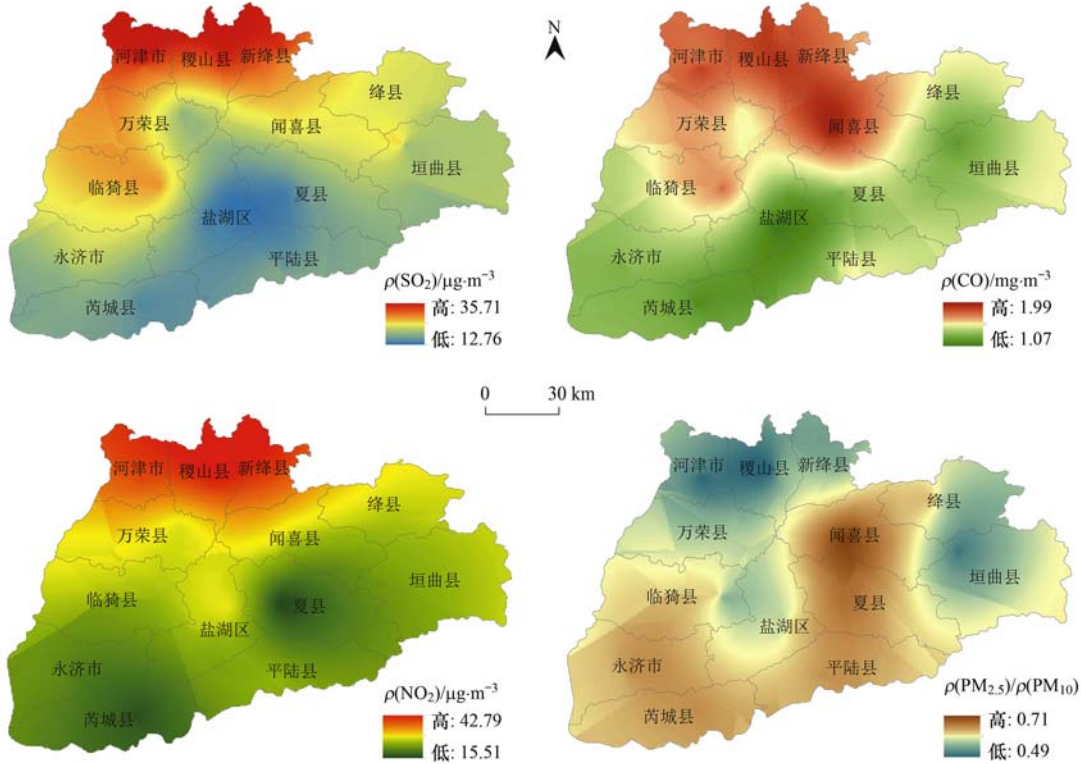
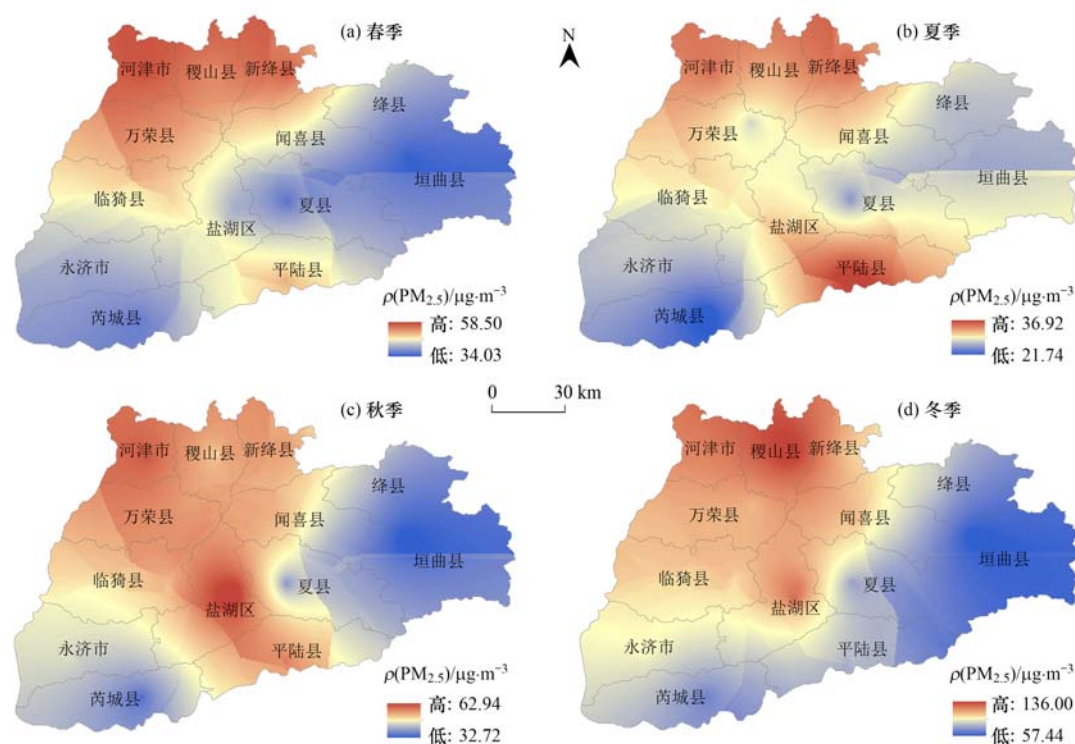


图 5 运城市年均 CO 、 SO_2 、 NO_2 、 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 空间分布特征

Fig. 5 Spatial distribution of average annual mass concentration of CO , SO_2 , NO_2 , and $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ in Yuncheng City

图6 运城市 $PM_{2.5}$ 空间分布季节特征Fig. 6 Seasonal characteristics of $PM_{2.5}$ spatial distribution in Yuncheng City

空间上与春夏相比,盐湖区转为高值区,这可能是由于秋季来自洛阳和三门峡的污染气团与本地排放相互影响,加之盐湖区地处运城盆地海拔最低处,周边山地环绕,扩散条件差,导致污染物累积.冬季 $PM_{2.5}$ 高值区分布与年均相似,主要为北部地区和中心城区, $\rho(PM_{2.5})$ 分布在 $57.44 \sim 136.00 \mu g \cdot m^{-3}$ 之间,污染最为严重,主要是由于冬季气温较低,相对湿度较大, $PM_{2.5}$ 二次转化和累积严重,而且风力较弱,不利于污染物扩散.

2.3 输送路径特征

为研究运城市大气 $PM_{2.5}$ 各季节输送路径特征,本研究采用 HYSPLIT 模型计算了运城市 ($35.02^{\circ}N$, $110.99^{\circ}E$) 2019 年 3 月 1 日至 2020 年 2 月 29 日每 6h 后向轨迹,通过总空间方差法 (TSV) 将后向轨迹气团按季节分别聚类为 4、4、5 和 4 类 (图 7),为进一步量化表征各气流轨迹的污染物浓度特征,将运城市 $PM_{2.5}$ 逐日小时浓度与气团轨迹相结合进行统计分析 (表 2).

分析图 7 和表 2 可知,不同季节聚类轨迹出现概率、途经区域、污染浓度和季节占比均存在明显差异.春季来自宁夏东部,途经甘肃东北部、陕西北部、铜川和渭南到达运城的轨迹 2 出现概率和污染轨迹占比均最大,分别为 34.51% 和 28.57%,但是其平均 $\rho(PM_{2.5})$ 和污染轨迹浓度均最低,分别为 $38.48 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $67.84 \mu g \cdot m^{-3}$,来自陕西南部,途

经三门峡到达运城的轨迹 3 为短距离输送气团,移动速度慢,不利于污染物扩散,导致其污染轨迹占比和浓度均较高,分别为 28.57% 和 $75.41 \mu g \cdot m^{-3}$,污染轨迹浓度最高的是来自内蒙古中部,经陕西北部、临汾到达运城的轨迹 4,浓度可达 $82.72 \mu g \cdot m^{-3}$,其出现概率和污染轨迹季节占比分别为 24.11% 和 24.18%.夏季主要以短距离输送为主,来自河南西南部,经洛阳和三门峡进入运城的轨迹 3 为主要聚类,出现概率为 36.68%,污染轨迹占比 35.11%,污染轨迹浓度最高的是起自山西南部,途经河南西北部、洛阳和三门峡到达运城的轨迹 2,浓度为 $53.15 \mu g \cdot m^{-3}$,其污染轨迹季节占比也最高,为 43.62%.与其他季节相比,夏季到达运城的各气团携带的 $\rho(PM_{2.5})$ 低,气团较为清洁.秋季来自河南的轨迹占比最大,总共可达 51.10%,其中来自河南西南部,途经洛阳和三门峡的轨迹 1 污染轨迹占比和浓度最高,分别为 32.89% 和 $120.22 \mu g \cdot m^{-3}$,来自铜川和渭南的轨迹 2 污染轨迹占比及其污染浓度分别为 22.37% 和 $108.02 \mu g \cdot m^{-3}$,污染程度仅次于轨迹 1.冬季来自内蒙古南部,途经陕西北部、渭南到达运城的轨迹 1 为主要聚类,出现概率高达 33.24%,污染轨迹占比 28.03%,其污染轨迹浓度较高,为 $146.95 \mu g \cdot m^{-3}$,来自甘肃东北部,途经铜川和渭南的轨迹 4 平均 $\rho(PM_{2.5})$ 和轨迹浓度最高,分别为 $127.44 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $153.14 \mu g \cdot m^{-3}$,其污染轨迹占比

为 26.36%, 仅次于轨迹 1.

综上, 运城市春冬两季源自内蒙古和宁夏等地的西北向气团占比最高, 分别为 58.69% 和 55.77%, 且轨迹污染最为严重, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 最高可达 $82.72\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $153.14\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 夏季主要受偏东

和偏南气团的影响, 气团较为清洁, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 处于 $26.57\sim35.58\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 相对污染程度较高的气团来自山西南部 and 河南西南部, 秋季来自河南西南部的气团污染占比最大, 为 32.89%, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 最高, 可达 $120.22\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

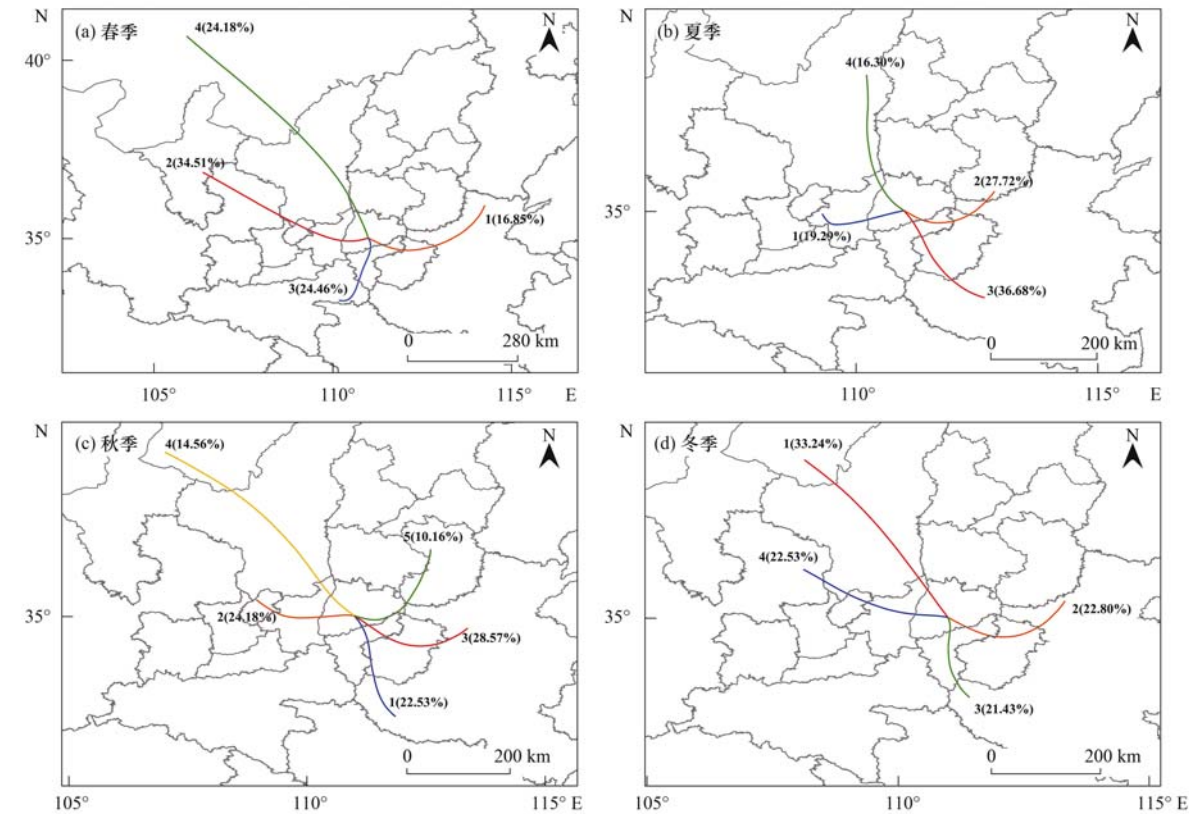


图 7 运城市不同季节后向轨迹聚类分布

Fig. 7 Backward trajectory clusters in different seasons in Yuncheng City

表 2 四季各类轨迹路径及出现概率和对应的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度统计分析结果

Table 2 Statistical analysis results of all types of trajectory paths, occurrence probability, and $\text{PM}_{2.5}$ concentration in all tracks in the four seasons

季节	轨迹编号	途经区域	所有轨迹		污染轨迹	
			出现概率/%	$\rho(\text{PM}_{2.5})$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	季节占比 ¹⁾ /%	$\rho(\text{PM}_{2.5})$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
春	1	豫北、洛阳和三门峡	16.85	44.70	18.68	75.04
	2	宁东、甘东北、铜川和渭南	34.51	38.48	28.57	67.84
	3	陕南和三门峡	24.46	45.29	28.57	75.41
	4	蒙中、陕北和临汾	24.11	44.66	24.18	82.72
夏	1	渭南	19.29	26.57	13.83	41.48
	2	晋南、豫西北、洛阳和三门峡	27.72	35.58	43.62	53.15
	3	豫西南、洛阳和三门峡	36.68	30.00	35.11	43.98
	4	陕北和渭南	16.30	25.06	7.45	42.51
秋	1	豫西南、洛阳和三门峡	22.53	41.93	32.89	120.22
	2	铜川和渭南	24.18	34.18	22.37	108.02
	3	豫北、洛阳和三门峡	28.57	26.98	21.05	96.25
	4	蒙南、陕北和渭南	14.56	35.05	14.47	100.96
	5	晋南	10.16	27.15	9.21	90.36
冬	1	蒙南、陕北和渭南	33.24	98.94	28.03	146.95
	2	豫北、洛阳和三门峡	22.80	105.36	19.25	151.32
	3	豫西和三门峡	21.43	119.67	26.36	133.31
	4	甘东北、铜川和渭南	22.53	127.44	26.36	153.14

1) 黑体字为主要污染轨迹(季节占比>20%)

2.4 污染潜在源区分析

在输送路径分析的基础上,利用 TrajStat 软件对运城市 $\text{PM}_{2.5}$ 进行潜在源分析(WPSCF),计算结果见图 8.将 WPSCF 大于 0.7 的区域作为受点污染

最主要的潜在源区.

由图 8 可知,运城市 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染潜在源区季节差异明显.春季最主要的污染源区分布在湖北西北部和河南中部,其次,在洛阳市西南部、临汾市南

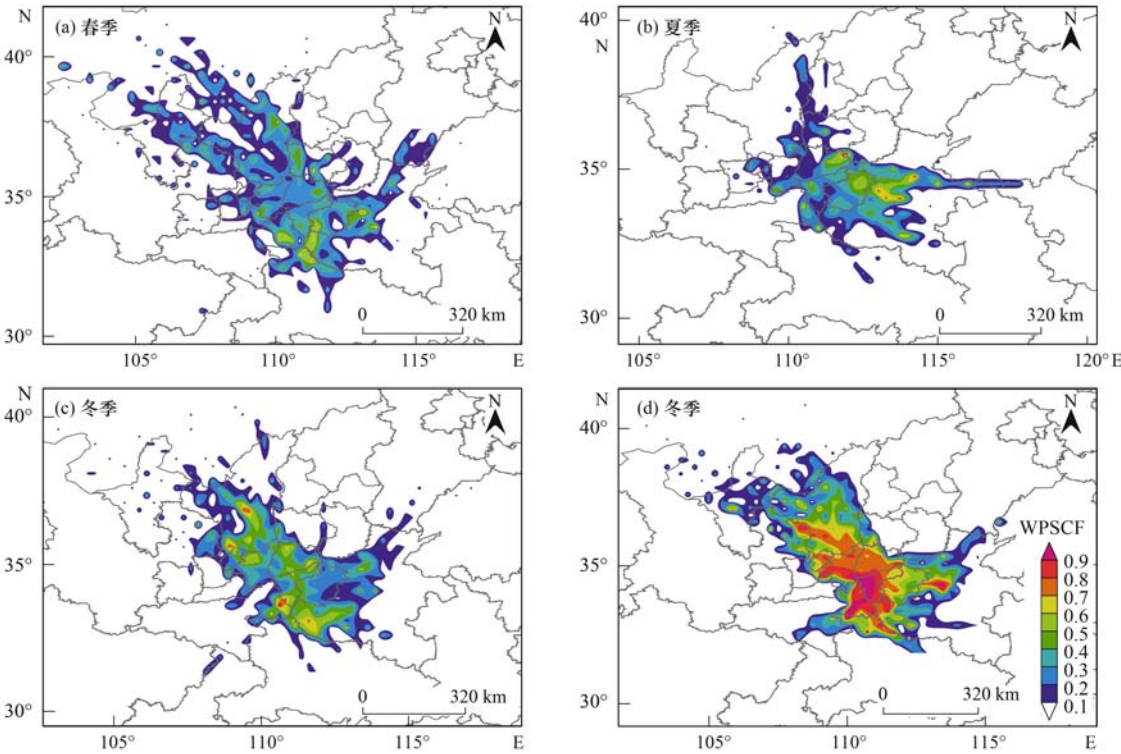


图 8 运城市 $\text{PM}_{2.5}$ 潜在源贡献四季分布
Fig. 8 Potential source contribution function maps of $\text{PM}_{2.5}$ in four seasons in Yuncheng City

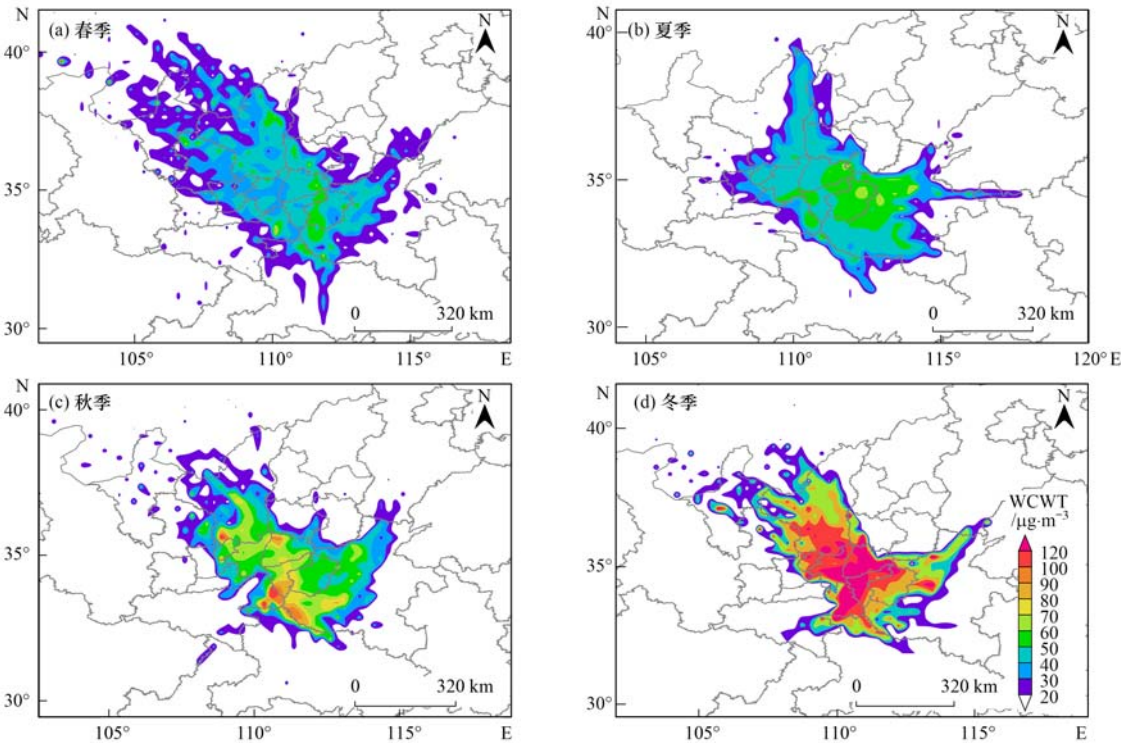


图 9 运城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度权重轨迹四季分布
Fig. 9 Concentration weighted trajectory analysis maps of $\text{PM}_{2.5}$ in four seasons in Yuncheng City

部也存在着零星高值区. 夏季 WPSCF 高值主要分布在运城本地、河南的中部和东部. 秋季 WPSCF 高值区主要分布在陕西的北部、西部以及东南部与三门峡市交界区域、河南的西南部. 冬季 WPSCF 大于 0.7 的范围明显增大, 高值区主要集中在陕西、河南和山西这 3 省交界区域、陕西西部、甘肃东北部、宁夏中部和河南东部.

为了进一步探讨源区对运城市 $PM_{2.5}$ 的污染贡献程度并验证 WPSCF 分析结果, 对其进行了浓度权重轨迹计算 (WCWT), 结果见图 9, WCWT 值越大代表着对受点的污染贡献越大, 本文将 WCWT 值大于 $75 \mu g \cdot m^{-3}$ 的区域定义为主要贡献区.

由图 9 可知, WCWT 分析结果与 WPSCF 分析结果相似. 春季和夏季 WCWT 值基本都小于 $75 \mu g \cdot m^{-3}$, 春季相对高值区域主要分布在陕西东南部、河南南部和山西西南部等区域, 内蒙古南部和宁夏西北部也存在零星高值区, 夏季相对高值区主要分布在河南中部、运城本地和洛阳市东北部. 秋季 WCWT 值大于 $75 \mu g \cdot m^{-3}$ 主要集中在运城本地、三门峡市、陕西的西部和东南部, 在湖北的北部和河南的南部也存在着零星的 WCWT 大于 $90 \mu g \cdot m^{-3}$ 的区域. 在冬季, WCWT 值普遍超过其它季节且大于 $120 \mu g \cdot m^{-3}$ 的范围最大, 主要集中在陕西、河南和山西这 3 省交界区域, 此外, 湖北的西北部、河南的中部和北部、陕西的西北部、甘肃东北部和宁夏中部等零星区域 WCWT 值也大于 $100 \mu g \cdot m^{-3}$, 对于运城市冬季 $PM_{2.5}$ 有着显著影响.

3 结论

(1) 时间分布特征上, 运城市 $\rho(PM_{2.5})$ 和 $\rho(PM_{10})$ 冬季最高, 分别为 $111.24 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $141.85 \mu g \cdot m^{-3}$, 夏季最低, 春秋居中且相差不大. $PM_{2.5}/PM_{10}$ 季节均值冬季 (0.76) > 秋季 (0.61) > 夏季 (0.56) > 春季 (0.45). 秋冬季颗粒物污染主要以细颗粒物为主, $PM_{2.5}/PM_{10}$ 日均值小于 0.4 的主要集中在 3~6 月, 春夏季粗颗粒物污染事件较多.

(2) 空间分布特征上, 运城市年均 $PM_{2.5}$ 呈现北部和中部高, 东部和西部低的污染特征, 新稷河一带污染最重, $\rho(PM_{2.5})$ 为 $72.66 \mu g \cdot m^{-3}$, 西部垣曲县污染最轻, $\rho(PM_{2.5})$ 为 $37.11 \mu g \cdot m^{-3}$, 高值区 $PM_{2.5}$ 与 SO_2 、 NO_2 和 CO 呈显著强相关, 本地排放对高值区 $PM_{2.5}$ 影响较大; 季节分布特征与年分布有所差异, 春季中心城区污染较轻, 夏季 $\rho(PM_{2.5})$ 均值最低, 为 $28.95 \mu g \cdot m^{-3}$, 南部平陆县污染相对最重, 秋季中心城区转为高值区且 $\rho(PM_{2.5})$ 相对最高, 可达

$62.94 \mu g \cdot m^{-3}$, 冬季污染最为严重, $\rho(PM_{2.5})$ 分布在 $57.44 \sim 136.00 \mu g \cdot m^{-3}$ 之间, 高值区与年分布一致, 集中在北部地区和中心城区.

(3) 输送路径分析结果表明, 西北向气团是影响运城市春季和冬季污染的主要气团, 其季节占比分别为 58.69% 和 55.77%, $\rho(PM_{2.5})$ 最高可达 $82.72 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $153.14 \mu g \cdot m^{-3}$, 夏季主要受偏东和偏南气团的影响, 气团较为清洁, 相对污染程度较高的气团来自山西南部 and 河南西南部, 秋季来自河南西南部的气团污染占比最大, 为 32.89%, $\rho(PM_{2.5})$ 最高, 可达 $120.22 \mu g \cdot m^{-3}$.

(4) PSCF 和 CWT 分析结果表明, 运城市 $PM_{2.5}$ 潜在源区存在明显的季节特征. 主要贡献源区范围春夏最小, 秋季开始变大, 冬季范围最广且贡献最大. 春季主要源区位于陕西东南部、河南中部和西南部与湖北接壤区域, 夏季主要位于河南中部和东部区域, 秋季主要位于河南西南部、陕西西部和东南部, 冬季则主要集中在陕西、河南和山西这 3 省交界区域以及河南中部和陕西西部.

参考文献:

- [1] Zhang Y, Shen L Y, Shuai C Y, *et al.* How is the environmental efficiency in the process of dramatic economic development in the Chinese cities? [J]. *Ecological Indicators*, 2019, **98**: 349-362.
- [2] Cao S S, Zhao W J, Guan H L, *et al.* Comparison of remotely sensed $PM_{2.5}$ concentrations between developed and developing countries: Results from the US, Europe, China, and India [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **182**: 672-681.
- [3] Li Y, Liao Q, Zhao X G, *et al.* Premature mortality attributable to $PM_{2.5}$ pollution in China during 2008-2016: Underlying causes and responses to emission reductions [J]. *Chemosphere*, 2021, **263**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127925.
- [4] 杨文涛, 譙鹏, 刘贤赵, 等. 2011~2017 年中国 $PM_{2.5}$ 多尺度时空分异特征分析 [J]. *环境科学*, 2020, **41** (12): 5236-5244.
- [5] Yang W T, Qiao P, Liu X Z, *et al.* Analysis of multi-scale spatio-temporal differentiation characteristics of $PM_{2.5}$ in China from 2011 to 2017 [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (12): 5236-5244.
- [6] 李梦真, 张廷斌, 易桂花, 等. 四川盆地 $PM_{2.5}$ 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析 [J]. *环境科学*, 2021, **42** (7): 3136-3146.
- [7] Li M Z, Zhang T B, Yi G H, *et al.* Spatio-temporal variation characteristics monitored by remotely sensed technique of $PM_{2.5}$ concentration and its influencing factor analysis in Sichuan basin, China [J]. *Environmental Science*, 2021, **42** (7): 3136-3146.
- [8] 张波, 宋国君, 周芳. 基于 $PM_{2.5}$ 监测点空间聚类的关中五市空气污染区域识别 [J]. *环境科学学报*, 2021, **41** (3): 797-805.
- [9] Zhang B, Song G J, Zhou F. Regional delimitation of $PM_{2.5}$ pollution: A case study of five cities in Guanzhong Plain [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41** (3): 797-805.
- [10] 刘海猛, 方创琳, 黄解军, 等. 京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析 [J]. *地理学报*, 2018, **73** (1): 177-

191.
Liu H M, Fang C L, Huang J J, *et al.* The spatial-temporal characteristics and influencing factors of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(1): 177-191.
- [8] Liu Y L, Shi G M, Zhan Y, *et al.* Characteristics of PM_{2.5} spatial distribution and influencing meteorological conditions in Sichuan Basin, southwestern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **253**(12), doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118364.
- [9] 丁净, 唐颖潇, 郝天依, 等. 天津市冬季空气湿度对 PM_{2.5} 和能见度的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5143-5151.
Ding J, Tang Y X, Hao T Y, *et al.* Impact of air humidity on PM_{2.5} mass concentration and visibility in winter of Tianjin[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5143-5151.
- [10] Gao J J, Wang K, Wang Y, *et al.* Temporal-spatial characteristics and source apportionment of PM_{2.5} as well as its associated chemical species in the Beijing-Tianjin-Hebei region of China[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **233**: 714-724.
- [11] 肖致美, 徐虹, 李立伟, 等. 基于在线观测的天津市 PM_{2.5} 污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4355-4363.
Xiao Z M, Xu H, Li L W, *et al.* Characterization and source apportionment of PM_{2.5} based on the online observation in Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4355-4363.
- [12] 赵孝因, 王申博, 杨洁茹, 等. 郑州市 PM_{2.5} 组分、来源及其演变特征[J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3633-3643.
Zhao X N, Wang S B, Yang J R, *et al.* Chemical component and source of PM_{2.5} and their evolutive characteristics in Zhengzhou [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3633-3643.
- [13] 贺瑶, 韩秀秀, 黄晓虎, 等. 南京市不同功能区冬季大气 PM_{2.5} 分布特征及其来源解析[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(3): 830-841.
He Y, Han X X, Huang X H, *et al.* Distribution characteristics and source apportionment of atmospheric PM_{2.5} in winter season from different functional areas of Nanjing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(3): 830-841.
- [14] 任娇, 尹诗杰, 郭淑芬. 太原市大气 PM_{2.5} 中水溶性离子的季节污染特征及来源分析[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(9): 3120-3130.
Ren J, Yin S J, Guo S F. Seasonal variation and source analysis of water-soluble ions in PM_{2.5} in Taiyuan [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(9): 3120-3130.
- [15] 李颜君, 安兴琴, 范广洲. 北京地区大气颗粒物输送路径及潜在源分析[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(3): 915-927.
Li Y J, An X Q, Fan G Z. Transport pathway and potential source area of atmospheric particulates in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(3): 915-927.
- [16] 刘娜, 余晔, 马学谦. 西宁市大气污染源和输送季节特征[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1268-1279.
Liu N, Yu Y, Ma X Q. Seasonal Characteristics of air pollutant sources and transport pathways in Xining City [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1268-1279.
- [17] 雷雨, 张小玲, 康平, 等. 川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(7): 3021-3030.
Lei Y, Zhang X L, Kang P, *et al.* Analysis of transport pathways and potential sources of atmospheric particulate matter in Zigong, in south of Sichuan Province [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3021-3030.
- [18] 邵玄逸, 王晓琦, 钟巍盛, 等. 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[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4095-4103.
Shao X Y, Wang X Q, Zhong Y S, *et al.* Impacts of anthropogenic emission reduction and meteorological conditions on PM_{2.5} pollution in typical cities of Beijing-Tianjin-Hebei in winter [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4095-4103.
- [19] 段时光, 姜楠, 杨留明, 等. 郑州市冬季大气 PM_{2.5} 传输路径和潜在源分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 86-93.
Duan S G, Jiang N, Yang L M, *et al.* Transport pathways and potential sources of PM_{2.5} during the winter in Zhengzhou [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 86-93.
- [20] Kong L W, Tan Q W, Feng M, *et al.* Investigating the characteristics and source analyses of PM_{2.5} seasonal variations in Chengdu, Southwest China [J]. *Chemosphere*, 2019, **243**: 125267.
- [21] 徐丹妮, 王瑾婷, 袁自冰, 等. 汾渭平原复杂地形影响下冬季 PM_{2.5} 污染分布特征、来源及成因分析[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(4): 1184-1198.
Xu D N, Wang J T, Yuan Z B, *et al.* Temporal-spatial variations, source apportionment, and formation mechanisms of PM_{2.5} pollution over Fenwei Plain, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(4): 1184-1198.
- [22] 郭庆元, 杨晓春, 吴其重, 等. 基于数值模拟对西安地区冬季一次重污染过程 PM_{2.5} 区域来源解析[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(9): 3103-3111.
Guo Q Y, Yang X C, Wu Q Z, *et al.* An analysis of PM_{2.5} regional sources from heavy pollution in the winter of Xi'an based on numerical simulation [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(9): 3103-3111.
- [23] 曹宁, 黄学敏, 祝颖, 等. 西安冬季重污染过程 PM_{2.5} 理化特征及来源解析[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(1): 32-39.
Cao N, Huang X M, Zhu Y, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of fine particles during a heavy pollution in winter in Xi'an City [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(1): 32-39.
- [24] 李雁宇, 李杰, 曾胜兰, 等. 2017 年汾渭平原东部大气颗粒物污染特征分析[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(1): 63-72.
Li Y Y, Li J, Zeng S L, *et al.* Analysis of atmospheric particulates in the Eastern Fenwei Plain in 2017 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(1): 63-72.
- [25] 黄小刚, 赵景波, 孙从建, 等. 汾渭平原 PM_{2.5} 空间分布的地形效应[J]. *环境科学*, 2021, **42**(10): 4582-4592.
Huang X G, Zhao J B, Sun C J, *et al.* Orographic influences on the spatial distribution of PM_{2.5} on Fen-Wei Plain [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 4582-4592.
- [26] 张海东. 西安市大气污染特征及颗粒物来源分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
Zhang H D. Characteristics of air pollution and source analysis of particulate matter in Xi'an [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.
- [27] 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 等. 汾渭平原 PM_{2.5} 浓度的影响因素及空间溢出效应[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(8): 3539-3548.
Huang X G, Shao T J, Zhao J B, *et al.* Influence factors and spillover effect of PM_{2.5} concentration on Fen-wei Plain [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(8): 3539-3548.
- [28] 武媛媛, 李如梅, 彭林, 等. 运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(5): 1799-1806.
Wu Y Y, Li R M, Peng L, *et al.* Chemical compositions and source apportionment of road dust in Yuncheng [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(5): 1799-1806.

- [29] 赵清, 李杏茹, 王国选, 等. 运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1626-1635.
- Zhao Q, Li X R, Wang G X, *et al.* Chemical composition and source analysis of PM_{2.5} in Yuncheng, Shanxi Province in autumn and winter[J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1626-1635.
- [30] 李斌, 贾文毓. 运城市的自然村名与地形[J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 2015, **29**(S1): 59-60.
- [31] 曹小虎. 运城城市过去 50a 和未来气候变化趋势研究[J]. 人民黄河, 2014, **36**(11): 13-15.
- Cao X H. Analysis of characteristics and rules of climate change of Yuncheng City over the past 50 years and in the future[J]. Yellow River, 2014, **36**(11): 13-15.
- [32] Draxler R R, Hess G D. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories, dispersion, and deposition[J]. Australian Meteorological Magazine, 1998, **47**(4): 295-308.
- [33] Stein A F, Draxler R R, Rolph G D, *et al.* NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2015, **96**(12): 2059-2077.
- [34] Draxler R R, Hess G D. Description of the HYSPLIT_4 modeling system [EB/OL]. https://www.arl.noaa.gov/wp_arl/wp-content/uploads/documents/reports/arl-224.pdf, 2021-04-16.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Sirois A, Bottenheim J W. Use of backward trajectories to interpret the 5-year record of PAN and O₃ ambient air concentrations at Kejimikujik National Park, Nova Scotia[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1995, **100**(2): 2867-2881.
- [38] Draxler R R, Stunder B, Rolph G D, *et al.* HYSPLIT User's Guide [EB/OL]. http://www.arl.noaa.gov/documents/reports/hysplit_user_guide.pdf, 2021-04-16.
- [39] Jiang N, Li L P, Wang S S, *et al.* Variation tendency of pollution characterization, sources, and health risks of PM_{2.5}-bound polycyclic aromatic hydrocarbons in an emerging megacity in China: Based on three-year data[J]. Atmospheric Research, 2019, **217**: 81-92.
- [40] Dimitriou K, Kassomenos P. A meteorological analysis of PM₁₀ episodes at a high altitude city and a low altitude city in central Greece-The impact of wood burning heating devices [J]. Atmospheric Research, 2018, **214**: 329-337.
- [41] Karaca F, Anil I, Alagha O. Long-range potential source contributions of episodic aerosol events to PM₁₀ profile of a megacity[J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(36): 5713-5722.
- [42] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- GB3095-2012, Ambient air quality standard[S].
- [43] Zhang L, Shen F Z, Gao J L, *et al.* Characteristics and potential sources of black carbon particles in suburban Nanjing, China [J]. Atmospheric Pollution Research, 2020, **11**(5): 981-991.
- [44] Polissar A V, Hopke P K, Harris J M. Source regions for atmospheric aerosol measured at Barrow, Alaska [J]. Environmental Science & Technology, 2001, **38**(21): 4214-4226.
- [45] Xu X, Akhtar U S. Identification of potential regional sources of atmospheric total gaseous mercury in Windsor, Ontario, Canada using hybrid receptor modeling[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, **10**(15): 7073-7083.
- [46] Dvorská A, Lammel G, Holoubek I. Recent trends of persistent organic pollutants in air in central Europe-Air monitoring in combination with air mass trajectory statistics as a tool to study the effectivity of regional chemical policy [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(6): 1280-1287, doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.11.028.
- [47] 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.
- [48] 李杰, 翟亮, 桑会勇, 等. PM_{2.5}浓度插值中不同空间插值方法对比[J]. 测绘科学, 2016, **41**(4): 50-54, 101.
- Li J, Zhai L, Sang H Y, *et al.* Comparison of different spatial interpolation methods for PM_{2.5} [J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, **41**(4): 50-54, 101.
- [49] 郭雯雯, 陈永金, 刘阁, 等. 2016~2019年长江中游城市群空气质量时空变化特征及影响因素分析[J]. 生态环境学报, 2020, **29**(10): 2034-2044.
- Guo W W, Chen Y J, Liu G, *et al.* Analysis on the characteristics and influencing factors of air quality of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River in 2016 to 2019 [J]. Ecology and Environment Sciences, 2020, **29**(10): 2034-2044.
- [50] 任浦慧, 解静芳, 姜洪进, 等. 太原市大气 PM_{2.5} 季节传输路径和潜在源分析[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(8): 3144-3151.
- Ren P H, Xie J F, Jiang H J, *et al.* Transport pathways and potential sources of PM_{2.5} in different seasons in Taiyuan city [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(8): 3144-3151.
- [51] 沈楠驰, 周丙锋, 李珊珊, 等. 2015~2019年天津市大气污染物时空变化特征及成因分析[J]. 生态环境学报, 2020, **29**(9): 1862-1873.
- Shen N C, Zhou B F, Li S S, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics and origin analysis of air pollutants in Tianjin from 2015 to 2019 [J]. Ecology and Environment Sciences, 2020, **29**(9): 1862-1873.

CONTENTS

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China	PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (1)
Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil: A Review	CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, <i>et al.</i> (11)
Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge	ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, <i>et al.</i> (26)
Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China	RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, <i>et al.</i> (37)
Variation Characteristics and Potential Sources of the Mt. Haituo Aerosol Chemical Composition in Different Pollution Processes During Winter in Beijing, China	ZHAO De-long, WANG Fei, LIU Dan-tong, <i>et al.</i> (46)
Real-time Source Apportionment of PM _{2.5} and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan	JIANG Shu-ning, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (61)
Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Yuncheng City	WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, <i>et al.</i> (74)
Three-dimensional Structure Variation of PM _{2.5} During Cold Front Advance in Eastern China	MOU Nan-nan, ZHU Bin, LU Wen (85)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	LI Yan-xi, XIE Dan-ping, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (93)
Atmospheric VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Large-scale Integrated Industrial Area and Surrounding Areas in Southwest China	LI Ling, ZHANG Dan, HU Wei, <i>et al.</i> (102)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa	YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, <i>et al.</i> (113)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i> (123)
Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb	JIN Dan (132)
Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O ₃ and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China	YI Xiao-xiao, LI Jiang-hao, LI Guang-hua, <i>et al.</i> (140)
Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes	XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui, LIU Wang, <i>et al.</i> (150)
Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels	WU Yong-kang, CHEN Wei-hua, YAN Feng-hua, <i>et al.</i> (160)
Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo	WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (170)
Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City	PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (180)
Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> (189)
Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources	SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (199)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China	WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, <i>et al.</i> (210)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin	LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, <i>et al.</i> (220)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake	CHEN Xing-hong, LI Li-qing, ZHANG Mei-yi, <i>et al.</i> (230)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary and the Association with Heavy Metals	LIU Chang-jun, LUO Zhuan-xi, YAN Yu, <i>et al.</i> (239)
Quantitative Analysis of the Correlation Between Macrobenenthos Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing	HU Xiao-hong, ZUO De-peng, LIU Bo, <i>et al.</i> (247)
Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water	LIU Quan-zhong, PENG Ke, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (256)
DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course	LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, <i>et al.</i> (267)
Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City	YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, <i>et al.</i> (277)
Persistent Inhibition of Ammonium Released from Contaminated Sediments Through a Modified Zeolite and Biofilm System Enhanced by Signaling Molecules	XU Jin-lan, XU Yang, LI Xiu-min, <i>et al.</i> (285)
Effects of the Three Gorges Reservoir Operation on Vertical Distribution of Chlorophyll a and Environmental Factors in Tributaries	TIAN Pan, LI Ya-li, LI Ying-jie, <i>et al.</i> (295)
Characteristic Analysis of <i>nirS</i> Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification	LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (306)
Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangnan Reservoir	ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (314)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China	WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan (329)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of High-Iodine Groundwater in Rapidly Urbanized Delta Areas: A Case Study of the Pearl River Delta	LU Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (339)
Multimedia Distribution Characteristics and Risk Assessment of 22 PPCPs in the Water Environment of Qingpu District, Yangtze River Delta Demonstration Area	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, SHEN Jia-hao, <i>et al.</i> (349)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of 209 Polychlorinated Biphenyls in Dongting Lake and the Inflow Rivers	HUANG Zhi-feng, ZHENG Bing-hui, YIN Da-qiang, <i>et al.</i> (363)
Estimation of Nitrous Oxide Emission from River System Based on Water Discharge and Dissolved Nitrous Oxide Concentration	LI Bing-qing, HU Min-peng, WANG Ming-feng, <i>et al.</i> (369)
Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO ₂ Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area	QIN Yu, OUYANG Chang-yue, WANG Yu-xiao, <i>et al.</i> (377)
Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red	LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, <i>et al.</i> (387)
Adsorption Characteristics and Long-term Effectiveness Evaluation of Iron-nitrogen Co-doped Biochar for Secondary Water-Soluble Organic Matter	WU Chen-xi, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (398)
Nitritation Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment	DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (409)
Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors: Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community	WU Shan, WANG Shu-ya, WANG Fen, <i>et al.</i> (416)
Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics	LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, <i>et al.</i> (424)
Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model	XIA Zi-shu, BAI Yi-ru, WANG You-qi, <i>et al.</i> (432)
Heavy Metal Concentration Characteristics and Health Risks of Farmland Soils in Typical Pyrite Mining Area of the Central Zhejiang Province, China	CHENG Xiao-meng, SUN Bin-bin, WU Chao, <i>et al.</i> (442)
Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products	WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo, <i>et al.</i> (454)
Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique	SONG Bo, XIAO Nai-chuan, MA Li-jun, <i>et al.</i> (463)
Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice	LI Lin-feng, WANG Yan-hong, LI Yi-chun, <i>et al.</i> (472)
Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse	DONG Jun-wen, GAO Pei-pe, SUN Hong-xin, <i>et al.</i> (481)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable	ZHANG Ya-ping, LÜ Zhan-lu, WANG Xian-jiang, <i>et al.</i> (490)
Soil-crop Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides on Typical Agricultural Land in Southern Leizhou Peninsula	LIANG Xiao-hui, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (500)
Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil	GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, <i>et al.</i> (510)
Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau	WU Chun-xiao, GAO Xiao-feng, YAN Ben-shuai, <i>et al.</i> (521)
Microbial Composition and Diversity in Soil of <i>Torreya grandis</i> cv. <i>Merrillii</i> Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion	JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (530)
Effect of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizer and Organic Fertilizer on Soil Phosphatase Activity and Microbial Community	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (540)
Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China	XUE Yue, KANG Hai-bin, YANG Hang, <i>et al.</i> (550)
Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation	MIN Wen-hao, WANG Chun-li, WANG Li-wei, <i>et al.</i> (560)
Effects of Stalk Incorporation on Soil Carbon Sequestration, Nitrous Oxide Emissions, and Global Warming Potential of a Winter Wheat-Summer Maize Field in Guanzhong Plain	WAN Xiao-nan, ZHAO Ke-yue, WU Xiong-wei, <i>et al.</i> (569)