

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业VOCs排放特征及管控对策

孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金

VOCs



制药



喷涂



橡胶

京津冀 •

• 长三角

珠三角 •

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年3月

第42卷 第3期
Vol.42 No.3

目次

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业 VOCs 排放特征及管控对策	孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金 (1023)
长江经济带湖北省人为源 VOCs 排放清单及变化特征	代伶文, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 黄利宏 (1039)
经济快速发展区六氯丁二烯的来源与分布特征	陶誉铭, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 郭立新 (1053)
近 20 年中国表层土壤中多环芳烃时空分布特征及源解析	马妍, 程芦, 阮子渊, 史鹏飞, 路超君, 运晓彤, 李璐嫣, 徐雁秋, 史怡 (1065)
电子废物拆解区微塑料与周围土壤环境之间的关系	柴炳文, 尹华, 魏强, 卢桂宁, 党志 (1073)
焦化场地内外土壤重金属空间分布及驱动因子差异分析	顾高铨, 万小铭, 曾伟斌, 雷梅 (1081)
典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟	孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 朱林宇, 王政, 吕建树 (1093)
多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析	曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 雷梅 (1105)
龙岩市某铁锰矿区土壤重金属地球化学空间分布特征与来源分析	王蕊, 陈楠, 张二喜, 李小赛 (1114)
基于全周期场地概念模型的场地环境精准调查应用案例	李培中, 吴乃瑾, 王海见, 张骥, 荣立明, 李翔, 魏文侠, 宋云 (1123)
造纸厂土壤中短链和中链氯化石蜡的污染特征和风险评估	张佩萱, 高丽荣, 宋世杰, 乔林, 徐驰, 黄帝, 王爽, 蒋思静, 郝明辉 (1131)
典型再生铜冶炼厂周边土壤中 PCDD/Fs、PCBs 和 PCNs 的污染特征及健康风险评估	胡吉成, 郭静, 许晨阳, 金军 (1141)
柠檬酸与磷共存对土壤吸附镉的影响	宋子腾, 左继超, 胡红青 (1152)
两种能源草田间条件下对镉和锌的吸收累积	郑瑞伦, 石东, 刘文菊, 孙国新, 侯新村, 胡艳霞, 朱毅, 武菊英 (1158)
钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征	孙厚云, 卫晓峰, 孙晓明, 贾凤超, 李多杰, 李健 (1166)
盐胁迫下八宝景天不同生态型对土壤中 Cd 积累特征	郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 万小铭, 孟晓飞, 陈同斌, 何孟轲, 周小勇, 徐铁兵 (1177)
水分条件对生物炭钝化水稻土铅镉复合污染的影响	汤家庆, 张绪, 黄国勇, 胡红青 (1185)
壳聚糖改性生物炭对水稻土甲基汞生成及其稻米积累的影响	杨雪玲, 王明星, 徐国敏, 王定勇 (1191)
铬污染对土壤细菌群落结构及其构建机制的影响	于皓, 安益君, 金德才, 靳拓, 王兴润 (1197)
研究报告	
COVID-19 疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素分析	赵雪, 沈楠驰, 李令军, 武高峰, 陶静, 赵文吉 (1205)
2020 年初疫情管控对山东省空气质量影响的模拟	刘厚凤, 徐薇, 魏敏, 隋潇, 许鹏举, 李明燕, 张美根 (1215)
南京北郊 PM _{2.5} 中有机组分的吸光性质及来源	尚玥, 余欢, 茅宇豪, 王成, 谢鸣捷 (1228)
西安市大气棕碳污染特性及发色团种类	陈前, 陈庆彩 (1236)
淄博市道路尘细粒子携带金属元素的来源与健康风险评价	郭清源, 白雯宇, 赵雪艳, 郭丽瑶, 王敬华, 耿春梅, 王晓丽, 王静, 杨文, 白志鹏 (1245)
北京市控制 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	杜沛, 王建州 (1255)
西宁市大气污染来源和输送季节特征	刘娜, 余晔, 马学谦 (1268)
青岛近海不同污染过程下大气颗粒态氮磷浓度分布特征	袁刚, 祁建华, 丁雪 (1280)
基于走航监测的长三角工业园区周边大气挥发性有机物污染特征	王红丽, 高雅琴, 景盛翱, 楼晟荣, 胡馨遥, 安静宇, 吴宇航, 高伟, 朱亮, 黄成 (1298)
山地型城市冬季大气重污染过程特征及成因分析	刘伟诚, 牛月圆, 吴婧, 闫雨龙, 胡冬梅, 邱雄辉, 彭林 (1306)
兰-白城市群主要大气污染物网格化排放清单及来源贡献	王文鹏, 王占祥, 李继祥, 高宏, 黄韬, 毛蒲萱, 马建民 (1315)
2012~2019 年北京市储油库 VOCs 去除及排放水平变化监测分析	华岚英, 崔彤, 李金香, 邹本东, 杨妍妍, 程刚 (1328)
生活垃圾无害化处理大气污染物排放清单	马占云, 姜昱聪, 任佳雪, 张阳, 冯鹏, 高庆先, 孟丹 (1333)
长江口邻近海域表层沉积物中的细菌霍多醇及对低氧区的响应判别	尹美玲, 段丽琴, 宋金明, 张乃星 (1343)
鄱阳湖流域水体和水产品中苯酚的暴露特征及人体健康风险评估	徐倩云, 艾舜豪, 高祥云, 王晓南, 刘征涛, 赵师晴, 葛刚, 李霖 (1354)
衡水湖湿地水环境质量时空变化特征及污染源分析	刘魏魏, 郭子良, 王大安, 张曼胤, 张余广 (1361)
丹江口水库及其入库支流水体中微塑料组成与分布特征	潘雄, 林莉, 张胜, 翟文亮, 陶晶祥, 李丹文 (1372)
金盆水库暴雨径流时空演变过程及水质评价	黄诚, 黄廷林, 李扬, 李楠, 齐允之, 司凡, 华逢耀, 赵凌云 (1380)
汛期暴雨径流对饮用水水库溶解性有机质 (DOM) 光谱特征的影响	李程遥, 黄廷林, 温成成, 梁伟光, 林子深, 杨尚业, 李凯, 蔡晓春 (1391)
苏州古城区河道碳氮磷类污染物的分布特征	白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 郑凯旋, 李忠磊, 杨婷, 金军 (1403)
娘子关泉群水化学特征及成因	唐春雷, 赵春红, 申豪勇, 梁永平, 王志恒 (1416)
过氧化钙重塑底泥对水中磷酸盐的吸附作用	徐楚天, 李大鹏, 王子良, 吴宇涵, 许鑫澎, 黄勇 (1424)
亚热带丘陵区绿狐尾藻人工湿地处理养猪废水氮磷去向	王丽莎, 李希, 李裕元, 张满谔, 吴金水 (1433)
紫外/亚硫酸盐高级还原工艺加速降解水中难降解含碘造影剂	刘子奇, 仇付国, 赖曼婷, 李津, 董慧岭, 强志民 (1443)
太阳能热活化过硫酸盐降解染料罗丹明 B 的效能	马萌, 许路, 金鑫, 金鹏康 (1451)
一步法 La@MgFe ₂ O ₄ 的制备及其吸附水中磷的性能	白润英, 宋博文, 张戎, 郝俊峰, 刘建明, 刘宇红 (1461)
工程规模长填龄渗滤液膜生物-纳滤组合设施各单元污染物去除效能	邵立明, 邓樱桃, 仇俊杰, 吕凡, 章骅, 何品品 (1469)
ANAMMOX 培养物中硫酸盐型氨氧化生物转化机制	毕贞, 董石语, 黄勇 (1477)
不同季节城市污水处理厂微生物群落特性	贺赞, 李魁晓, 王佳伟, 王慰, 樊鹏超, 陈行行, 王军静 (1488)
麻黄碱在斑马鱼体内的器官特异性蓄积及毒代动力学	殷行行, 郭昌胜, 邓洋慧, 邱紫雯, 张艳, 滕彦国, 徐建 (1496)
内蒙古白云鄂博矿区土壤稀土元素污染特征及评价	王哲, 赵莹晨, 骆逸飞, 郑春丽, 卞园, 张光宇 (1503)
广西典型岩溶区农田土壤-作物系统 Cd 迁移富集影响因素	马宏宏, 彭敏, 郭飞, 刘飞, 唐世琪, 杨峰, 张富贵, 周亚龙, 杨柯, 李括, 刘秀金 (1514)
超顺磁性纳米材料对镉污染稻田土壤微生物和酶的影响	方丹丹, 张立志, 王强 (1523)
水分管理与施硅对水稻根表铁膜及砷镉吸收的影响	陈佳, 赵秀兰 (1535)
四环素类抗生素对土壤-生菜系统的生物效应及其迁移降解特性	王卫中, 迟苏琳, 徐卫江 (1545)
地膜覆盖对菜地垄沟 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	熊维霞, 江长胜, 赵仲婧, 曾唯, 胡曼利, 涂婷婷, 陈俊江, 郝庆菊 (1559)
对比研究生物炭和秸秆对麦玉米轮作系统 N ₂ O 排放的影响	唐占明, 刘杏认, 张晴雯, 李贵春 (1569)
流域生态空间管控下生境监测方法概述	阴琨, 刘海江, 王光, 金小伟 (1581)
《环境科学》征订启事 (1151) 《环境科学》征稿简则 (1342) 信息 (1402, 1415, 1580)	

西宁市大气污染来源和输送季节特征

刘娜¹, 余晔², 马学谦^{1*}

(1. 青海省人工影响天气办公室, 青海省防灾减灾重点实验室, 西宁 810001; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 在2016~2018年西宁市大气污染物PM₁₀和PM_{2.5}季节污染特征分析的基础上, 利用HYSPLIT模式和GDAS资料计算了逐日72 h气流后向轨迹, 通过聚类分析确定气流输送路径及其对日均PM₁₀和PM_{2.5}质量浓度的影响, 运用TrajStat软件提供的潜在源贡献因子分析法(PSCF)和浓度权重轨迹分析法(CWT), 探讨不同季节影响西宁市PM₁₀和PM_{2.5}质量浓度的潜在源区分布及贡献。结果表明, 输送来源位置多分布在西宁的西-北方向和东-北方向, 周边及邻近区域垂直高度较低。输送路径主要受西风、偏西风、西北、西南和偏东气流的影响。距离短、高度低和移速慢的气流轨迹出现概率最高, 是最主要的输送路径, 该路径在春夏秋三季来源于青海, 冬季则源自新疆, 省内输送占主导地位, 且不同输送轨迹对PM₁₀和PM_{2.5}浓度影响不同。污染气流主要来自青海省内源、新疆外源及新疆以西的境外源, 源地多沙漠和戈壁等脆弱地带分布。潜在源区范围及贡献大小有明显季节差异, 冬季范围广且贡献最大, 春秋次之, 夏季最小。最主要潜在源区位于青海北部、中部和东部地区、新疆南部、中部和东部, 其周边地区为中等贡献潜在源区。

关键词: PM_{2.5}; PM₁₀; 后向轨迹; 聚类分析; 输送路径; 潜在源区贡献; 西宁

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2021)03-1268-12 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202007183

Seasonal Characteristics of Air Pollutant Sources and Transport Pathways in Xining City

LIU Na¹, YU Ye², MA Xue-qian^{1*}

(1. Qinghai Provincial Key Laboratory of Disaster Prevention and Reduction, Qinghai Weather Modification Office, Xining 810001, China; 2. Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the analysis of seasonal characteristics of PM₁₀ and PM_{2.5} particle mass concentrations in Xining from 2016 to 2018, the daily 72 hour backward trajectories were calculated using the hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectory (HYSPLIT) model and global data assimilation system (GDAS) data. The main transport pathways of PM₁₀ and PM_{2.5} were identified and their characteristics were analyzed by clustering analysis for four seasons. The potential source regions and their contributions were defined using the potential source contribution function (PSCF) model and the concentration-weighted trajectory (CWT) method provided by TrajStat software. Results indicated that the sources were mostly distributed in the north-west and north-east regions and heights were low in the surrounding and adjacent areas of Xining. The transport pathways were mainly affected by airflows from the west, northwest, southwest, and east in Xining city. The trajectories with the highest probability of occurrence were characterized by short distance, low height, and slow-moving speed, originated from Qinghai in spring, summer and autumn, but from Xinjiang in winter, and was dominated by intra-provincial transportation. Different transport trajectories had different effects on PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations. Polluted airflows mainly originated from internal sources in Qinghai, external sources in Xinjiang, and foreign sources in the west of Xinjiang, with all the source regions located in deserts or Gobi areas. Obviously seasonal differences existed in the distribution and contribution of the potential source areas, with the widest and largest contribution in winter, followed by spring and autumn, and the smallest in summer. The most important potential source regions were located in northern, central, and eastern Qinghai, and southern, central, and eastern Xinjiang, while the surroundings were potential source regions for medium contribution.

Key words: PM_{2.5}; PM₁₀; backward trajectory; cluster analysis; transport pathway; potential source contribution; Xining

我国大气污染形势严峻, 每年约有超过100万人因大气污染而死亡^[1,2], 大气污染导致空气质量恶化的经济成本约占全国GDP的1%~8%^[3,4], 以颗粒物为主要污染物的城市及城市群大气环境问题仍很突出^[5~9]。京津冀城市间大气污染影响范围平均可达200 km, 区域扩散与传输导致本地污染受邻近区域影响显著, 邻近地区的PM_{2.5}每升高1%, 将导致本地PM_{2.5}至少升高0.5%^[6]。由于污染物本身具有空间溢出效应^[9], 大气污染存在明显的跨区域

传输, 单个城市污染物质量浓度不仅受本地污染源排放的影响, 还在一定程度上受外来污染源输送的影响, 探讨区域大气污染输送问题, 研究城市及城市群与周边区域的交互影响, 对制定大气污染区域

收稿日期: 2020-07-20; 修订日期: 2020-10-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41705121, 41665008); 青海省自然科学基金项目(2017-ZJ-944Q)

作者简介: 刘娜(1982~), 女, 博士, 工程师, 主要研究方向为大气物理和大气环境, E-mail: liuna03@126.com

* 通信作者, E-mail: mobllfyqx@126.com

联防联控防治措施有重要意义。

近年来,利用 HYSPLIT 后向轨迹聚类分析、潜在源贡献因子分析法(PSCF)和浓度权重轨迹分析(CWT)已成为研究大气污染来源和输送的重要方法^[10~18]。长江三角洲^[19]、北京^[20,21]、银川^[22]和川南自贡市^[23]等地不同季节污染物来源和输送研究表明,该方法能较好地模拟大气污染物季节输送特征。西宁市地处青藏高原河湟谷地南北两山对峙之间,统属祁连山系,黄河支流湟水河自西向东贯穿市区,属于典型河谷盆地地形,城区多出现不利于污染物扩散的静风天气,且易受向下游输送亚洲沙尘的影响^[24],同时也是兰西城市群中心城市,是西部大开发重要工业基地、资源开发基地和交通网络枢纽。随着兰西城市群经济带和大西宁都市圈的发展,大气污染问题也趋于严重。已有学者对西宁市的大气污染问题进行了大量研究,主要集中在污染特征、成因分析、干湿沉降、来源解析、典型天气过程输送规律和污染气象条件等方面^[25~34],针对较长时间尺度上大气污染输送来源和路径季节变化的研究较少。

基于此,本文对 HYSPLIT 计算的后向轨迹进行聚类分析,结合西宁市 2016~2018 年 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度监测数据,研究春夏秋冬这 4 个季节输送来源与路径的变化特征及其与颗粒物浓度的关系,运用 TrajStat 软件提供的 PSCF 和 CWT 分析西宁市颗粒物潜在源区及对其质量浓度的贡献,加深对河谷盆地地形污染物输送特征的认识,以期为不同季节大气污染治理措施制定提供参考。

1 材料与方法

1.1 资料来源

PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度数据来源于全国城市空气质量实时发布平台,对应时段为 2016 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日。为保证数据质量,对原始数据进行了质控,剔除原始数据缺失值。计算日均值时,若缺失超过 4 h 则当日数据无效。后向轨迹计算气象资料为 NCEP 提供的 GDAS 资料,数据分辨率率为 $1^\circ \times 1^\circ$,时间间隔 6 h,垂直高度层为 23 层,包括风场、气温、气压和相对湿度等气象参量。

1.2 研究方法

本文主要利用融合 HYSPLIT 模式可执行文件和 GIS 功能的 TrajStat 软件进行后向轨迹计算、聚类分析、PSCF 和 CWT 分析。

HYSPLIT 是具有处理多种气象要素输入场、多种物理过程和不同类型排放源功能的较完整的输送、扩散和沉降模式,后向轨迹计算采用拉格朗日

方法,可以直观了解气流或粒子的运动轨迹^[35]。轨迹聚类是将后向轨迹根据气流移速和方向进行分组得到不同的输送轨迹聚类,直观描述气流来源和输送路径,依据欧氏距离算法总空间方差 TSV 的突变点确定聚类数。以西宁市为轨迹起始点,进行 72 h 后向轨迹计算,每天计算 4 个时次(02:00、08:00、14:00 和 20:00 BJT),轨迹起始点高度为 500 m(距地高度 AGL)。

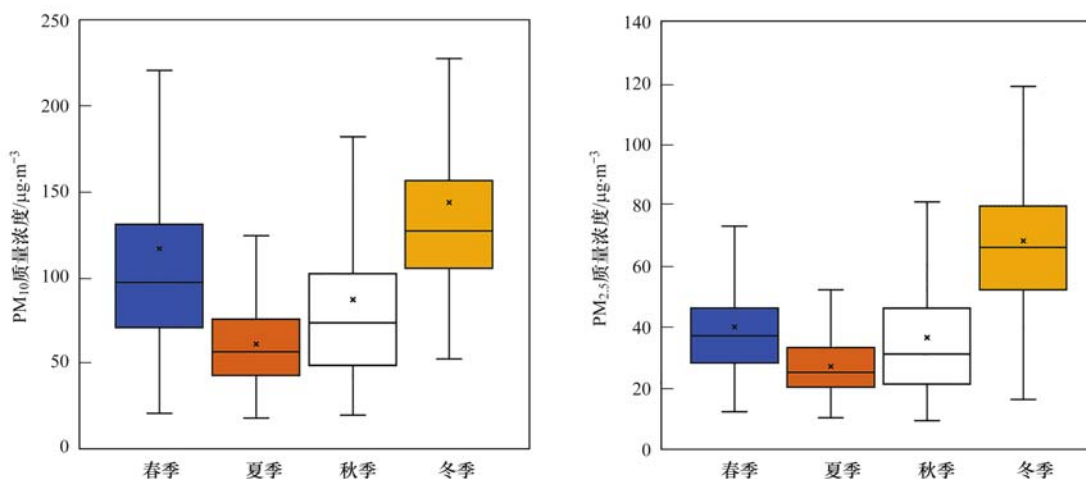
TrajStat 软件可以使用多种轨迹分析方法,从长期污染观测数据中识别污染物潜在源区和相对贡献^[36]。PSCF 和 CWT 是基于气流轨迹的受体模型分析方法。PSCF 是经过研究区内某网格 ij 的污染轨迹数(m_{ij})与经过该网格的所有轨迹数(n_{ij})的比值,反映的是一种条件概率,可给出所有可能污染来源位置的概率分布场。为了减小 n_{ij} 较小时引起的较大不确定性,当某一网格内 n_{ij} 小于研究区内平均轨迹端点数的 3 倍时使用权重函数 w_{ij} 计算 PSCF。CWT 计算轨迹权重浓度,确定潜在源区贡献,反映轨迹的污染程度,可给出所有可能潜在源区的贡献分布,同样需要 w_{ij} 进行 CWT 的计算,具体计算公式可参考文献^[11,13]。

2 结果与讨论

2.1 颗粒物质量浓度特征

图 1 为 2016~2018 年西宁市 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度季节变化箱线图。 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度冬季最高,分别为 $143.51 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $68.21 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,春季次之,分别为 $116.27 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $39.90 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,夏季最低,为 $60.66 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $26.90 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,秋季为 $86.64 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $36.42 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度最高值出现在冬季 12 月, PM_{10} 最低值出现在夏季 8 月, $\text{PM}_{2.5}$ 最低值出现在秋季 9 月。依据 GB 3095-2012 日均值和年均值标准,利用指数法^[37]计算出 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度季节二级标准限值分别为 $84 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $42 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,对比可知 PM_{10} 质量浓度仅在夏季达标, $\text{PM}_{2.5}$ 仅在冬季未达标, PM_{10} 污染程度较 $\text{PM}_{2.5}$ 严重。

图 2 给出了 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 随时间的变化特征和滑动平均趋势线。从中可知, $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 平均值为 0.45, $\text{PM}_{2.5}$ 占 PM_{10} 接近半数,说明 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{2.5-10}$ (粒径为 $2.5 \sim 10 \mu\text{m}$ 的颗粒物)质量浓度相当, $\text{PM}_{2.5}$ 逐渐在 PM_{10} 中占主要地位。有研究表明, PM_{10} 受人为源和自然源双重影响, $\text{PM}_{2.5}$ 则主要受人为源影响,当 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 小于 0.2 时,存在明显沙尘天气过程影响;当 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 大于 0.6 时,存在典型人为源气溶胶影响^[38]。西宁市 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 大于



图中上下短横线分别代表最高和最低质量浓度, 矩形代表位于 25% 下四分位和 75% 上四分位之间的主要质量浓度范围, 矩形中的横线和 × 号分别代表中位数和算术平均值

图 1 2016 ~ 2018 年西宁市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 质量浓度季节变化

Fig. 1 Seasonal variation of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in Xining City during 2016-2018

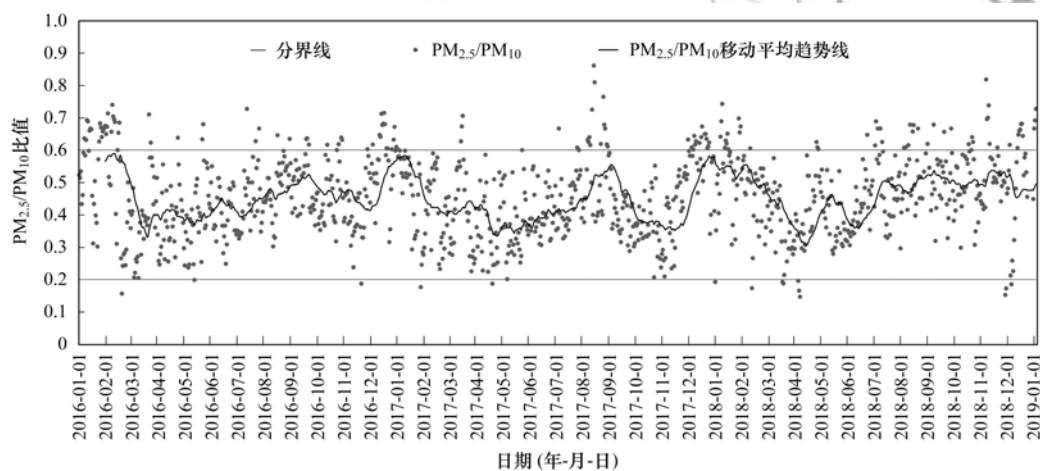


图 2 2016 ~ 2018 年西宁市 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度比值随时间的变化

Fig. 2 Variation of $PM_{2.5}/PM_{10}$ in Xining City during 2016-2018

0.6 的散点明显多于小于 0.2 的散点, 说明西宁市受自然源沙尘天气的影响呈减少趋势较少, 受人为源污染影响呈增加趋势明显, 人为源对颗粒物的影响处于突出地位。

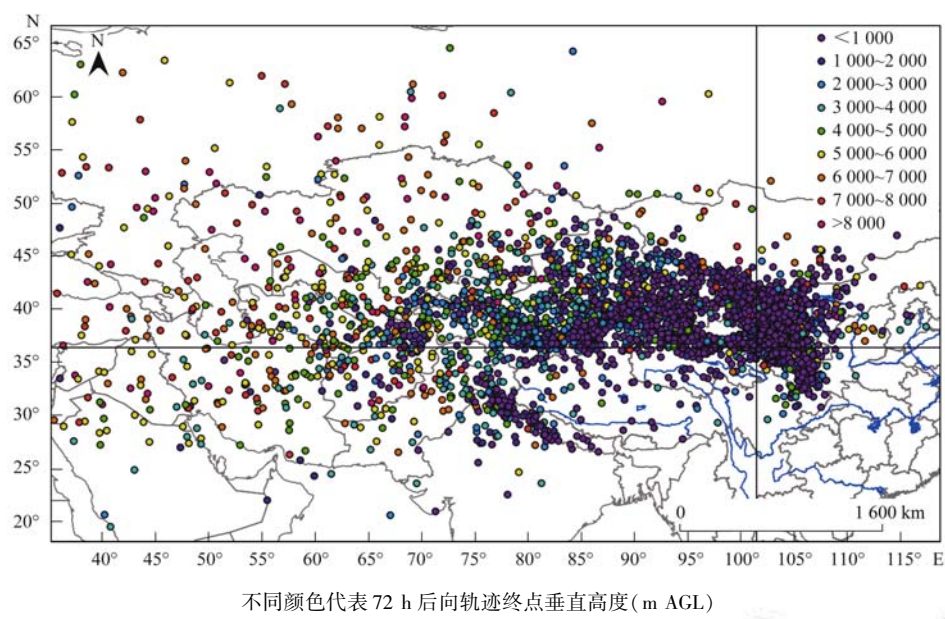
2.2 输送来源特征

图 3 为 72 h 后向轨迹来源点在以受点为中心的 4 个象限内的分布, 1 ~ 4 象限分别对应受点的东-北、东-南、西-南和西-北方向。从中可知, 西-北方向的输送来源最多, 占 52.20%, 东-北方向次之, 占 23.82%, 西-南方向占 14.00%, 东-南方向最少, 仅占 9.98%。在受点周边及邻近区域, 轨迹来源点垂直高度相对较低, 在较远及更远区域轨迹来源点垂直高度相对较高。统计可知, 来源点分布在 1 km 以内大气边界层的概率达 57.80%, 500 m 以内概率为 51.54%, 10 m 以内概率为 34.50%。

图 4 和图 5 为轨迹来源点垂直高度在不同区域时间序列及年、季节变化特征。从中可知, 2016 ~ 2018 年, 4 个象限输送源点垂直高度均呈下降趋势, 输送源点垂直高度有明显的年际和季节差异。从逐年平均高度可知, 西-北和西-南方向高度较高, 东-北和东-南方向高度较低, 其中 2016 年西-南方向最高, 2018 年东-北方向最低。东-北和东-南方向输送来源逐年增多, 夏季来源最多, 秋季次之, 冬季最少; 西-南方向输送来源逐年减少, 冬季最多, 秋季次之, 夏季最少; 西-北方向输送来源明显下降后又略有上升, 春季最多, 冬季次之, 夏季最少。

2.3 输送路径特征

将 2016 ~ 2018 年春夏秋冬 4 季后向轨迹聚类为 6 类, 进行气流输送路径特征分析(图 6)。输送路径和方向表示气流到达受点前经过的区域, 输送



不同颜色代表 72 h 后向轨迹终点垂直高度 (m AGL)

图 3 2016 ~ 2018 年西宁市 72 h 后向轨迹终点位置分布

Fig. 3 Distribution of the ending point of the 72 h back trajectories started in Xining City during 2016-2018

距离可判断气流移动速度^[17]. 结果可知, 聚类轨迹出现概率、途经区域、移动速度和输送距离存在明显季节差异. 在春季, 最主要的输送路径来自青海东北部的短距离西北路径(聚类 2), 占轨迹总数的比例最大, 为 33.06%, 其次是源自新疆中部的较长距离西北路径(聚类 1); 在夏季, 来自青海东部的短距离偏北路径(聚类 4), 占比最大, 为 37.17%, 其次是源自甘肃北部的较长距离西北路径(聚类 2); 在秋季, 来自青海东北部的短距离偏北路径(聚类 3) 占比最大, 为 45.92%, 其次是源自新疆南部的较长距离偏西路径(聚类 2); 在冬季, 来自新疆中南部的较短距离西北路径(聚类 3), 占比最大, 为 28.97%, 其次是源自甘肃中部短距离偏东路径(聚类 2).

春冬季多为西北气流和偏西气流, 秋冬季轨迹移动速度快, 输送距离较春季远, 这可能与东亚冬季风的传播有关, 夏季轨迹输送距离最短; 除春季外, 夏秋冬 3 季西宁都出现了近距离输送的影响, 且秋季出现概率高于夏季, 输送路径上有明显转向折回, 冬季概率最小; 春夏秋冬 4 季最主要的输送路径分别来源于青海东北部、青海东部、青海东部和新疆中南部, 且青海北部是各类主要轨迹必经之地, 青海省内输送对西宁市大气污染的影响占主要地位.

图 7 为 2016 ~ 2018 年 4 季聚类轨迹 72h 移动过程中垂直方向气压均值变化曲线, 用来反映轨迹到达西宁前气流垂直混合特征. 可以看出, 从输送源点至受点垂直混合呈 3 种变化趋势: 第一种是先上升后下降, 符合此类趋势的输送路径最多; 第二

种是先下降后上升; 第三种是整体上升, 此类路径最少. 四季垂直输送高度的峰值范围为 520 ~ 350 hPa, 秋季峰值最大, 春季最小. 春夏冬 3 季垂直输送高度峰值对应最长输送路径, 秋季对应较长输送路径, 最低高度对应最短路径. 长距离轨迹移速快, 高度高, 出现比例低; 短距离轨迹移速慢, 高度低, 出现比例高. 长距离路径将跨区域颗粒物输送至西宁, 短距离路径将临近省市(州)颗粒物输送至西宁, 易受到近地面污染源的影响.

2.4 输送路径污染特征

当轨迹对应的 PM_{10} ($PM_{2.5}$) 质量浓度大于二级标准限值 $150 \mu g \cdot m^{-3}$ ($75 \mu g \cdot m^{-3}$) 时划分为污染轨迹, 反之则为清洁轨迹. 图 8 给出了西宁市 4 季聚类轨迹对应的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 平均质量浓度箱线图, 表 1 给出了污染轨迹出现比例和平均质量浓度的统计特征. 结果显示, 聚类轨迹 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 平均质量浓度和污染轨迹 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 平均质量浓度有显著差异.

春夏秋冬 4 季中, 聚类轨迹 PM_{10} 平均质量浓度范围分别 100.59 ~ 128.51、54.16 ~ 69.36、62.19 ~ 122.47 和 131.11 ~ 155.65 $\mu g \cdot m^{-3}$, $PM_{2.5}$ 平均质量浓度范围分别 36.13 ~ 42.12、24.76 ~ 31.78、27.02 ~ 51.35 和 64.54 ~ 78.63 $\mu g \cdot m^{-3}$; 春秋冬 3 季中, 污染轨迹 PM_{10} 平均质量浓度范围分别 215.30 ~ 326.41、172.00 ~ 381.73 和 189.85 ~ 270.85 $\mu g \cdot m^{-3}$, $PM_{2.5}$ 平均质量浓度范围分别 85.50 ~ 119.20、79.17 ~ 101.33 和 92.82 ~ 101.08 $\mu g \cdot m^{-3}$; 夏季轨迹较清洁, 仅出现一次 PM_{10} 污染事件, 无 $PM_{2.5}$ 污染事件. 从表 1 季节比例高于

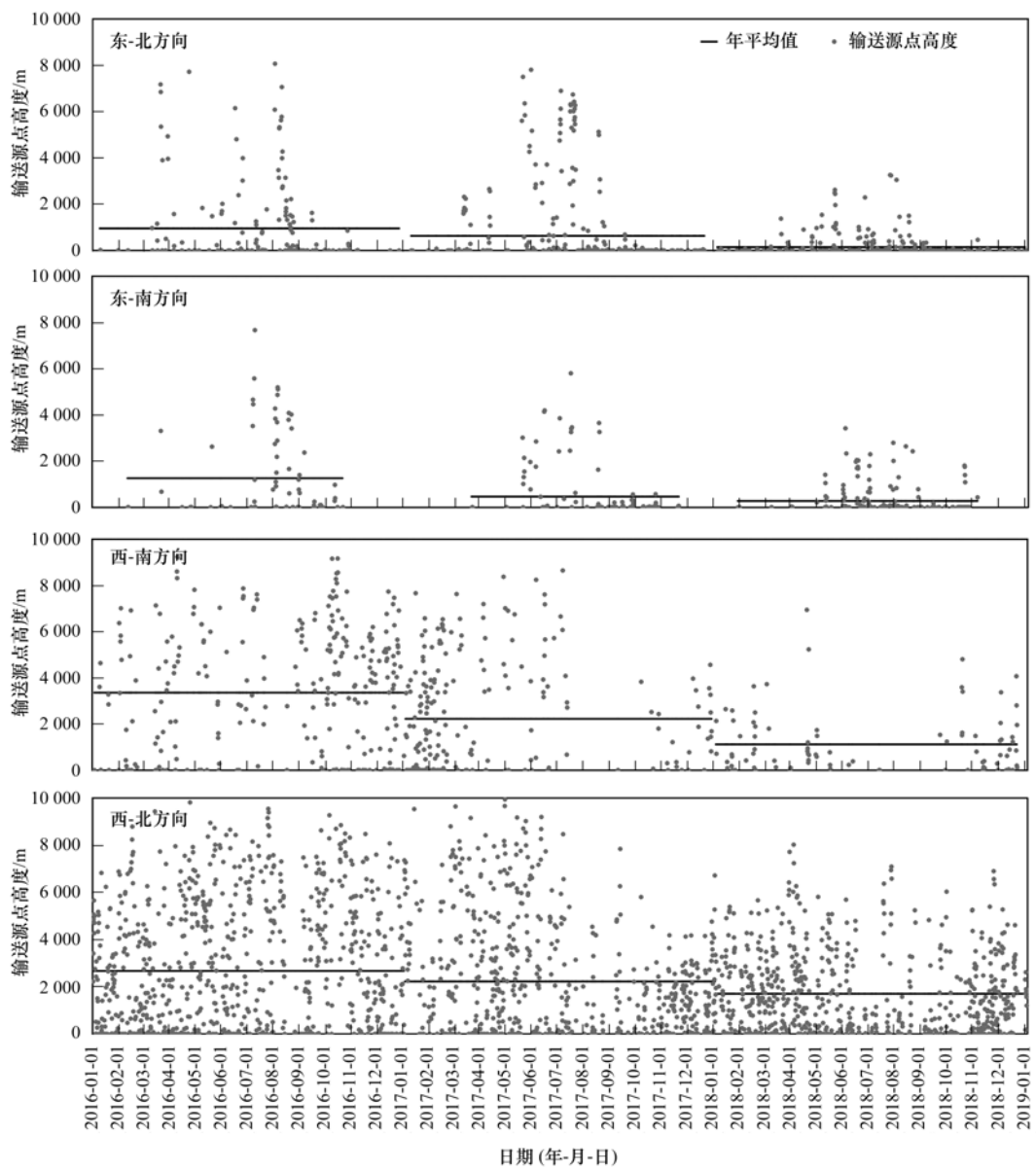


图4 2016~2018年西宁市不同区域后向轨迹输送源点高度变化特征

Fig. 4 Vertical height distribution characteristics of transport source locations in four different areas in Xining City during 2016-2018

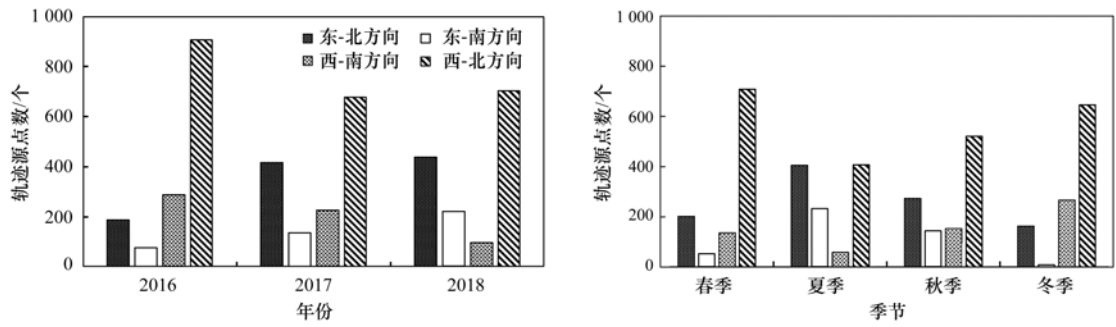


图5 2016~2018年西宁市不同方位后向轨迹终点数年和季节变化特征

Fig. 5 Annual and seasonal variation of transport source locations in four different areas in Xining City during 2016-2018

20%可知,春季主要污染轨迹为聚类2,说明西北气流对西宁颗粒物污染影响最大,该轨迹源自青海东北部和新疆中部;秋季主要污染轨迹为聚类2和

5,受西风和偏西气流影响,轨迹源自土库曼斯坦西部和新疆南部地区;冬季主要污染轨迹为聚类3和6,受西风和西北气流影响,轨迹源自新疆中南

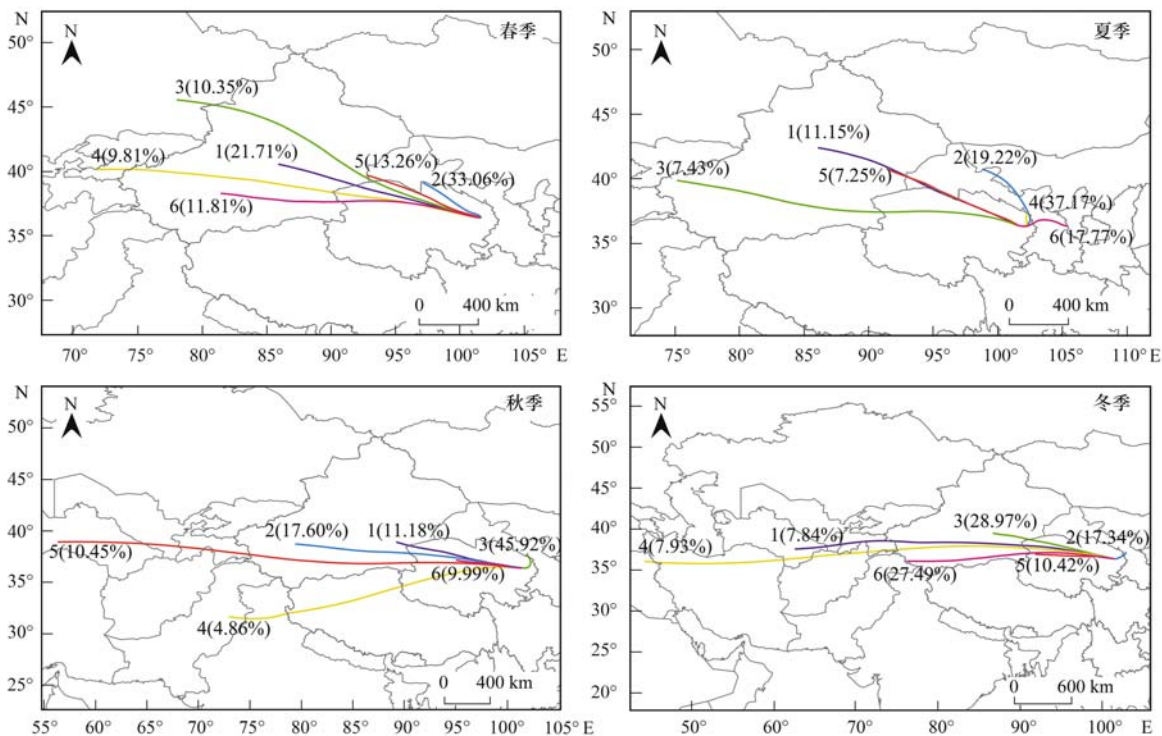


图 6 西宁市 2016 ~ 2018 年不同季节后向轨迹聚类分析

Fig. 6 Backward trajectory clusters in different seasons in Xining City during 2016-2018

表 1 污染轨迹数量、出现比例和对应 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 质量浓度¹⁾

Table 1 Number, percent, and concentrations of PM ₁₀ and PM _{2.5} associated with polluted trajectories in each cluster									
季节	聚类轨迹	PM ₁₀ 污染轨迹				PM _{2.5} 污染轨迹			
		数量	类中比例 /%	季节比例 /%	质量浓度 / μg·m ⁻³	数量	类中比例 /%	季节比例 /%	质量浓度 / μg·m ⁻³
春季	1	43	18.00	22.87	235.21	10	4.18	19.23	85.50
	2	59	16.08	31.38	251.14	19	5.18	36.54	95.26
	3	17	14.91	9.04	326.41	5	4.39	9.62	101.00
	4	10	9.26	5.32	215.30	3	2.78	5.77	84.00
	5	31	21.23	19.49	248.29	10	6.85	19.23	97.00
	6	28	21.54	14.89	268.64	5	3.85	9.62	119.20
	合计	188	17.03	100	254.53	52	4.71	100	95.92
夏季	1	1	0.81	25.00	169.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	1	0.47	25.00	169.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	3	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4	2	0.49	50.00	169.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	5	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	6	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	合计	4	0.37	100	169.00	0.00	0.00	0.00	0.00
秋季	1	7	5.79	5.65	354.00	8	6.61	11.11	94.25
	2	36	18.75	29.03	197.47	18	9.38	25.00	86.83
	3	18	3.64	14.52	172.00	6	1.21	8.33	79.17
	4	16	30.19	12.90	189.00	13	24.53	8.03	84.23
	5	36	31.58	29.03	188.28	18	15.79	25.00	87.39
	6	11	10.00	8.87	381.73	9	8.18	12.50	101.33
	合计	124	11.44	100	215.19	72	6.64	100	88.50
冬季	1	33	38.82	11.15	213.37	22	25.88	6.32	99.55
	2	47	26.70	15.88	189.85	54	30.68	15.52	98.89
	3	81	25.96	27.36	215.79	91	29.17	26.15	92.82
	4	32	37.21	10.81	207.78	40	46.51	11.49	101.08
	5	30	28.30	10.14	204.50	43	40.57	12.36	88.33
	6	73	24.75	24.66	270.85	98	33.22	28.16	97.29
	合计	296	27.92	100	222.96	348	32.83	100	95.84

1) 黑体字为季节比例 > 20% 为主要污染轨迹

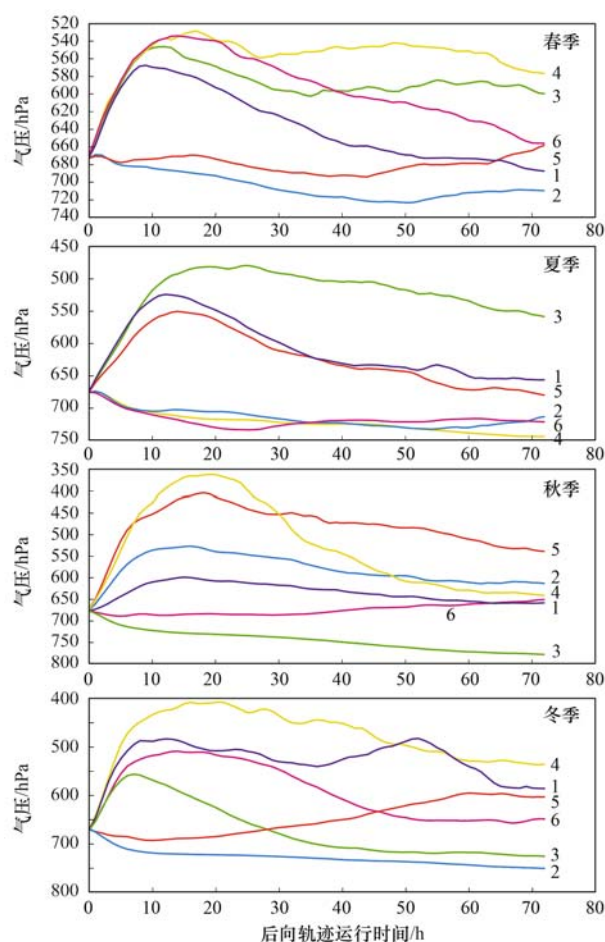


图7 西宁市2016~2018年不同季节后向轨迹高度上气压变化
Fig. 7 Vertical press variations of each back-trajectory cluster in four seasons in Xining City during 2016-2018

部和南部地区。污染轨迹源地多分布在脆弱地带,颗粒物随气流被携带至西宁,与本地污染源排放相互叠加对西宁颗粒物质量浓度造成较大的影响。冬季污染轨迹最多,春季次之。颗粒物污染轨迹有季节对应关系且多出现在各季主要轨迹输送路径上,秋季污染轨迹路径较长,冬春季较短。相对次要输送路径虽然出现比例小,但也有可能出现较多污染轨迹。

2.5 污染潜在源区分析

用PSCF对2016~2018年西宁市颗粒物污染潜在源区进行判断,计算结果见图9,PSCF高值所在网格区域即是造成受点污染最主要的潜在源区。因夏季污染轨迹占比小,本小节不对其潜在源区进行分析。

西宁市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的污染潜在源区分布季节差异明显。比较而言,春季潜在源区位置偏北,秋季偏西南,春秋季 PM_{10} 的潜在源区比 $PM_{2.5}$ 范围广且更集中。冬季源区范围分布最广,且 $PM_{2.5}$ 高值区范围较 PM_{10} 大。源区内的气流沿主要轨迹输送路径到达受点,并影响着受点颗粒物质量浓度,冬季

影响最大,春秋季次之。境内而言,西宁市颗粒物主要污染潜在源区分布在新疆、青海、西藏、甘肃和内蒙古部分地区;境外而言,在哈萨克斯坦东和印度北与尼泊尔交界地带、塔吉克斯坦和乌兹别克斯坦及阿富汗三国交界地带、印度北、尼泊尔中、阿富汗北、塔吉克斯坦西和巴基斯坦北等地均有零散分布。

2.6 潜在源区贡献分析

对2016~2018年西宁市4季进行 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 权重浓度轨迹分析,CWT计算结果见图10,CWT高值区域即是对西宁颗粒物高质量浓度有贡献的主要源区。从中可知,西宁市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的潜在源区贡献季节差异明显,与PSCF相比,CWT不仅给出了潜在源区分布,还给出了潜在源区对受点颗粒物质量浓度贡献的大小。

在春季, PM_{10} 的CWT高值区主要集中在新疆塔里木盆地、吐鲁番盆地和准噶尔盆地、甘肃河西走廊、青海柴达木盆地、内蒙古巴丹吉林沙漠和乌兰布和沙漠,对西宁日均 PM_{10} 质量浓度贡献 $100 \mu g \cdot m^{-3}$,局部地区及哈萨克斯坦东南和吉尔吉斯斯坦中东部贡献超过 $150 \mu g \cdot m^{-3}$ 甚至 $200 \mu g \cdot m^{-3}$,强贡献源区周边为 $50 \sim 100 \mu g \cdot m^{-3}$ 中等贡献源区。夏季潜在源区日均 PM_{10} 质量浓度贡献主要集中在 $50 \sim 100 \mu g \cdot m^{-3}$ 之间,与春季相比源区范围和贡献明显较小,受点以西范围大幅缩小,以南有扩展现象,如南方四川源区的输送。秋季CWT高值区主要分布在新疆南和青海北,日均 PM_{10} 质量浓度贡献超过 $100 \mu g \cdot m^{-3}$,局部地区及印度北、乌兹别克斯坦和塔吉克斯坦交界地带,贡献超过 $150 \mu g \cdot m^{-3}$,相比春季源区范围明显减小,同时甘肃、新疆和内蒙古贡献减小。冬季高值区主要潜在源贡献区分布在新疆大部、青海北、甘肃中和西藏北,贡献大于 $150 \mu g \cdot m^{-3}$,在新疆北、印度北和尼泊尔中有超过 $250 \mu g \cdot m^{-3}$ 的贡献区分布,相比春季,西部贡献区范围增大,无内蒙古贡献。比较而言,冬季贡献高于 $100 \mu g \cdot m^{-3}$ 的区域范围分布最广,春季次之,秋季最小。

$PM_{2.5}$ 的CWT高值区对应的主要潜在源贡献区与 PM_{10} 贡献区分布范围有较好的对应关系,但贡献值有明显季节差异。春季日均 $PM_{2.5}$ 质量浓度贡献普遍超过 $30 \mu g \cdot m^{-3}$,超过 $60 \mu g \cdot m^{-3}$ 贡献区零散分布。夏季贡献为 $15 \sim 45 \mu g \cdot m^{-3}$ 。秋季日均 $PM_{2.5}$ 质量浓度超过 $45 \mu g \cdot m^{-3}$ 的贡献区分布相比春季明显增大,超过 $60 \mu g \cdot m^{-3}$ 贡献区比较分散。冬季日均 $PM_{2.5}$ 质量浓度潜在源区分布范围和贡献最大,普

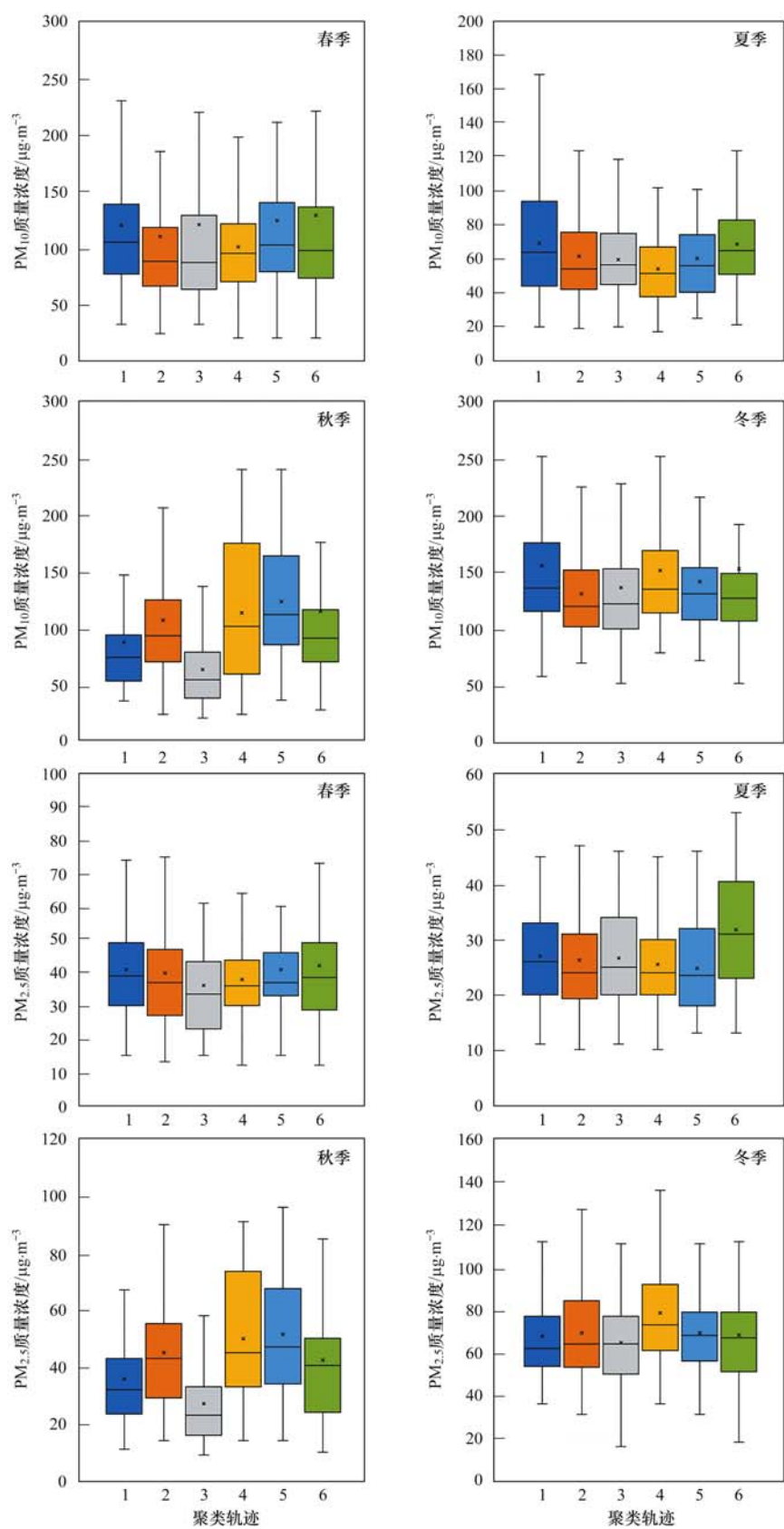


图8 西宁市2016~2018年四季各聚类轨迹对应 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 平均质量浓度

Fig. 8 Cluster-mean concentrations of PM_{10} and $PM_{2.5}$ associated with four seasons in Xining City during 2016-2018

遍超过 $60 \mu g \cdot m^{-3}$ ，在新疆塔里木盆地和吐鲁番盆地、青海柴达木盆地和西宁周边地区、印度北部和尼泊尔中部等地有明显日均贡献超过 $75 \mu g \cdot m^{-3}$ 的潜在源区分布。

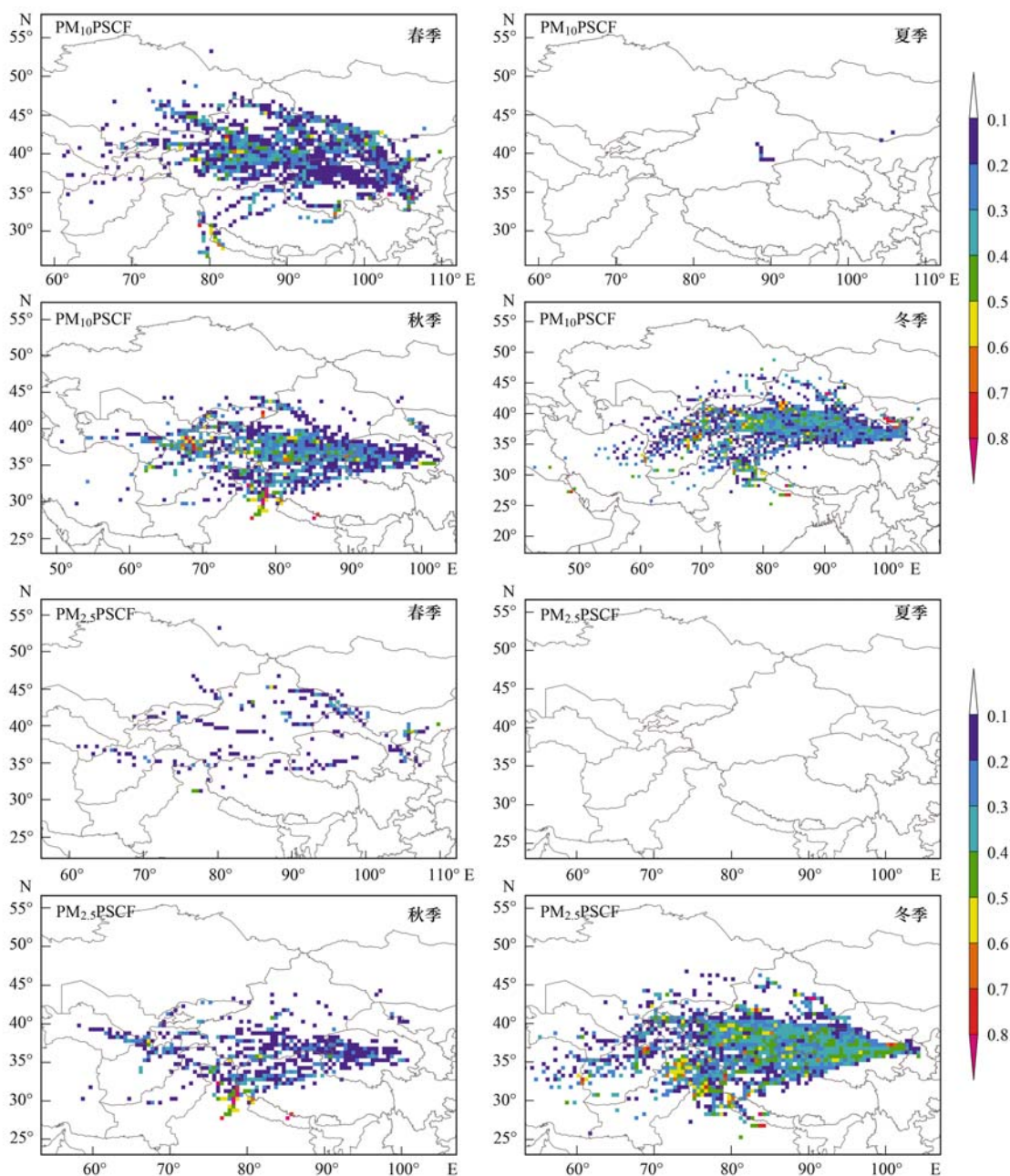


图9 西宁市2016~2018年PM₁₀和PM_{2.5}四季PSCF分布

Fig. 9 Potential source contribution function maps of PM₁₀ and PM_{2.5} in four seasons in Xining City during 2016-2018

3 结论

(1) 西宁市2016~2018年PM₁₀和PM_{2.5}平均质量浓度有明显季节变化特征. 冬季最高分别为143.51 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和68.21 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 春季次之, 秋季再次, 夏季最低, PM₁₀污染程度相比PM_{2.5}较严重. PM_{2.5}/PM₁₀平均值为0.45, 且大于0.6的事件较多, 西宁颗粒物质量浓度受人为源影响较多.

(2) 利用后向轨迹终点位置对应输送来源位置进行输送来源特征分析. 输送来源多分布在受点西-北方向和东-北方向, 出现概率高达76.02%. 垂直方向上, 输送来源高度小于1km的出现概率达

57.80%, 多分布于西宁周边及邻近区域. 2016~2018年, 各象限输送来源垂直高度呈下降趋势, 西-北和西-南方向整体高度较高, 东-北和东-南方向较低. 东-北和东-南方向输送来源逐年增多, 夏季来源最多, 冬季最少; 西-南方向输送来源逐年减少, 冬季来源最多, 夏季最少; 西-北方向输送来源明显下降后又略有上升, 春季最多, 夏季最少.

(3) 4季气流输送路径主要受西风、偏西风、西北、西南和偏东气流的影响, 冬季输送路径最长, 春秋次之, 夏季最短. 距离短、高度低、移速慢的输送路径出现概率较高, 主要源自青海、新疆和甘肃. 除春季外, 近距离输送的影响显著, 秋季概率最

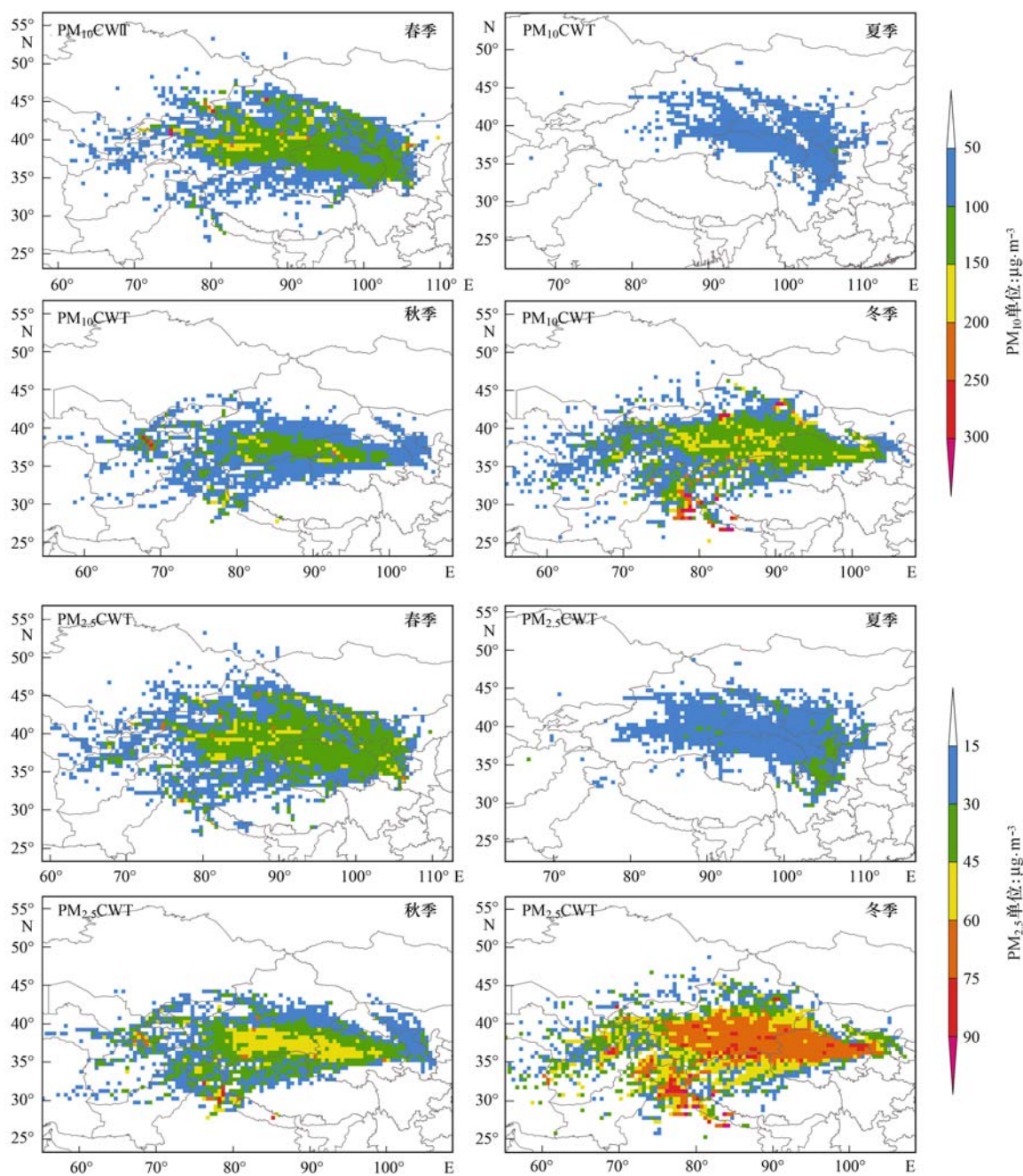


图 10 西宁市 2016 ~ 2018 年 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 四季 CWT 分布

Fig. 10 Concentration-weighted trajectory analysis maps of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ in four seasons in Xining City during 2016-2018

高，路径上有明显转向折回现象。 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 污染轨迹出现在主要输送路径上。相对次要输送路径也有可能出现较多污染轨迹。冬季污染轨迹最多，春季次之，夏季轨迹最清洁。污染轨迹多源自脆弱地带，气流路径上携带颗粒物向西宁输送，对西宁颗粒物质量浓度造成较大的影响。

(4) 西宁市 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的 PSCF 和 CWT 区域分布和比值大小有明显季节差异。主要潜在源贡献区分布在新疆大部、青海北部和甘肃中部。冬季主要潜在源贡献区范围最广且贡献最大， PM_{10} 春季贡献区域范围和贡献值次于冬季、秋季再次、夏季最

小；而 $\text{PM}_{2.5}$ 秋季贡献区域范围和贡献值次于冬季、春季再次、夏季最小。冬季颗粒物污染最严重，夏季空气最清洁，仅夏季存在南方源贡献区。

参考文献：

[1] Matus K, Nam K M, Selin N E, *et al.* Health damages from air pollution in China[J]. *Global Environmental Change*, 2012, **22** (1): 55-66.

[2] Yang G H, Wang Y, Zeng Y X, *et al.* Rapid health transition in China, 1990-2010: findings from the global burden of disease study 2010[J]. *Lancet*, 2013, **381**(9882): 1987-2015.

[3] Crane K, Mao Z M. Costs of selected policies to address air pollution in China[R]. Calif: RAND Corporation, 2015.

[4] Heck T, Hirschberg S. China: Economic impacts of air pollution

- in the country [A]. In: Nriagu J O (Ed.). Encyclopedia of Environmental Health [M]. Amsterdam: Elsevier, 2011. 625-640.
- [5] 李名升, 张建辉, 张殷俊, 等. 近 10 年中国大气 PM₁₀ 污染时空格局演变[J]. 地理学报, 2013, **68**(11): 1504-1512.
- Li M S, Zhang J H, Zhang Y J, *et al.* Spatio-temporal pattern changes of ambient air PM₁₀ pollution in China from 2002 to 2012 [J]. Acta Geographica Sinica, 2013, **68**(11): 1504-1512.
- [6] 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.
- [7] Tian S L, Pan Y P, Liu Z R, *et al.* Size-resolved aerosol chemical analysis of extreme haze pollution events during early 2013 in urban Beijing, China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, **279**: 452-460.
- [8] 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 2013 年北京市 PM_{2.5} 的时空分布[J]. 地理学报, 2015, **70**(1): 110-120.
- Wang Z S, Li Y T, Chen T, *et al.* Spatial-temporal characteristics of PM_{2.5} in Beijing in 2013 [J]. Acta Geographica Sinica, 2015, **70**(1): 110-120.
- [9] 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.
- [10] Jorba O, Pérez C, Rocadenbosch F, *et al.* Cluster analysis of 4-day back trajectories arriving in the Barcelona area, Spain, from 1997 to 2002 [J]. Journal of Applied Meteorology, 2004, **43**(6): 887-901.
- [11] Wang Y Q, Zhang X Y, Arimoto R. The contribution from distant dust sources to the atmospheric particulate matter loadings at XiAn, China during spring [J]. Science of the Total Environment, 2006, **368**(2-3): 875-883.
- [12] Borge R, Lumbreras J, Vardoulakis S, *et al.* Analysis of long-range transport influences on urban PM₁₀ using two-stage atmospheric trajectory clusters [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(21): 4434-4450.
- [13] 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.
- [14] 石春娥, 姚叶青, 张平, 等. 合肥市 PM₁₀ 输送轨迹分类研究[J]. 高原气象, 2008, **27**(6): 1383-1391.
- Shi C E, Yao Y Q, Zhang P, *et al.* Transport trajectory classifying of PM₁₀ in Hefei [J]. Plateau Meteorology, 2008, **27**(6): 1383-1391.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 刘娜, 余晔, 何建军, 等. 兰州冬季大气污染来源分析[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(4): 509-516.
- Liu N, Yu Y, He J J, *et al.* Analysis of air pollutant transport in winter in Lanzhou [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, **28**(4): 509-516.
- [18] 王郭臣, 王东启, 陈振楼. 北京冬季严重污染过程的 PM_{2.5} 污染特征和输送路径及潜在源区[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(7): 1931-1937.
- Wang G C, Wang D Q, Chen Z L. Characteristics and transportation pathways and potential sources of a severe PM_{2.5} episodes during winter in Beijing [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(7): 1931-1937.
- [19] 王艳, 柴发合, 王永红, 等. 长江三角洲地区大气污染物输送规律研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(5): 1430-1435.
- Wang Y, Chai F H, Wang Y H, *et al.* Transport characteristics of air pollutants over the Yangtze Delta [J]. Environmental Science, 2008, **29**(5): 1430-1435.
- [20] 任传斌, 吴立新, 张媛媛, 等. 北京城区 PM_{2.5} 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_{2.5} [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(9): 2591-2598.
- [21] 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.
- [22] 严晓瑜, 嵇晓辉, 武万里, 等. 银川地区大气颗粒物输送路径及潜在源区分析[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(5): 1727-1738.
- Yan X Y, Gou X H, Wu W L, *et al.* Analysis of atmospheric particulate transport path and potential source area in Yinchuan [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(5): 1727-1738.
- [23] 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.
- [24] 刘娜, 余晔, 陈晋北, 等. 兰州春季沙尘过程 PM₁₀ 输送路径及其潜在源区[J]. 大气科学学报, 2012, **35**(4): 477-486.
- Liu N, Yu Y, Chen J B, *et al.* A study on potential sources and transportation pathways of PM₁₀ in spring in Lanzhou [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2012, **35**(4): 477-486.
- [25] 赵玉成, 德力格尔, 蔡永祥, 等. 西宁地区大气中黑碳气溶胶浓度的观测研究[J]. 冰川冻土, 2008, **30**(5): 789-794.
- Zhao Y C, Deli G E, Cai Y X, *et al.* Variation of black-carbon aerosol concentration observed in Xining [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, **30**(5): 789-794.
- [26] 谈昌蓉, 郭晓宁, 陈奇, 等. 西宁近地面臭氧特征及其影响因素[J]. 干旱气象, 2019, **37**(1): 31-39.
- Tan C R, Guo X N, Chen Q, *et al.* Study on surface ozone characteristics and its influencing factors in Xining [J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, **37**(1): 31-39.
- [27] 胡晓峰, 赵露, 李佳, 等. 西宁取暖季 PM_{2.5} 水溶性离子的污染特征研究[J]. 环境污染与防治, 2019, **41**(1): 95-100.
- Hu X F, Zhao L, Li J, *et al.* Research on pollution characteristics of water-soluble ions in PM_{2.5} during heating

- season in Xining [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2019, **41**(1): 95-100.
- [28] 郭晓宁, 马秀梅, 张青梅, 等. 青海高原一次沙尘重污染天气成因分析[J]. *中国环境监测*, 2020, **36**(1): 45-54.
- Guo X N, Ma X M, Zhang Q M, *et al.* Analysis of the transmission characteristics of a heavy dust pollution weather in Qinghai plateau[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2020, **36**(1): 45-54.
- [29] 许稳, 金鑫, 罗少辉, 等. 西宁近郊大气氮干湿沉降研究[J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1279-1288.
- Xu W, Jin X, Luo S H, *et al.* Dry and bulk nitrogen deposition in suburbs of Xining City[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1279-1288.
- [30] 窦筱艳, 赵雪艳, 徐珣, 等. 应用化学质量平衡模型解析西宁大气 $PM_{2.5}$ 的来源[J]. *中国环境监测*, 2016, **32**(4): 7-14.
- Dou X Y, Zhao X Y, Xu X, *et al.* Source apportionment of $PM_{2.5}$ in Xining by the chemical mass balance [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2016, **32**(4): 7-14.
- [31] 窦筱艳, 许嘉, 韩德辉, 等. 西宁市典型污染日 PM_{10} 输送规律研究[J]. *气象与环境学报*, 2012, **28**(2): 85-90.
- Dou X Y, Xu J, Han D H, *et al.* Transportation characteristics of PM_{10} in the typical pollution weather in Xining[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2012, **28**(2): 85-90.
- [32] 谢启玉, 何永晴, 朱宝文, 等. 西宁市区不同天气形势下的 PM_{10} 输送路径及潜在源区[J]. *气象与环境科学*, 2018, **41**(1): 56-61.
- Xie Q Y, He Y Q, Zhu B W, *et al.* Transportation path and potential source of PM_{10} in Xining city in different synoptic situations [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2018, **41**(1): 56-61.
- [33] 马明亮, 申红艳, 张加昆, 等. 西宁地区污染气象条件的数值模拟研究[J]. *高原气象*, 2013, **32**(6): 1765-1773.
- Ma M L, Shen H Y, Zhang J K, *et al.* Numerical simulation on meteorology condition of pollution in Xining [J]. *Plateau Meteorology*, 2013, **32**(6): 1765-1773.
- [34] 张磊. 西宁地区大气颗粒物污染形成的气象条件数值模拟研究[J]. *环境科学与管理*, 2019, **44**(11): 82-86.
- Zhang L. Numerical simulation of atmospheric particulate pollution formation in Xining area [J]. *Environmental Science and Management*, 2019, **44**(11): 82-86.
- [35] Draxler R R, Hess G D. Description of the HYSPLIT_4 modeling system[R]. Maryland: Silver Spring, 2018. 1-28.
- [36] 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.
- [37] 魏玉香, 童尧青, 银燕, 等. 南京 SO_2 、 NO_2 和 PM_{10} 变化特征及其与气象条件的关系[J]. *大气科学学报*, 2009, **32**(3): 451-457.
- Wei Y X, Tong R Q, Yin Y, *et al.* The variety of main air pollutants concentration and its relationship with meteorological condition in Nanjing city [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2009, **32**(3): 451-457.
- [38] Sugimoto N, Shimizu A, Matsui I, *et al.* A method for estimating the fraction of mineral dust in particulate matter using $PM_{2.5}$ -to- PM_{10} ratios[J]. *Particuology*, 2016, **28**: 114-120.

CONTENTS

Industrial Emission Characteristics and Control Countermeasures of VOCs in Chinese Rapid Economic Development Areas	MENG Bo-wen, LI Yong-bo, MENG Jing, <i>et al.</i>	(1023)
VOCs Emission Inventory and Variation Characteristics of Artificial Sources in Hubei Province in the Yangtze River Economic Belt	DAI Ling-wen, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1039)
Sources and Distribution Characteristics of HCBd in Rapid Economic Development Areas	TAO Yu-ming, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1053)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil of China (2000-2020): Temporal and Spatial Distribution, Influencing Factors	MA Yan, CHENG Lu, RUAN Zi-yuan, <i>et al.</i>	(1065)
Relationships Between Microplastic and Surrounding Soil in an E-Waste Zone of China	CHAI Bing-wen, YIN Hua, WEI Qiang, <i>et al.</i>	(1073)
Analysis of the Spatial Distribution of Heavy Metals in Soil from a Coking Plant and Its Driving Factors	GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, ZENG Wei-bin, <i>et al.</i>	(1081)
Source Apportionment and Spatial Distribution Simulation of Heavy Metals in a Typical Petrochemical Industrial City	SUN Xue-fei, ZHANG Li-xia, DONG Yu-long, <i>et al.</i>	(1093)
Heavy Metal Contents of Soil and Surface Dust and Its Ecological Risk Analysis in a Multifunctional Industrial Park	ZENG Wei-bin, GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1105)
Geochemical Patterns and Source Analysis of Soil Heavy Metals in an Iron and Manganese Ore Area of Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi, <i>et al.</i>	(1114)
Application Case of Accurate Site Investigation with Life-Cycle Conceptual Site Model Development	LI Pei-zhong, WU Nai-jin, WANG Hai-jian, <i>et al.</i>	(1123)
Levels and Risk Assessment of Short and Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soil from Paper Mill Area	ZHANG Pei-xuan, GAO Li-rong, SONG Shi-jie, <i>et al.</i>	(1131)
Characterization and Health Risks of PCDD/Fs, PCBs, and PCNs in the Soil Around a Typical Secondary Copper Smelter	HU Ji-cheng, WU Jing, XU Chen-yang, <i>et al.</i>	(1141)
Effect of Citric Acid and Phosphorus Coexistence on Cadmium Adsorption by Soil	SONG Zi-teng, ZUO Ji-chao, HU Hong-qing, <i>et al.</i>	(1152)
Uptake and Accumulation of Cadmium and Zinc by Two Energy Grasses: A Field Experiment	ZHENG Rui-lun, SHI Dong, LIU Wen-ju, <i>et al.</i>	(1158)
Bioaccumulation and Translocation Characteristics of Heavy Metals in a Soil-Maize System in Reclaimed Land and Surrounding Areas of Typical Vanadium-Titanium Magnetite Tailings	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, SUN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1166)
Cd Accumulation Characteristics in Different Populations of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Salt Stress	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(1177)
Effect of Water Regimes on Pb and Cd Immobilization by Biochar in Contaminated Paddy Soil	TANG Jia-qing, ZHANG Xu, HUANG Guo-yong, <i>et al.</i>	(1185)
Effects of Chitosan-modified Biochar on Formation of Methylmercury in Paddy Soils and Its Accumulation in Rice	YANG Xue-ling, WANG Ming-xing, XU Guo-min, <i>et al.</i>	(1191)
Effects of Chromium Pollution on Soil Bacterial Community Structure and Assembly Processes	YU Hao, AN Yi-jun, JIN De-cai, <i>et al.</i>	(1197)
Analysis of Changes and Factors Influencing Air Pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei Region During the COVID-19 Pandemic	ZHAO Xue, SHEN Nan-chi, LI Ling-jun, <i>et al.</i>	(1205)
Impact of Pollutant Emission Reduction on Air Quality During the COVID-19 Pandemic Control in Early 2020 Based on RAMS-CMAQ	LIU Hou-feng, XU Wei, WEI Min, <i>et al.</i>	(1215)
Light-absorbing Properties and Sources of PM _{2.5} Organic Components at a Suburban Site in Northern Nanjing	SHANG Yue, YU Huan, MAO Yu-hao, <i>et al.</i>	(1228)
Pollution Characteristics and Chromophore Types of Brown Carbon in Xi'an	CHEN Qian, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i>	(1236)
Source and Health Risk Assessment of PM _{2.5} -Bound Metallic Elements in Road Dust in Zibo City	GUO Qing-yuan, BAI Wen-yu, ZHAO Xue-yun, <i>et al.</i>	(1245)
Health Benefit Assessment of PM _{2.5} Pollution Control in Beijing	DU Pei, WANG Jian-zhou, <i>et al.</i>	(1255)
Seasonal Characteristics of Air Pollutant Sources and Transport Pathways in Xining City	LIU Na, YU Ye, MA Xue-qian, <i>et al.</i>	(1268)
Concentrations and Patterns of Atmospheric Particulate Nitrogen and Phosphorus During Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	YUAN Gang, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>	(1280)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Using Mobile Monitoring Around the Industrial Parks in the Yangtze River Delta Region of China	WANG Hong-li, GAO Ya-qin, JING Sheng-ao, <i>et al.</i>	(1298)
Characteristics and Cause Analysis of Heavy Air Pollution in a Mountainous City During Winter	LIU Zhuo-cheng, NIU Yue-yuan, WU Jing, <i>et al.</i>	(1306)
Gridded Emission Inventories of Major Criteria Air Pollutants and Source Contributions in Lan-Bai Metropolitan Area, Northwest China	WANG Wen-peng, WANG Zhan-xiang, LI Ji-xiang, <i>et al.</i>	(1315)
VOCs Removal and Emission Monitoring of Beijing Bulk Gasoline Terminals in 2012-2019	HUA Lan-ying, CUI Tong, LI Jin-xiang, <i>et al.</i>	(1328)
Emission Inventory of Air pollutants for the Harmless Treatment of Municipal Solid Waste	MA Zhan-yun, JIANG Yu-cong, REN Jia-xue, <i>et al.</i>	(1333)
Response of Bacteriophage Polymers to Hypoxic Conditions in the Surface Sediments of the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	YIN Mei-ling, DUAN Li-qin, SONG Jin-ming, <i>et al.</i>	(1343)
Human Health Risk Assessment of Phenol in Poyang Lake Basin	XU Qian-yun, AI Shun-hao, GAO Xiang-yun, <i>et al.</i>	(1354)
Spatial-Temporal Variation of Water Environment Quality and Pollution Source Analysis in Hengshui Lake	LIU Wei-wei, GUO Zi-liang, WANG Da-an, <i>et al.</i>	(1361)
Composition and Distribution Characteristics of Microplastics in Danjiangkou Reservoir and Its Tributaries	PAN Xiong, LIN Li, ZHANG Sheng, <i>et al.</i>	(1372)
Temporal and Spatial Evolution of Storm Runoff and Water Quality Assessment in Jinpen Reservoir	HUANG Cheng, HUANG Ting-lin, LI Yang, <i>et al.</i>	(1380)
Influence of Storm Runoff on the Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in a Drinking Water Reservoir During the Flood Season	LI Cheng-yao, HUANG Ting-lin, WEN Cheng-cheng, <i>et al.</i>	(1391)
Distribution Characteristics of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Bearing Pollutants in the Ancient Town Rivers of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, CHEN Tan, <i>et al.</i>	(1403)
Chemical Characteristics and Causes of Groups Water in Niangziguan Spring	TANG Chun-lei, ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, <i>et al.</i>	(1416)
Adsorption Behavior of Phosphate by CaO ₂ Remolded Sediment	XU Chu-tian, LI Da-peng, WANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1424)
Nitrogen and Phosphorus Removal in Surface Flow Constructed Wetland Planted with <i>Myriophyllum elatinoide</i> s Treating Swine Wastewater in Subtropical Central China	WANG Li-sha, LI Xi, LI Yu-yuan, <i>et al.</i>	(1433)
Accelerated Degradation of Aqueous Recalcitrant Iodinated Contrasting Media Using a UV/SO ₃ ²⁻ Advanced Reduction Process	LIU Zi-qi, QIU Fu-guo, LAI Man-ting, <i>et al.</i>	(1443)
Degradation of Dye Rhodamine B by Solar Thermally Activated Persulfate	MA Meng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(1451)
One-step Preparation of Lanthanum-Magnesium Ferrite and Its Phosphate Adsorption Capacity in Aqueous Solutions	BAI Run-ying, SONG Bo-wen, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(1461)
Pollutant Removal Efficiency of Different Units Along a Mature Landfill Leachate Treatment Process in a Membrane Biological Reactor-Nanofiltration Combined Facility	SHAO Li-ming, DENG Ying-tao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i>	(1469)
Biological Conversion Mechanism of Sulfate Reduction Ammonium Oxidation in ANAMMOX Consortia	BI Zhen, DONG Shi-yu, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(1477)
Microbial Community Structure of Waste Water Treatment Plants in Different Seasons	HE Yun, LI Kui-xiao, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(1488)
Organ-Specific Accumulation and Toxicokinetics of Ephedrine in Adult Zebrafish (<i>Danio rerio</i>)	YIN Xing-xing, GUO Chang-sheng, DENG Yang-hui, <i>et al.</i>	(1496)
Characteristics and Evaluation of Soil Rare Earth Element Pollution in the Bayan Obo Mining Region of Inner Mongolia	WANG Zhe, ZHAO Ying-chen, LUO Yi-fei, <i>et al.</i>	(1503)
Factors Affecting the Translocation and Accumulation of Cadmium in a Soil-Crop System in a Typical Karst Area of Guangxi Province, China	MA Hong-hong, PENG Min, GUO Fei, <i>et al.</i>	(1514)
Effects of Superparamagnetic Nanomaterials on Soil Microorganisms and Enzymes in Cadmium-Contaminated Paddy Fields	FANG Dan-dan, ZHANG Li-zhi, WANG Qiang, <i>et al.</i>	(1523)
Effects of Water Management and Silicon Application on Iron Plaque Formation and Uptake of Arsenic and Cadmium by Rice	CHEN Jia, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i>	(1535)
Biological Effect of Tetracycline Antibiotics on a Soil-Lettuce System and Its Migration Degradation Characteristics	WANG Wei-zhong, CHI Sun-lin, XU Wei-hong, <i>et al.</i>	(1545)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from the Ridges and Furrows of a Vegetable Field	XIONG Wei-xia, JIANG Chang-sheng, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1559)
Effects of Biochar and Straw on Soil N ₂ O Emission from a Wheat Maize Rotation System	TANG Zhan-ming, LIU Xing-ren, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i>	(1569)
Overview on Habitat Monitoring Methods Under Watershed Ecological Space Management	YIN Kun, LIU Hai-jiang, WANG Guang, <i>et al.</i>	(1581)