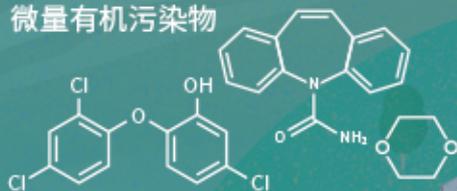


城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路  
王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪营

微量有机污染物



## 深度处理

- 污染物非靶向筛查
- 新型处理技术开发
- 处理效率替代性指标
- 工艺运行指南与排放标准

污水处理厂

深度处理

污水再生  
利用

湖泊湿地等

景观娱乐  
用水

污水达标  
排放

下游城市  
水源地

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年6月

第42卷 第6期  
Vol.42 No.6

目次

综述与专论

城市环境生物安全研究的进展与挑战 ..... 苏建强, 安新丽, 胡安谊, 朱永官 (2565)  
 城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路 ..... 王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪莹 (2573)  
 污泥 EPS 作为阻燃剂的机制归纳与潜力分析 ..... 郝晓地, 赵梓丞, 李季, 时琛, 吴远远 (2583)

研究报告

北京大气 PM<sub>2.5</sub> 载体金属浓度、来源及健康风险的城郊差异 ..... 周安琪, 刘建伟, 周旭, 毕思琪, 张博哈, 高越, 曹红斌 (2595)  
 京津冀及周边 MAIAC AOD 和 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度特征及相关性分析 ..... 金国因, 杨兴川, 晏星, 赵文吉 (2604)  
 天津市 PM<sub>2.5</sub> 中二次硝酸盐形成及防控 ..... 肖致美, 武婷, 卫昱婷, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 陈魁, 邓小文 (2616)  
 南京市大气细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 ..... 傅银银, 文浩哲, 王向华, 于南洋, 李冰, 韦斯 (2626)  
 汾渭平原吸收性气溶胶时空演化及潜在源区分析 ..... 刘旻霞, 李亮, 于瑞新, 宋佳颖, 张国娟, 穆若兰, 徐璐 (2634)  
 西南典型区域夏季大气含氧挥发性有机化合物来源解析 .....  
 ..... 陈木兰, 王赛男, 陈天舒, 朱波, 彭超, 周佳维, 车汉雄, 黄汝辉, 杨复沫, 刘合凡, 谭钦文, 韩丽, 陈军辉, 陆克定, 陈阳 (2648)  
 气溶胶中溶解性有机质 (DOM) 液相氧化 ..... 陶冶, 陈彦彤, 李楠旺, 张敬宇, 叶招莲, 盖鑫磊 (2659)  
 基于 MERRA-2 再分析资料的上海市近 40 年大气黑碳浓度变化及潜在来源解析 .....  
 ..... 曹闪闪, 段玉森, 高婵婵, 苏玲, 杨怡萱, 张洋, 蔡超琳, 刘敏 (2668)  
 石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演替特征及来源解析 ..... 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 崔建升, 陈静, 刘大喜, 石文雅 (2679)  
 基于光化学指数的邯郸市臭氧生成敏感性 ..... 牛元, 程水源, 欧盛菊, 姚诗音, 沈泽亚, 关攀博 (2691)  
 基于 Landsat 数据的关中盆地腹地 AOD 时空格局及城市化对其影响 ..... 郑玉蓉, 王旭红, 张秀, 胡贵贵, 梁秀娟, 牛林芝, 韩海青 (2699)  
 基于卫星遥感和地面观测的人为源 VOCs 区域清单多维校验 ..... 王玥, 魏巍, 任云婷, 王晓琦, 陈赛赛, 程水源 (2713)  
 中原城市群国家干线公路 SOA 生成潜势估算 ..... 王娜萍, 李海萍, 张帆 (2721)  
 北京市“大气十条”实施的空气质量改善效益 ..... 卢亚灵, 范朝阳, 蒋洪强, 牛传真, 李勃 (2730)  
 工业大气污染源排放绩效定量评价及应用 ..... 李廷昆, 冯银厂, 吴建会, 毕晓辉, 张裕芬 (2740)  
 基于生态风险的我国水环境高风险抗生素筛选排序 ..... 周力, 刘珊, 郭家骅, 李琦 (2748)  
 基于 RDA-REM 模型的我国再生水开发利用潜力 ..... 郑锦涛, 马涛, 刘九夫, 彭安帮, 邓晰元, 郑皓 (2758)  
 基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析 ..... 荣易, 秦成新, 杜鹏飞, 孙博 (2769)  
 大型浅水湖泊水质模型边界负荷敏感性分析 ..... 王亚宁, 李一平, 程月, 唐春燕, 陈刚 (2778)  
 不同流域水陆过渡带磷有效态的特征对比及环境意义 ..... 朱海, 袁旭音, 叶宏萌, 成瑾, 毛志强, 韩年, 周慧华 (2787)  
 基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析 .....  
 ..... 李华林, 张建军, 张耀方, 常国梁, 时迪迪, 徐文静, 宋卓远, 于佩丹, 张守红 (2796)  
 长期施肥和耕作下紫色土坡耕地径流 TN 和 TP 流失特征 ..... 吴小雨, 李天阳, 何丙辉 (2810)  
 渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素 ..... 刘鑫, 向伟, 司炳成 (2817)  
 太湖流域上游南苕溪水夏季水体溶存二氧化碳和甲烷浓度特征及影响因素 .....  
 ..... 梁佳辉, 田琳琳, 周钟昱, 张海阔, 张方方, 何圣嘉, 蔡廷江 (2826)  
 低温期浅水湖泊氮的分布及无机氮扩散通量: 以白洋淀为例 ..... 文艳, 单保庆, 张文强 (2839)  
 覆盖条件下底泥微环境对内源磷释放的影响 ..... 陈姝彤, 李大鹏, 徐楚天, 张帅, 丁玉琴, 孙培荣, 黄勇 (2848)  
 圩区河道底泥腐殖酸对重金属和抗生素的共吸附 ..... 薛向东, 杨宸豪, 于荐麟, 庄海峰, 方程冉 (2856)  
 两种 PPCPs 对雅鲁藏布江沉积物硝化作用的影响 ..... 凌欣, 徐慧平, 陆光华 (2868)  
 铁碳微电解及沸石组合人工湿地的废水处理效果 ..... 赵仲婧, 郝庆菊, 张尧钰, 熊维霞, 曾唯, 陈俊江, 江长胜 (2875)  
 CDs-BOC 复合催化剂可见光下活化过硫酸盐降解典型 PPCPs ..... 雷倩, 许路, 艾伟, 李志敏, 杨磊 (2885)  
 pg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOBr/Ag 复合材料的制备及其光催化降解磺胺甲噁唑 ..... 杨利伟, 刘丽君, 夏训峰, 朱建超, 高生旺, 王洪良, 王书平 (2896)  
 海藻酸钠负载硫化零价铁对水体中 Cr(VI) 的还原去除 ..... 王旭, 杨欣楠, 黄币娟, 刘壮, 牟诗萌, 程敏, 谢燕华 (2908)  
 超顺磁性纳米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub> 功能化材料对镉的吸附机制 ..... 张立志, 易平, 方丹丹, 王强 (2917)  
 典型药物在医院废水和城市污水处理厂中的污染特征及去除情况 ..... 叶璞, 游文丹, 杨滨, 陈阳, 汪立高, 赵建亮, 应光国 (2928)  
 印染废水循环利用抗生素抗性基因丰度变化特性 ..... 徐瑶瑶, 王锐, 金鑫, 石炬, 王岩, 金鹏康 (2937)  
 短程硝化反硝化除磷颗粒污泥的同步驯化 ..... 王文琪, 李冬, 高鑫, 刘博, 张杰 (2946)  
 厌氧氨氧化颗粒污泥的长期保藏及快速活性恢复 ..... 李冬, 刘名扬, 张杰, 曾辉平 (2957)  
 市政污泥热解过程中重金属迁移特性及环境效应评估 ..... 姜媛媛, 王彦, 段文焱, 左宁, 陈芳媛 (2966)  
 不同作物农田土壤抗生素抗性基因多样性 ..... 黄福义, 周曙仡, 王佳妮, 苏建强, 李虎 (2975)  
 宁夏养牛场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征 ..... 张俊华, 陈睿华, 刘吉利, 尚天浩, 沈聪 (2981)  
 温度和搅拌对牛粪厌氧消化系统抗生素抗性基因变化和微生物群落的影响 .....  
 ..... 许继飞, 张秋萍, 朱天骄, 秦帅, 朱文博, 庞小可, 赵吉 (2992)  
 小麦秸秆生物质炭施用对不同耕作措施土壤碳含量变化的影响 ..... 刘振杰, 李鹏飞, 黄世威, 金相乐, 张阿凤 (3000)  
 农牧交错带典型区土壤氮磷空间分布特征及其影响因素 ..... 张燕江, 王俊鹏, 王瑜, 张兴昌, 甄庆, 李鹏飞 (3010)  
 汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价 ..... 王锐, 邓海, 贾中民, 王佳彬, 余飞, 曾琴琴 (3018)  
 调理剂对磷镉富集土壤中两种元素交互作用的影响 ..... 黄洋, 胡学玉, 曹坤坤, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (3028)  
 S-烯丙基-L-半胱氨酸缓解水稻种子幼根和幼芽镉胁迫机制 ..... 程六龙, 黄永春, 王常荣, 刘仲齐, 黄益宗, 张长波, 王晓丽 (3037)  
 连续 4 个生长季大气 CO<sub>2</sub> 升高与土壤铅 (Pb) 污染耦合下刺槐幼苗根际土壤微生物特征 .....  
 ..... 贾夏, Lkhagvajargal Khadkurel, 赵永华, 张春燕, 张宁静, 高云峰, 王子威 (3046)  
 嗜热脂肪地芽孢杆菌对聚苯乙烯的降解性能 ..... 邢睿智, 赵子强, 赵文琪, 陈志, 陈金凤, 周顺桂 (3056)  
 冬青和女贞叶表面颗粒物微形态及叶际细菌群落结构 ..... 李慧娟, 徐爱玲, 乔凤祿, 蒋敏, 宋琪 (3063)  
 罗红霉素对大型溛生殖生长及抗氧化系统的影响 ..... 张凌玉, 刘建超, 冷阳, 陆光华 (3074)  
 中国粮食作物产量和木本植物生物量与地表臭氧污染的响应关系 ..... 冯兆忠, 彭金龙 (3084)  
 《环境科学》征订启事 (2698) 《环境科学》征稿简则 (2712) 信息 (3027, 3055, 3073)

# 汾渭平原吸收性气溶胶时空演化及潜在源区分析

刘旻霞, 李亮, 于瑞新, 宋佳颖, 张国娟, 穆若兰, 徐璐

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

**摘要:** 在绿色发展理念的带动下, 全国多地的空气质量逐渐改善, 但汾渭平原大气污染程度逐年走高, 颗粒物污染尤为严重。利用 OMI/Aura OMAERUV L2 气溶胶数据集和 PM<sub>2.5</sub> 站点数据, 采用空间自相关分析及后向轨迹模型等方法, 探索 2005 ~ 2019 年汾渭平原吸收性气溶胶的时空演化过程, 揭示其高值极主导类型以及污染物传输路径和潜在源区。结果表明: ① 2005 ~ 2019 年汾渭平原吸收性气溶胶指数 (absorbing aerosol index, AAI) 年均值波动上升, 2006、2013 和 2017 年为汾渭平原 AAI 高值转折点, 年均值均大于 0.63; 西安和临汾 AAI 空间稳定性较差为高高聚集极点, 在 15 年间高高聚集区域面积增长 15.3%, 空间分布更加集中, 形成由西安和临汾两极相连的条带状分布区域, 占区域总面积的 24.2%; 低低聚集区域面积锐减 6.2%, 转变为无特征区域。② 汾渭平原 AAI 冬季数值最高、覆盖区域最广, 在临汾极和西安极突破 0.8, 研究区 AAI 大于 0.6 的区域占比 91.5%, 其次为春季 (AAI > 0.4)、秋季 (AAI > 0.3), 夏季全境低值。汾渭平原 AAI 高值受大气扩散条件、气温和降水量变化影响显著。③ 利用后向轨迹和潜在源贡献模型得出西安极和临汾极污染物的远距离输送气团来自西北方向, 近距离输送气团来自偏东和偏南方向, 结合源区下垫面类型确定两个远距离沙尘传输源区 (西北风源、北风源)、两个碳质源区 (东风源和南风源) 和一个沙尘和碳质共同作用源区 (黄土高原源)。其中西北风源、黄土高原源和南风源对西安极影响显著, 东风源和黄土高原源对临汾极影响显著, 临汾极虽受一定程度西北风源和北风源沙尘影响, 但影响较小, 结合 CO 空间分布和其与 AAI 相关性系数的空间分布得出, 临汾极吸收性气溶胶为碳质主导, 西安极为沙尘和碳质共同作用。

**关键词:** 吸收性气溶胶; 潜在源区; 后向轨迹; 时空演化; 汾渭平原

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)06-2634-14 DOI: 10.13227/j.hjkk.202010098

## Spatio-temporal Patterns and Potential Sources of Absorbing Aerosols in the Fenwei Plain

LIU Min-xia, LI Liang, YU Rui-xin, SONG Jia-ying, ZHANG Guo-juan, MU Ruo-lan, XU Lu

(College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Air quality has gradually improved in many parts of China; however, air pollution is become more severe in the Fenwei Plain. Using OMI/Aura OMAERUV L2 and PM<sub>2.5</sub> data, spatial autocorrelation analysis and back trajectory modeling were used to explore the spatio-temporal patterns of absorptive aerosols over the Fenwei Plain, and the dominant types, transmission paths, and potential source areas were identified. The main results can be summarized as follows: ① Annual mean absorbing aerosol index (AAI) values increased between 2005 and 2019, with high period occurring in 2006, 2013, and 2017, with values exceeding 0.63. Xi'an and Linfen were identified as a 'high-high' cluster, with AAI showing poor spatial stability and a 15.3% increase in area over the past 15 years. In contrast, the area connecting Xi'an and Linfen, which occupies 24.2% of the total area of the region, was identified as a 'low-low' cluster, with a sharp drop of 6.2% in area; ② The Fenwei Plain has high AAI values across a large area in winter, exceeding 0.8 in Linfen and Xi'an, and 91.5% of the study area exceeding 0.6. Values were lower in spring (AAI > 0.4) and autumn (AAI > 0.3), with the lowest values occurring in summer. The atmospheric diffusion conditions in spring, autumn, and winter are poor, associated with anticyclonic high-pressure events. The observed high AAI values were significantly affected by atmospheric diffusion conditions, temperature, and precipitation; ③ Back trajectory and source contribution modeling showed that long-range transport of air masses from Xi'an and Linfen occurs from the northwest, and short-range transport air masses occurs from the east and south. Two long-range sand and dust source areas were determined (with northwestern and northern wind sources); two carbon source areas were identified (with eastern and southern wind sources); and one combined sand and carbon source area was identified (from the Loess Plateau). Of these sources, the northwestern wind source, the Loess Plateau, and the southern wind source have significant influence in Xi'an, and the eastern wind source and the Loess Plateau have a significant impact on Linfen. Linfen is little affected by the northwestern wind source and the dust from the northern wind source. Based on the spatial distribution of CO and its correlation with AAI, it is concluded that carbon in the dominant absorbent aerosol in Linfen dust and carbon are most important in Xi'an.

**Key words:** absorbing aerosol; potential sources; backward trajectory; tempo-spatial evolution; Fenwei Plain

自中国加入 WTO 以来, 国内工业化和城镇化水平有了突飞猛进的增长<sup>[1]</sup>, 同时也因其粗放式的发展模式, 产生了很多环境问题<sup>[2]</sup>. 近几年大气重污染事件频发, 给中国空气质量带来压力, 对我国“一带一路”战略中生态文明建设提出了严峻挑战。

吸收性气溶胶由大气中固态和液态颗粒物的吸光组分构成, 是经济快速发展地区的首要污染物<sup>[3,4]</sup>, 它

收稿日期: 2020-10-17; 修订日期: 2020-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31760135)

作者简介: 刘旻霞 (1972 ~), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为大气污染及生态恢复, E-mail: xiaminl@163.com

可细分为生物质不完全燃烧所产生的碳气溶胶和沙尘远距离输送及地表扬尘引起的沙尘气溶胶<sup>[5]</sup>,其中碳气溶胶可作为化学反应的载体<sup>[6]</sup>,是大气颗粒污染物的重要组成部分,占颗粒污染物浓度的15%~80%<sup>[7]</sup>;沙尘气溶胶约占对流层颗粒物浓度的一半<sup>[8]</sup>.吸收性气溶胶的时空分布具有显著性差异<sup>[9]</sup>,它对大气环境影响显著,可影响地球辐射平衡<sup>[10]</sup>、能间接影响污染区域的大气能见度<sup>[11,12]</sup>、它与云相互作用可改变对流云特性并影响降水的可能性<sup>[13,14]</sup>,它还会在边界层产生一个稳定层节从而阻碍污染物的湍流混合<sup>[15]</sup>.人类活动对气溶胶的影响显著<sup>[16]</sup>,同时气溶胶也反作用于人类,严重危害公众健康<sup>[17]</sup>,引发血管、心肺和呼吸系统等疾病<sup>[18,19]</sup>.因此,研究吸收性气溶胶的时空分布变化,探索其潜在来源地,对提出针对性的防控对策具有重要意义.

吸收性气溶胶在经济快速发展的城市<sup>[4,6,20,21]</sup>已有较好的研究基础,但在城市群或区域<sup>[22,23]</sup>以及全国范围的研究较少.目前,一部分国内外学者使用离子色谱仪<sup>[24]</sup>、气溶胶质谱仪<sup>[25,26]</sup>、黑碳仪<sup>[21]</sup>、热光碳分析仪<sup>[27,28]</sup>以及太阳光度计<sup>[29]</sup>对小区域范围内颗粒物的水溶性和吸光性等组分进行分析,并根据组成成分进行溯源;其他学者利用潜在源函数模型<sup>[9,30,31]</sup>探究吸收性气溶胶(沙尘和碳质)的潜在源区;使用向量回归机与BP人工神经网络结合<sup>[32,33]</sup>对颗粒物浓度进行估算;WRF-chem模式<sup>[34,35]</sup>通过考虑大气物理化学过程来模拟大气污染物的形成机制以及污染物间的相互影响;GEOS-chem模式<sup>[36]</sup>探索生物质燃烧产物在大气中的迁移;地理回归加权模型<sup>[37]</sup>揭示自然和社会经济等因素对颗粒物时空分布变化的影响和PFM模型<sup>[38]</sup>等对大区域吸收性颗粒物的时空演化格局等进行研究.颗粒物站点的实时监测数据虽是最为常用的数据源,但由于地面监测站点数量少,分布受地形影响大,所以在大区域空间监测上会显得捉襟见肘.本文使用卫星观测数据,利用其强空间覆盖能力并结合基站监测数据探究长时间尺度和大区域吸收性气溶胶的时空演化过程.

汾渭平原大气污染严重,当2013年大气污染防治行动计划<sup>[39]</sup>发布后国内多地空气质量逐年变好,汾渭平原也出现短暂的变好态势,但从2015年起便开始反弹,成为全国空气污染最严重的区域之一,并于2018年被赋予重点督察,纳入国家大气污染防治重点区域.汾渭平原大气污染现状严重制约当地经济发展、居民身体健康和居住满意度.目前该区域缺少长时间序列吸收性气溶胶的研究,缺少气象因子对

该地大气污染的影响和吸收性气溶胶类别及潜在源区的分析.基于此,本文以汾渭平原为研究对象,利用2005~2019年OMERUV遥感数据集、基站PM<sub>2.5</sub>和CO数据,并结合气象因素对汾渭平原吸收性气溶胶的时空分布、稳定性、聚集类型、季节变化特征、气温降水、大气扩散条件、污染类型和潜在源区进行研究,以为汾渭平原大气污染治理提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

汾渭平原(33°33'~38°42'N,106°20'~114°07'E),由汾河平原、渭河平原及其台塬阶地组成,是黄河中游地区最大的冲击平原(图1).包括陕西西安、宝鸡、咸阳、渭南、铜川、杨凌示范区、西咸新区,山西太原、晋中、吕梁、临汾、运城以及河南洛阳、三门峡,区域总面积约15万km<sup>2</sup>.区域产业结构偏重,焦化产能1.07亿t(占全国16%),工业排放量大污染治理水平亟待提高.能源结构以煤为主,冬季散煤取暖污染严重,煤的清洁化利用水平偏低,四面环山极不利于污染物扩散.汾渭平原属于暖温带半湿润气候,年均温度6~14℃,海拔107~3748m,年降水量420~900mm主要集中在5~9月.

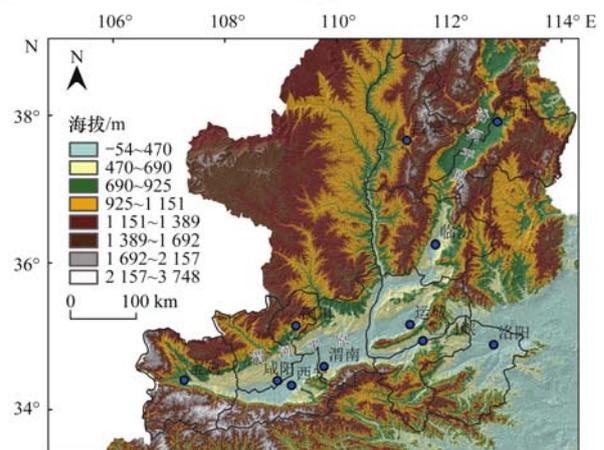


图1 研究区概况示意

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

### 1.2 数据来源

本研究所使用的数据包括AAI、PM<sub>2.5</sub>质量浓度数据、CO质量浓度数据和气象资料.其中AAI数据来源于美国国家航天航空局(NASA)下设的戈达德地球科学数据和信息服务中心(GES DISC),是由搭载于Aura卫星上的臭氧监测仪(OMI),通过近紫外算法反演得到的OMAERUV L2数据集,利用编程软件将AAI数据提取并进行栅格化处理得到其空间

分布.  $PM_{2.5}$  和 CO 质量浓度数据来源于中国环境监测总站, 将二者进行空间插值, 并分别与 AAI 进行栅格代数运算, 显现二者相关系数空间分布, 其中  $PM_{2.5}$  数据可验证 AAI 的准确性, CO 数据可作为碳质示踪物. 气温和降水量数据源于国家气象信息中心 (<http://data.cma.cn/>). 气团轨迹数据来自于美国国家环境预报中心的再分析资料 (NCEP, <https://psl.noaa.gov/>).

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 稳定性分析

使用标准偏差 (standard deviation) 分析计算 2005 ~ 2019 年汾渭平原 AAI 变化的稳定性. 标准偏差作为测量数据离散程度的统计指标, 将其用于评估时间序列上的稳定性, 计算公式如下:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{n-1}} \quad (1)$$

式中, SD 为标准偏差;  $x_{ij}$  为第  $i$  年  $j$  月的 AAI 均值,  $\bar{x}_j$  为所有样本的均值,  $n$  为样本数. 标准偏差越小, 表示在这一时间范围内该区域 AAI 波动小, 离散程度弱, 具有较好的稳定性, 反之同理<sup>[40]</sup>.

#### 1.3.2 空间自相关分析 (Moran's $I$ )

莫兰指数是用于度量空间自相关的一个重要指标. 一般分为全局莫兰指数 (global Moran's  $I$ ) 和局部莫兰指数 (Anselin local Moran's  $I$ ). 全局莫兰指数能判断属性的分布是否具有聚集现象和是否存在异常值, 可以体现空间聚集特征的显著性. 随着空间分布位置的聚集, 相关性也就越显著. 本文采用全局莫兰指数来判断汾渭平原相邻空间单元吸收性气溶胶的聚集程度和显著性, 计算公式如下:

$$I = \frac{n}{S_0} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} z_i z_j}{\sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (2)$$

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \quad (3)$$

$$Z = I - E[I] / \sqrt{V[I]} \quad (4)$$

$$E[I] = -1 / (n-1) \quad (5)$$

$$V[I] = E[I^2] - E[I]^2$$

式中,  $I$  表示全局莫兰指数,  $z_i$  和  $z_j$  分别表示空间单元  $i$  和  $j$  的污染物数值与其平均值的偏差,  $w_{ij}$  表示空间单元  $i$  和  $j$  之间的空间权重,  $n$  表示空间单元总数,  $S_0$  表示所有空间权重的聚合, 当 ( $P < 0.05$ ) 且  $z$  值超过临界值 1.65 (拒绝零假设设定的阈值) 时通过显著性检验. 对权重进行标准化处理, 指数值落在  $[-1, 1]$  的范围之内.

局部莫兰指数 (Anselin local Moran's  $I$ ) 揭示局部空间域在相邻空间上的自相关性, 凸显局部区域的空间聚集程度, 计算公式为:

$$I_j = \frac{nz_i \sum_{j=1}^n w_{ij} z_j}{\sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (6)$$

式中,  $I_j$  表示局部莫兰指数,  $z_i$ 、 $z_j$ 、 $w_{ij}$  和  $n$  与全局莫兰指数表示一致. 当  $I_j > 0$  时, 为高值周边聚集高值或低值周边聚集低值 (即高高聚集或低低聚集); 当  $I_j < 0$  时, 为高低值相互交错 (高低聚集或低高聚集); 当  $I_j = 0$  时, 为随机分布 (无特征区域).

#### 1.3.3 空间相关性

借助皮尔逊相关系数使两种属性栅格的像元之间进行相关性代数运算, 来显示两种属性栅格空间上存在的关联, 计算公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (7)$$

式中,  $X_i$  和  $Y_i$  表示两种属性的栅格,  $\bar{X}$  和  $\bar{Y}$  表示两种属性栅格的均值,  $n$  表示栅格总数. 其值范围为  $[-1, 1]$ , 相关系数显示为正值时表明两属性的像元之间存在正相关, 若为负值则说明其存在负相关,  $|\pm 1|$  取值的大小代表空间相关性的强弱.

#### 1.3.4 污染物潜在贡献源分析法 (PSCF)

潜在贡献源函数 (potential source contribution function, PSCF), 是基于 HYSPLIT 后向轨迹终点的受体模型, 它构建可能的源区概率场, 帮助评估受体位置所测量粒子的运输路径和潜在源区<sup>[41-44]</sup>. 本研究利用 TrajStat, 根据气团轨迹覆盖范围和气团势位高度的变化来选择潜在源范围和后向轨迹模拟时长. 将 HYSPLIT 模型的 96 h 后向轨迹分配到  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  分辨率的网格, 当气团通过位于特定单元的源区域时, 污染物通过空气团收集, 沿气流轨迹输送至受体位置<sup>[31]</sup>. 模型中拟定 AAI 小于 0.2 为阈值, 网格单元中的 PSCF 值在 0 ~ 1 之间, 表示网格单元成为源的可能性. 具有较高 PSCF 值的区域有很大的增强受体处污染物浓度负荷的潜力. PSCF 的值是研究区内经过  $ij$  网络的污染轨迹数  $M_{ij}$  与经过该网格的所有轨迹数  $N_{ij}$  的比值, 即:

$$PSCF_{ij} = W_{ij} \times \left[ \sum M_{ij} / \sum N_{ij} \right] \quad (8)$$

PSCF 值可以解释为一个条件概率, 在小的  $N_{ij}$  情况下, PSCF <sub>$ij$</sub>  值将很高, 这将使得值的置信度变得非常低, 为了消除这种不确定性并增强统计平衡, 引入权重函数  $W_{ij}$ <sup>[31,45]</sup>:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.0 & N_{ij} > 2 N_{avg} \\ 0.75 & N_{avg} < N_{ij} \leq 2 N_{avg} \\ 0.5 & 0.5 N_{avg} < N_{ij} \leq N_{avg} \\ 0.15 & 0 < N_{ij} \leq 0.5 N_{avg} \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $N_{avg}$  表示研究区网格单元中气流轨迹端点数均值.

## 2 结果与分析

### 2.1 汾渭平原 AAI 时序变化

AAI 是研究吸收性气溶胶时空分布的重要参数, 它可表征区域吸收性气溶胶的浓度<sup>[22]</sup>, AAI 越大吸收性气溶胶浓度越高. 2005 ~ 2019 年汾渭平原 AAI 的年际变化呈缓慢波动上升态势, Slope = 0.002 (图 2). 其中 2006 ~ 2008 年, 吸收性气溶胶显著下降, 年均减少 0.048, 于 2008 年出现 15 年来的最低值 0.464; 2009 ~ 2013 年呈明显增长趋势, 2010 年 AAI 波动剧烈, 受春季 (3 ~ 5 月) 西北地区远距离沙尘传输影响<sup>[46]</sup>, 2013 年增幅显著达到近 15 年来的最大值 0.687; 2014 ~ 2015 年下降趋势较为明显, Slope = -0.066; 2015 年后汾渭平原 AAI 开始反弹, 在 2018 年被正式纳入国家大气污染防治重点区域后出现下降态势.

### 2.2 汾渭平原 AAI 空间格局

2005 ~ 2019 年汾渭平原 AAI 年均空间分布显

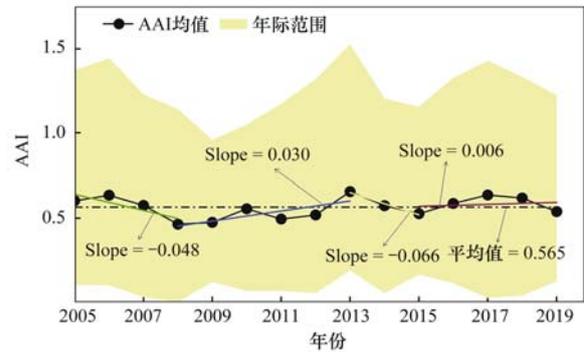


图 2 2005 ~ 2019 年汾渭平原 AAI 年际变化

Fig. 2 Interannual variations of AAI in the Fenwei Plain from 2005 to 2019

示 (图 3), 2006 ~ 2008 年 AAI 高污染区域逐年缩小, 向西安、咸阳和临汾收缩; 2009 ~ 2013 年 AAI 波动增加, 年均值由 0.3 以上升至 0.5 以上, 临汾局部地区年均值突破 0.6; 2013 ~ 2015 年 AAI 高污染范围极速收缩至 0.3, 局部地区 0.4; 2016 ~ 2018 年 AAI 数值上有一定的增强, 覆盖范围上, 临汾附近相比于往年有一定程度的缩小, 西安附近的城市群高值范围增加.

通过栅格代数运算对 15 年间 AAI 月均值的标准偏差进行研究, 来分析研究区 AAI 变化的稳定性 (图 4). 结果显示汾渭平原 AAI 稳定性整体呈现由“两极向四周递减”的分布格局 (以西安为中心包含

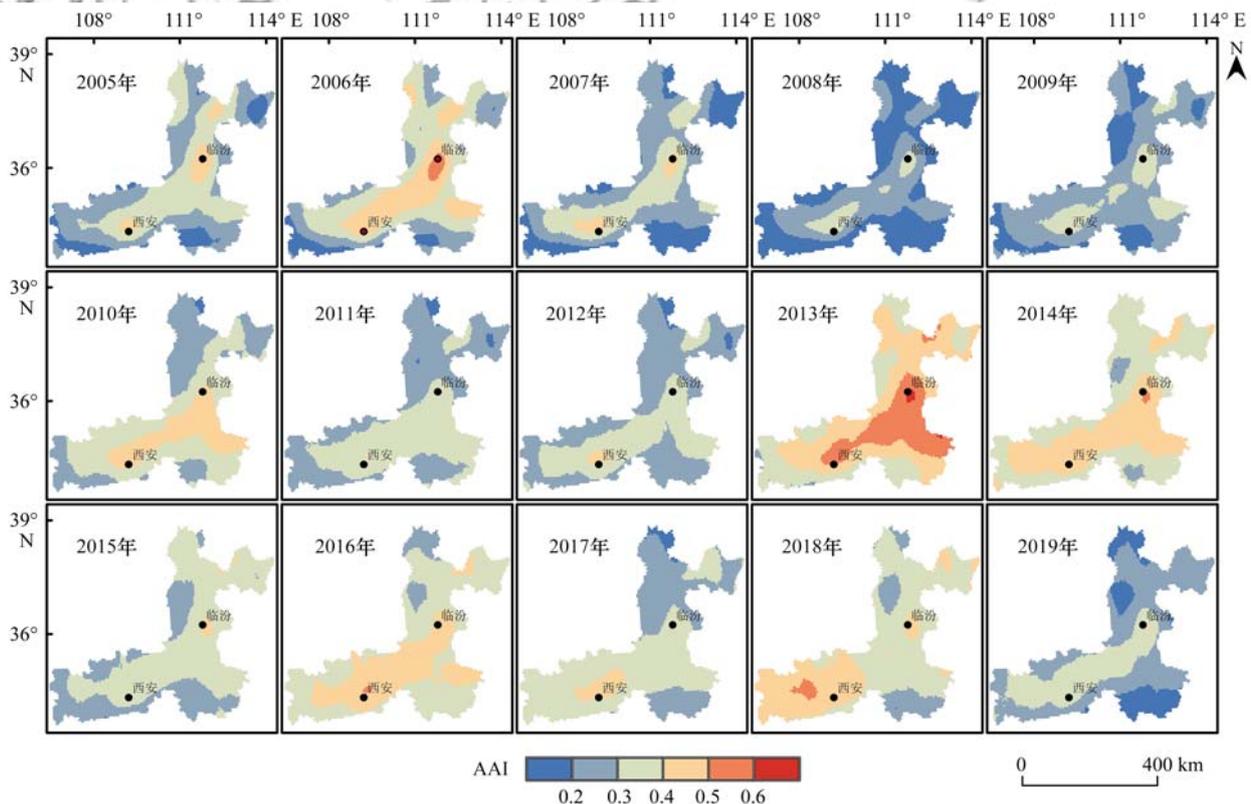


图 3 2005 ~ 2019 年汾渭平原 AAI 的空间演变

Fig. 3 Spatial evolution of AAI concentrations in the Fenwei Plain from 2005 to 2019

咸阳、渭南和铜川为西安极；临汾、运城和三门峡为临汾极）。稳定性差的区域分布在西安极，占总面积的 1.7%；较差区域覆盖在两极周围，占比 21.0%。稳定性差和较差区域受人为和自然因素扰动较大，该区域人为排放、作物覆被情况、降水、温度和沙尘远距离传输的季节性差异大以及在光照和  $\text{NO}_x$  充足的情况下，碳质颗粒物会在可见光的作用下转化为  $\text{O}_3$ ，这些是致使两极稳定性较差的原因。稳定性好和良好区域位于研究区四周，占比 33.1%，该地海拔梯度变化显著，人类活动少，森林覆盖率高且远离“两极”。

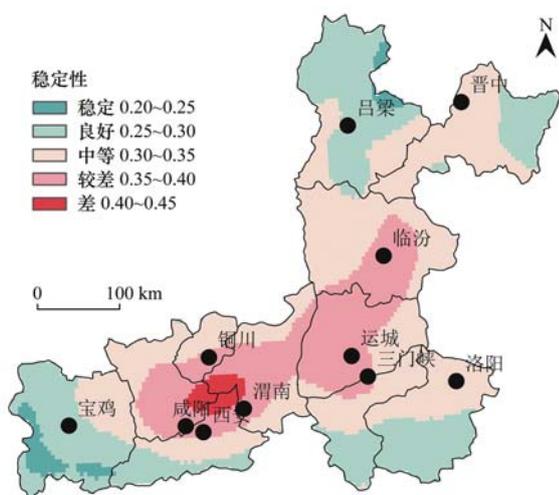


图4 2005~2019年汾渭平原AAI稳定性

Fig. 4 Stability of AAI in the Fenwei Plain from 2005 to 2019

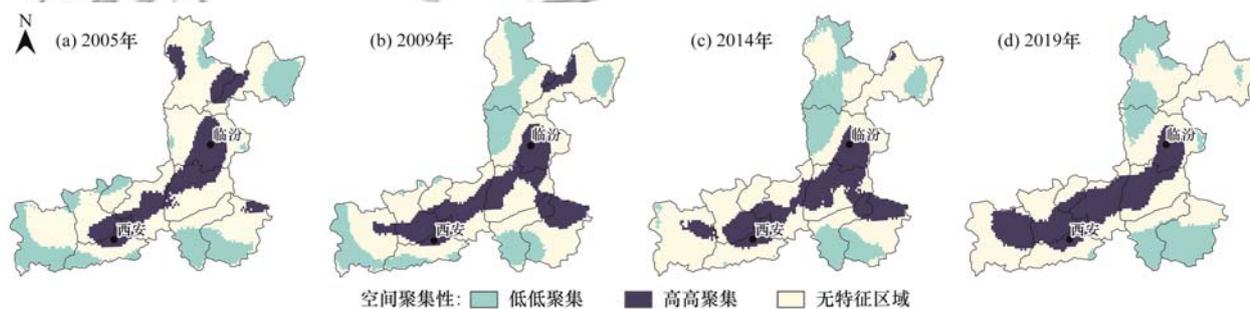


图5 2005~2019年汾渭平原AAI空间聚集特征

Fig. 5 Spatial agglomeration of AAI concentrations in the Fenwei Plain from 2005 to 2019

$\text{PM}_{2.5}$ 呈显著正相关( $P < 0.05$ ),二者空间相关系数显示,全境均大于0.5,其中西安极和临汾极相关性数为0.55~0.75,通过AAI来研究吸收性气溶胶的空间分布具有较高准确性。②2015~2019年CO空间分布中“两极”差异明显。临汾极附近大范围高值覆盖  $\text{CO} > 2.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,西安极附近为CO出现相对低值的区域,处于  $1.0 \sim 1.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间;AAI与CO呈显著正相关( $P < 0.05$ ),AAI与CO的空间相关系数大于0.94的区域为临汾及其北部区域、宝鸡和西安南部林地,西安极为0.78~0.82。

为分析汾渭平原AAI的聚集程度和显著性,对汾渭平原2005、2009、2014、2019年以及15a的AAI均值进行全局莫兰指数计算,结果显示:全局莫兰指数均为正值,均通过显著性检验( $P < 0.05$ ),且 $z$ 值均超过1.65(拒绝零假设设定的阈值),这表明汾渭平原AAI年均值空间聚集特征显著。

进一步使用局部莫兰指数,识别2005、2009、2014和2019年AAI年均值聚集类型的区域并分析其空间变化特性(图5)。结果表明,汾渭平原聚集特征显著,上述年份分析结果只存在3种类型:低低聚集、高高聚集以及无特征区域。AAI高高聚集类型:2005~2019年区域占比由20.5%升至24.2%,空间范围扩大,随着时间的推移AAI高高聚集类型分布更加集中,形成由西安极和临汾极两极相连的条带状分布区。2005~2019年AAI低低聚集类型主要分布在吕梁山、太行山和伏牛山,占比由22.6%锐减至21.2%,至2019年宝鸡和西安南屏的AAI低低聚集类型消失,转变为无特征区域。

将2015~2019年西安、临汾等30个监测站点的 $\text{PM}_{2.5}$ 、CO数据空间插值并分别与AAI做空间相关性分析来研究AAI准确性和主导类型(图6)。结果表明:①2015~2019年汾渭平原全境 $\text{PM}_{2.5}$ 均值大于  $45 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ( $\text{PM}_{2.5}$ 浓度二级标准限值为  $35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ),西安极和临汾极为高值区域  $\text{PM}_{2.5} > 55 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 其中部分区域突破  $60 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;AAI与

### 2.3 季节性变化分析

因自然(大气环流、扩散条件和大气冲刷能力)条件的季节性变化显著,故对汾渭平原AAI、气温、降水、涡度和两极气流轨迹及其潜在源的季节性变化进行研究,来分析导致AAI季节性高值的原因。季节时间段为:春(3~5月)、夏(6~8月)、秋(9~11月)和冬(12月至次年2月)。

2005~2019年汾渭平原AAI季均值显示(图7),AAI季均空间分布为:冬季>春季>秋季>夏季,其中冬季AAI空间分布全境较高,处于0.4~0.9之间,西安极、临汾极和洛阳为极高值区域并向

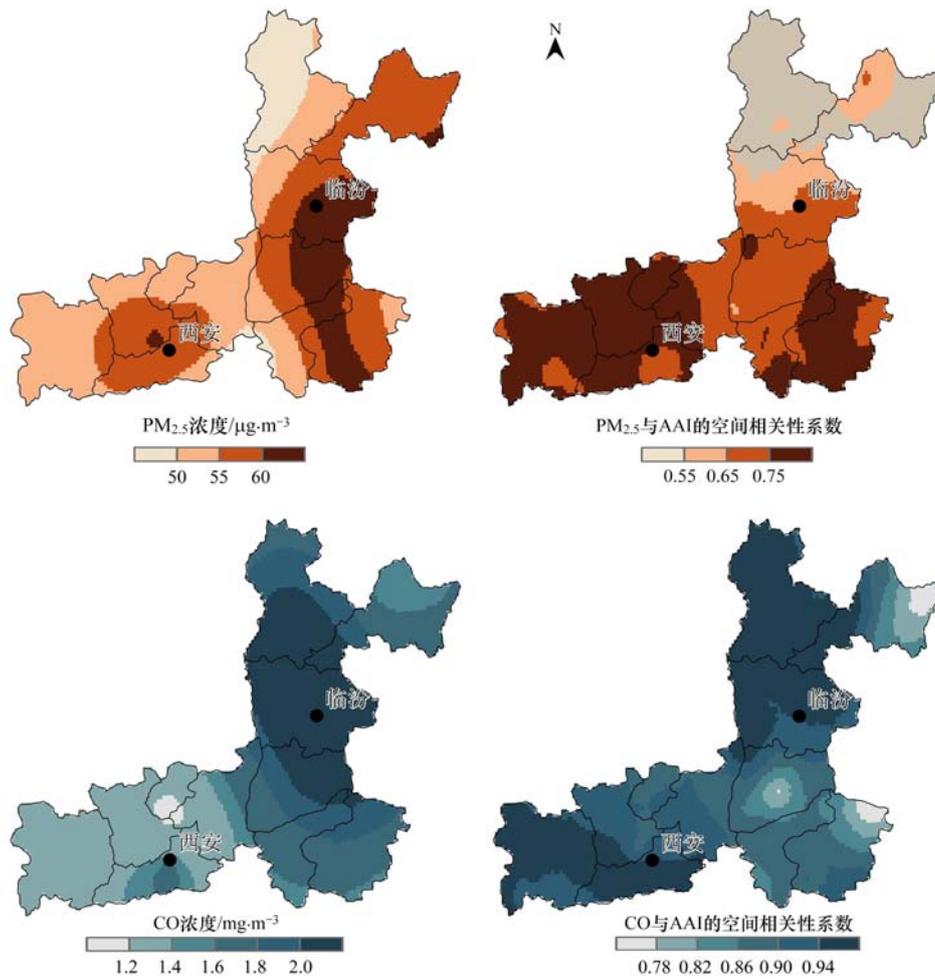


图6 汾渭平原 PM<sub>2.5</sub> 和 CO 质量浓度空间分布以及 PM<sub>2.5</sub> 和 CO 与 AAI 的相关性

Fig. 6 Spatial distribution of PM<sub>2.5</sub> and CO annual concentrations in the Fenwei Plain and its correlation coefficients between with AAI

四周蔓延; 春季 AAI 空间分布处于 0.1 ~ 0.5 之间, 西安极和临汾极 AAI > 0.4, 低值出现在海拔较大和海拔梯度变化较大的区域; 秋季次高值 AAI > 0.3 率先出现在西安临汾两极、洛阳和晋中并向周围延伸, 最终形成连接两极的条带状分布格局; 夏季全境 AAI 低值。

通过对 2011 ~ 2019 年汾渭平原 35 个国家气象监测站点的气温、降水数据进行空间插值并分别与 AAI 做空间相关性分析来分析汾渭平原气象条件的

季节性变化对 AAI 的影响(图 8)。结果表明: ①汾渭平原近 8 年气温月均值由北向南递增, 气温与 AAI 呈显著负相关( $P < 0.05$ ), 相关系数小于 -0.90, 西安极表现异常突出, 相关系数小于 -0.98, 西安极温度小于 0℃ 的月份为 1、2、3、11 和 12 月, 上述月份与西安极 AAI 高值月份契合, 西安极 AAI 受气温影响更加显著。②汾渭平原近 8 年降水月均值整体由北向南递增, 汾渭平原西北部形成月均降水量 30 ~ 40 mm 的干涸, 西安极附近月均降水量较为充足, 为 45 ~ 65

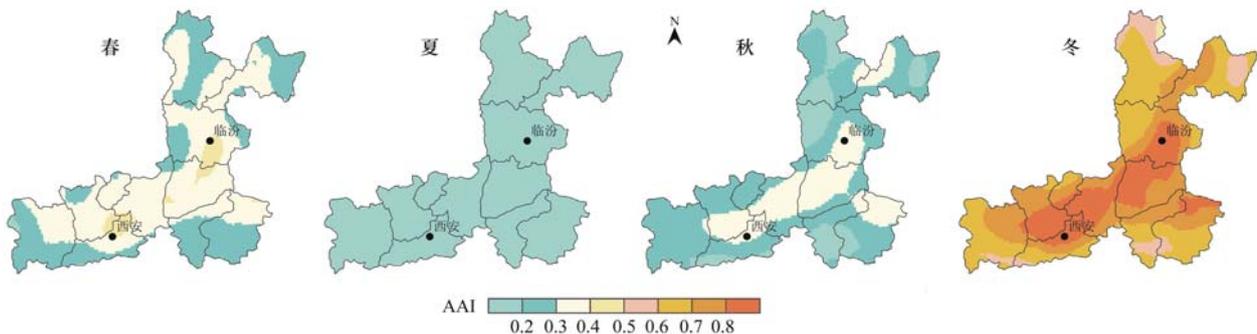


图7 2005 ~ 2019 年汾渭平原 AAI 季均值空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of seasonal mean values of AAI in the Fenwei Plain from 2005 to 2019

mm; 降水量与 AAI 呈显著负相关( $P < 0.05$ ), 西安极

空间相关系数小于  $-0.88$ , 临汾极小于  $-0.84$ .

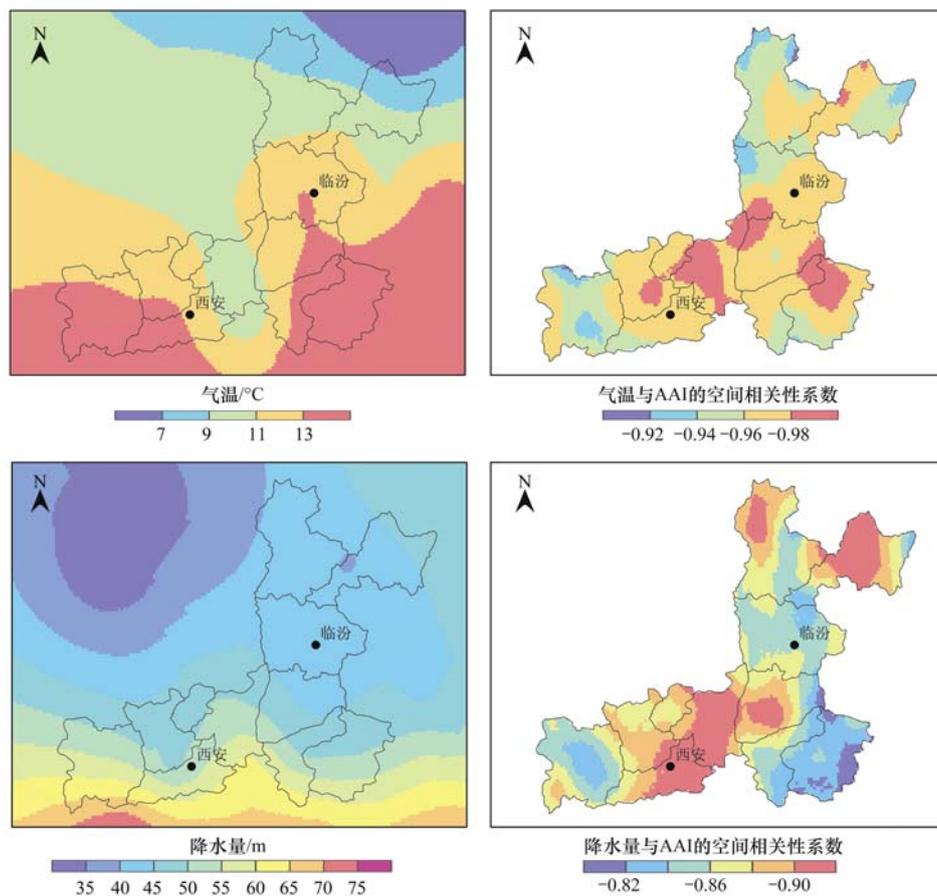


图8 汾渭平原气温和降水量月均值分布以及气温和降水量月均值与 AAI 的相关性

Fig. 8 Spatial distribution of monthly mean values of temperature and precipitation in the Fenwei Plain and its correlation coefficient between with AAI

为分析汾渭平原大气扩散条件对 AAI 的影响, 利用 2013 年 850 hPa 和 1 000 hPa 涡度场来分析大气垂直输送能力(850 hPa 处于海拔 1 200 ~ 1 900 m 之间, 某种意义上可以代表边界层 BLH 的顶端, 对地面有很强的相关性, 既不会脱离地面实际, 又不会被局部小地形影响; 1 000 hPa 为地转风涡度, 可表征地面气旋也能很好地反应映地面压强变化<sup>[27]</sup>). 由图 9 可知, 850 hPa 和 1 000 hPa 条件下汾渭平原春季、秋季和冬季均出现不同范围涡度  $< -5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  的反气旋式高压, 高层大气辐合, 低层大气辐散, 垂直气流下沉, 不仅影响当地污染物的扩散与消除, 还会将正涡度周围(湖北东部、湖南北部以及重庆等地区)辐散的大气污染物辐合, 并结合本地源加强近地面大气的污染程度. 冬季 850 hPa 条件下西安以北出现涡度  $< -10 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  情况, 850 hPa 与 1 000 hPa 条件下的涡度场的涡度中心几乎在同一垂直轴上, 高压覆盖严重阻碍大气污染物的扩散, 是导致汾渭平原冬季大面积高值的重要因素之一.

#### 2.4 气团输送路径分析

汾渭平原 AAI 空间分布最终形成连接两极的

条带状分布区, 为进一步探究汾渭平原 AAI 的传输路径和潜在源区, 运用 HYSPLIT 后向轨迹模型对 2010 ~ 2019 年临汾极和西安极这两高值极的后向轨迹进行模拟, 共得到近 8 000 条轨迹, 单个极点的季均轨迹数约为 1 000 条. 分别对不同季节的气团轨迹进行 TSV 聚类分析(图 10).

临汾极, 春季: 近地面气团轨迹 1 (25.35%) 来自于安徽淮北, 从 500 m 以上的势位高度快速下降至近地面, 可携带途经地(豫东平原和洛阳)碳质污染物抵达临汾; 气团轨迹 2 (25.22%) 和 3 (24.72%) 为远距离沙尘传输路径, 由外蒙古入境穿过内蒙古阿拉善; 气团轨迹 4 (24.72%) 源于甘肃中部, 穿过宁夏固原和陕西铜川. 夏季: 临汾极气团轨迹 1 (38.10%) 源于河南南部, 途经山西长治; 气团轨迹 2 (33.58%) 为临汾本地气团, 移速缓慢; 气团轨迹 3 (27.59) 源于陕西和山西北部交界, 途经吕梁; 气团轨迹 4 (0.73%) 源于江苏, 途经安徽和河南. 秋季: 临汾气团轨迹 1 (29.55%) 源于河南南阳盆地; 气团轨迹 2 (29.18%) 为远距离沙尘传输通道, 途经外蒙古、新疆、内蒙、宁夏和陕西; 气团

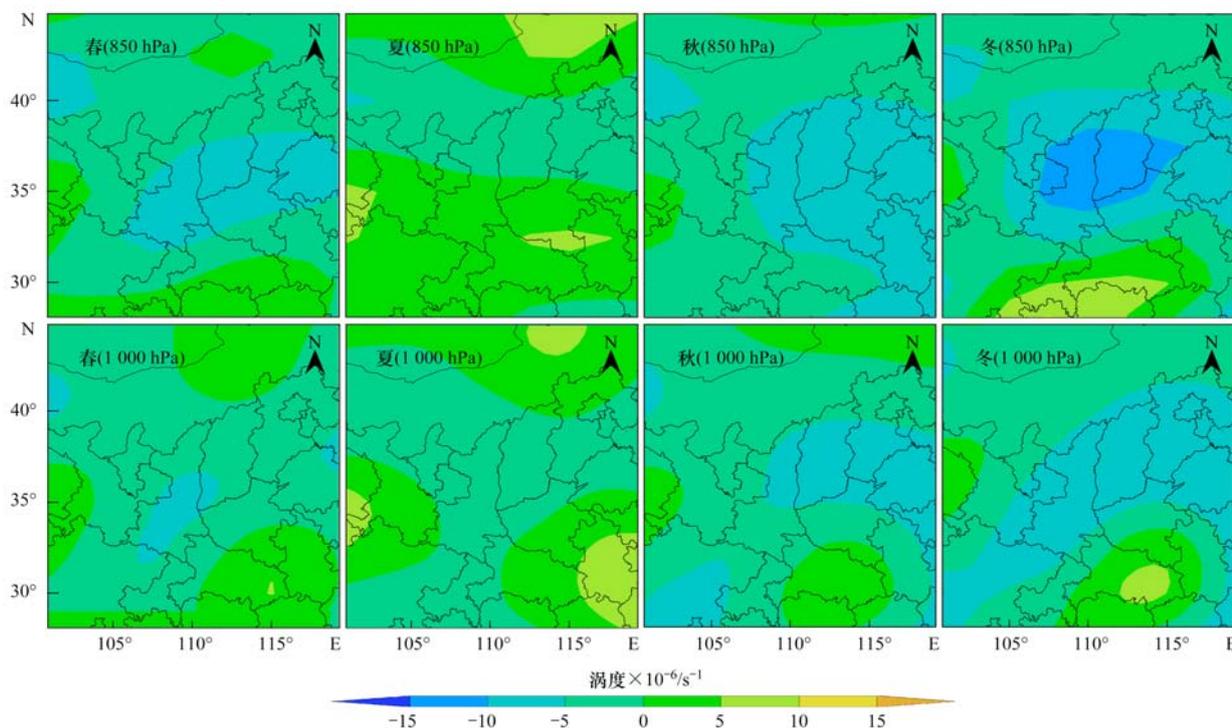


图9 2013年汾渭平原850 hPa和1000 hPa涡度场

Fig. 9 The 850 hPa and 1000 hPa vorticity maps over the Fenwei Plain from 2005 to 2019

轨迹3(22.34%)源于外蒙古,途经内蒙和陕西;气团轨迹4(18.93)为近地面传输路径,由山东北部出发途经河南北部.冬季:重污染天气频发,临汾极气团传输路径由北、西北和东南传输路径构成,北传输路径由气团轨迹2(22.54%)、5(12.69%)和6(11.98%)组成,源于外蒙古途经内蒙古和陕西抵达临汾;西北传输路径由气团轨迹1(24.79%)和3(14.12%)构成,源于新疆塔克拉玛干沙漠,横穿甘肃宁夏;东南方近地面污染传输路径4(13.88%)源于河南中部,为近地面污染传输通道.

西安极,春季:除西北气团轨迹外,其他气团轨迹与临汾极相似,其中西北气团轨迹3(17.02%)和4(10.35%)为远距离沙尘传输通道相比于临汾极更加聚集,由外蒙古入境,途经巴丹吉林沙漠、陕西北部 and 黄土高原;气团轨迹1(41.13%)为近地面传输通道(势位高度小于500 m)源于河南南阳盆地,向南运动途经湖北襄阳和十堰.夏季:气团轨迹1(44.81%)、2(31.99%)和3(21.90%)为本地气团,势位高度小于500 m,气流速度缓慢,将本地污染物滞留和聚集;气团轨迹4(1.30%)源于宁夏银川,途经固原、庆阳和铜川抵达西安.秋季:气团轨迹3(21.98%)和4(14.15%)为远距离传输通道,途经新疆、甘肃、内蒙和宁夏;气团轨迹1(36.68)为本地气团;气团轨迹2(27.20%)源于山东途经河南抵达西安.冬季:气团轨迹1(37.95%)源于河南西南部;气团轨迹2(29.09%)和4(13.43%)总

占比为42.52%,源于新疆途经甘肃和宁夏抵达西安;气团轨迹3(19.53%)源于外蒙古,途经内蒙古西部抵达西安.

综上,除夏季外,临汾极和西安极气团传输路径较为相似,其中远距离气团传输路径来自西北方向(占30%以上),近距离气团传输路径来自偏东方向(约占20%)和偏南方向(约占30%);冬季西安极的远距离气团传输路径比临汾极集中.

## 2.5 潜在源区识别

使用潜在源贡献法(PSCF)对临汾极和西安极的各季节吸收性气溶胶潜在源区进行研究,PSCF结果越大,该地大概率为受体位置AAI的源区(图11).根据临汾极和西安极PSCF值的空间分布并结合前人研究<sup>[47]</sup>,将其划为5个潜在源区:①西北风源包括新疆大部、甘肃西北部库木塔格沙漠和内蒙古阿拉善;②北风源包括蒙古高原南部和内蒙古中部的乌兰布和沙漠;③黄土高原源包括甘肃中部和东部、宁夏以及陕西和山西北部的部分黄土高原;④南风源包括四川北部、重庆和湖南北部区域;⑤东风源包括河南及其接壤的京津冀南部、山东和安徽.其中西北风源和北风源下垫面为戈壁或沙漠,植被覆盖极少,为沙尘源;南风源和东风源植被覆盖较高、降水量和人口密度大、为地区发展较快的高GDP区域,该区域为碳质源的主要贡献区;黄土高原源因土质疏松和植被覆盖少,为沙尘远距离传输的加强源,此外,本地能源结构不合理,焦化产业

和工业迅速发展等使得本地碳质源排放突出,因此黄土高原源为沙尘和碳质的共同作用源.

夏季西安极和临汾极 AAI 的潜在源区以本地源为主,整体 PSCF 值较低;春、秋和冬季,西安极

PSCF 比临汾极略高,二者潜在源区都以黄土高原源、南风源、东风源和西北风源为主,黄土高原、河南大部、宁夏、内蒙古中西部、新疆东部、湖北西部、京津冀南部以及山东西部为 PSCF 高值区.不同

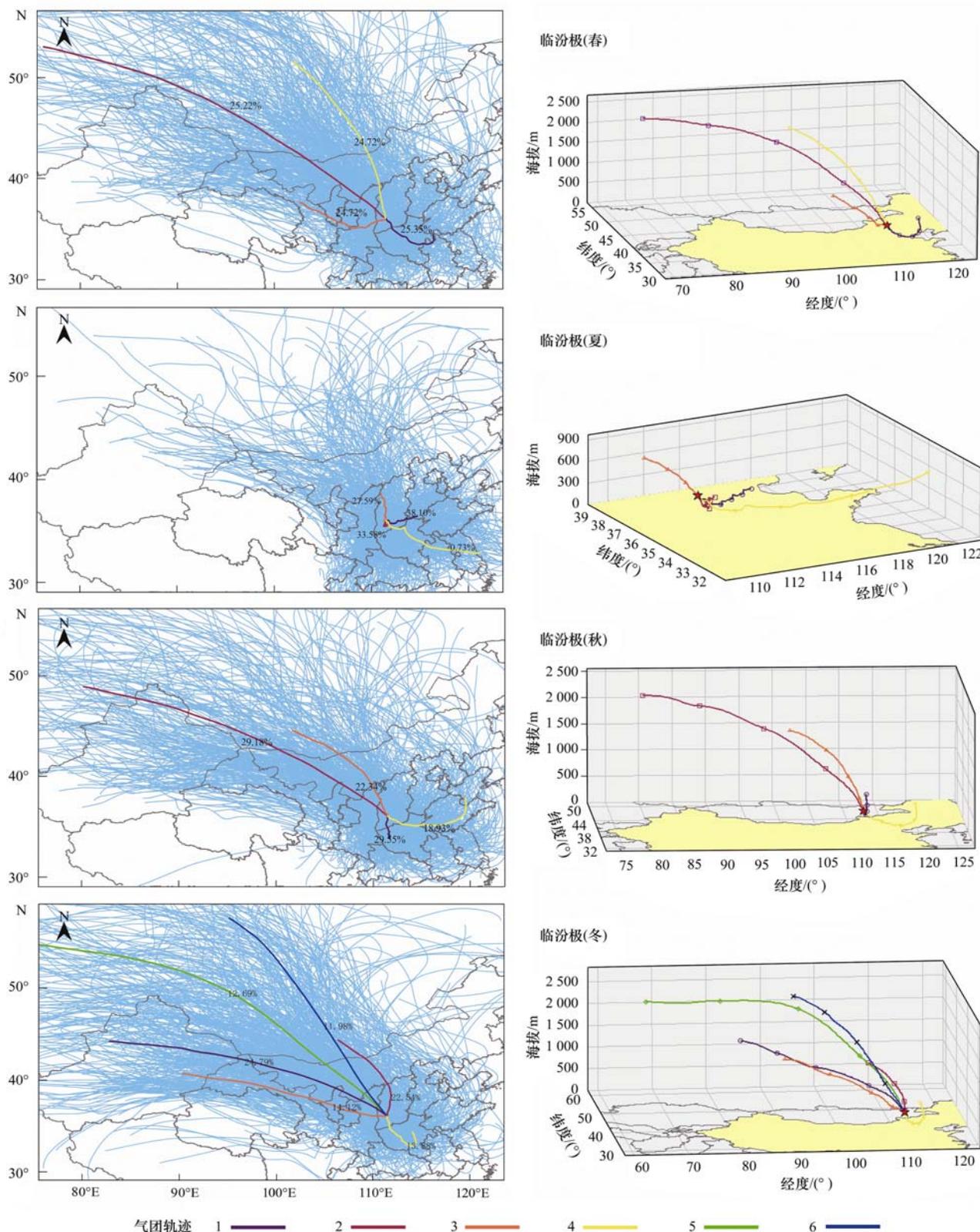
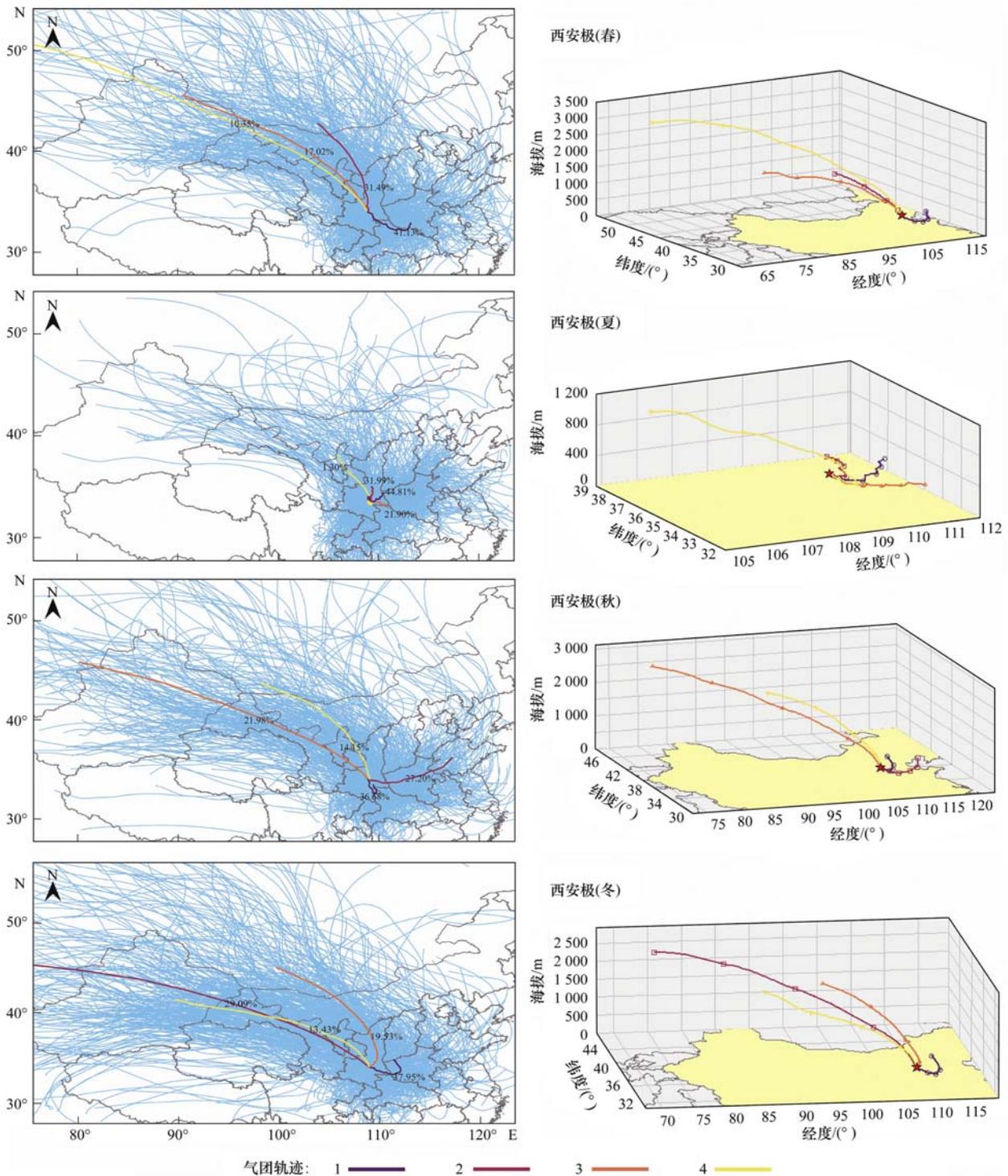


图 10 不同季节汾渭平原吸收气溶胶 72 h 后向轨迹 TSV 聚类分析及轨迹高度变化

Fig. 10 TSV cluster analysis and height changes of 72-hour backward trajectories of absorbing aerosols arriving in the Fenwei Plain during different seasons



续图 10

的是西安极春季和冬季受沙尘远距离输送源西北风源的影响显著,西北风源对临汾极的影响程度较轻.

### 3 讨论

2006 年成为吸收性气溶胶显著下降的拐点,是为 2008 年“奥运蓝”的出现,全国大部分地区采取综合的大气污染防治措施的成果. 2008 年后在经济快速发展的带动下 AAI 呈明显增长趋势,全国多地大气污染严重<sup>[48]</sup>, 2013 年汾渭平原 AAI 达到近 15

年来的最高值. 为改善大气污染程度,打造良好的人居环境, 2013 年 9 月国务院发布实施“大气十条”,气十条的发布效果显著,于 2014 年汾渭平原 AAI 便呈现逐年下降趋势  $Slope = -0.066$ ; 但 2015 年后 AAI 开始反弹,年均值突破 0.6. 在全国多地空气质量逐渐改善的背景下,该地大气污染程度逐年高走,因此于 2018 年汾渭平原被正式纳入国家大气污染防治重点区域. 通过优化产业和能源结构<sup>[49]</sup>、散煤燃烧治理,强化区域联防联控等措施, 2018 年后汾渭平

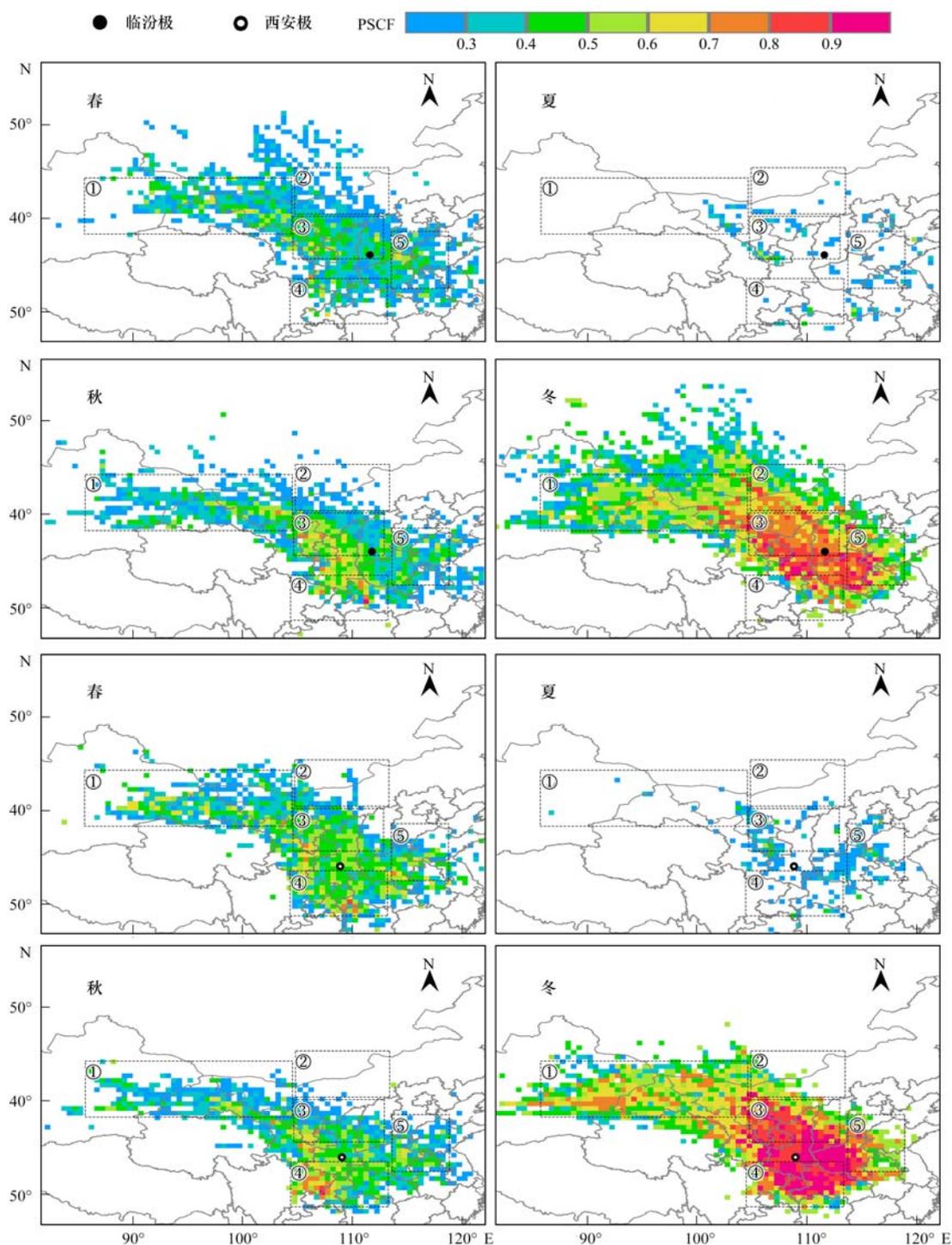


图 11 不同季节吸收气溶胶的潜在来源分析

Fig. 11 Analysis of the potential sources of absorbing aerosols during different seasons

原 AAI 出现一定的下降态势。

西安极和临汾极及其连接的带状高污染区域为 AAI 高高聚集区域,该区域稳定性较差,受多种因素影响:经济快速增长引起的中心城市虹吸效应,将中小城镇的高端生产要素聚集从而使得中心极排放源强逐年加强、冬季散煤采暖<sup>[50,51]</sup>、能源消费结构单一化、以煤炭为主和工业结构偏重并衍生出一系列的高耗能、高污染产业链<sup>[52]</sup>、焦炭的公路运输<sup>[53]</sup>、农作物区植物覆被情况的季节性变化<sup>[54]</sup>以及农业

活动所产生的颗粒物等是汾渭平原吸收性气溶胶居高不下的内因;汾渭平原地处陕北黄土高原与秦岭和太行山之间,形成相对封闭的盆地地形,不利于污染物的扩散<sup>[55]</sup>。汾渭平原一年中 5 个月的月均温小于 0℃,低温易造成逆温天气,阻碍大气污染物的垂直输送、汾渭平原沙尘负荷较大、部分区域位于黄土高原(土质疏松,植被覆盖少),生态环境脆弱<sup>[55]</sup>等外因的影响作用显著,内外因素的共同作用是导致汾渭平原吸收性气溶胶高值的根本原因。汾渭平

原降水主要集中在夏季, 温度致使大气边界层比其他季节高  $200 \text{ m}^{[56]}$ , 且夏季  $850 \text{ hPa}$  涡度大于零, 充沛的雨水、较大的大气污染物容量以及良好的大气(水平和垂直)输送能力使得汾渭平原夏季全境 AAI 低值; 由夏进秋次高值  $\text{AAI} > 0.3$  率先出现在两极、洛阳和晋中并向周围延伸, 进入冬季最终形成连接两极的条带状高污染分布格局. CO 空间分布中“两极”差异明显, 临汾极附近大范围高值覆盖  $\text{CO} > 2.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 而西安极附近则出现相对低值的区域, 结合潜在源贡献(PSCF)分析, 虽然临汾极和西安极受一定程度远距离沙尘传输源西北风源影响, 但不同的是与临汾极相比, 西安极西北风源传输路径更远、更加密集且潜在贡献数值更大. 因此西安极吸收性气溶胶为碳质和沙尘共同作用, 而临汾极虽受远距离沙尘影响, 但影响较小, 吸收性气溶胶为碳质主导.

#### 4 结论

(1) 2005~2019 年汾渭平原 AAI 年均值变化具有一定波动性, 但总体相对稳定, 呈缓慢上升趋势  $\text{Slope} = 0.002$ , 2006、2013 和 2017 年为高值转折点, 此 3 a 汾渭平原大气污染严重, AAI 年均值大于 0.63, 2008 年和 2015 年为低值转折点, 年均值为 0.46 和 0.53.

(2) 2005~2019 年汾渭平原 AAI 空间分布基本一致, 形成以临汾、西安和郑州为高值向四周扩散的趋势, 随着年际的变化, 郑州贡献逐渐弱化. 西安和临汾极周围稳定性较差, 空间聚集特征显著, 2005~2019 年高高聚集类型快速增长 15.3%, 空间分布更加集中, 形成由西安和临汾两极相连的条带状分布区, 占区域总面积的 24.2%, 低低聚集类型锐减 6.2%, 转变为无特征区域.

(3) AAI 季均值为冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季, 冬季临汾极和西安极 AAI 突破 0.8, 研究区 AAI 大于 0.6 的区域占比 91.5%; 春季西安极和临汾极  $\text{AAI} > 0.4$ ; 夏季全境 AAI 低值; 秋季次高值  $\text{AAI} > 0.3$  率先出现在两极、洛阳和晋中并向周围延伸, 形成连接两极的条带状分布格局. 汾渭平原气温均值变化梯度由北向南递增, 在西安极附近形成冷涡, 西安极受气温影响显著. 汾渭平原降水量由北向南递增在西北部形成月均降水量  $30 \sim 40 \text{ mm}$  的干涡, 降水量对西安极和临汾极 AAI 影响显著.  $850 \text{ hPa}$  和  $1000 \text{ hPa}$  条件下汾渭平原春季、秋季和冬季均出现不同范围涡度  $< -5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  的反气旋式高压, 影响当地污染物的扩散与消除.

(4) 除夏季外, 临汾极和西安极远距离气团传

输路径较为相似, 来自西北方向(占 30% 以上); 近距离气团传输路径来自偏东方向(占 20% 左右)、偏南方向(占 30% 左右). 通过气团传输路径聚类 and PSCF 分析的结果, 黄土高原源和东风源为临汾极吸收性气溶胶的主要源区. 西安极受沙尘源(西北风源)贡献影响较大, 西北风源、黄土高原源和南风源为西安极吸收性气溶胶的主要源区.

#### 参考文献:

- [1] 金碚. 中国经济 70 年发展新观察[J]. 社会科学战线, 2019, (6): 1-11.
- [2] 王敏, 黄滢. 中国的环境污染与经济增长[J]. 经济学(季刊), 2015, 14(2): 557-578.  
Wang M, Huang Y. China's environmental pollution and economic growth[J]. China Economic Quarterly, 2015, 14(2): 557-578.
- [3] 张西雅, 扈海波. 京津冀地区气溶胶时空分布及与城市化关系的研究[J]. 大气科学, 2017, 41(4): 797-810.  
Zhang X Y, Hu H B. Spatio-temporal characteristics of aerosol optical depth and their relationship with urbanization over Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2017, 41(4): 797-810.
- [4] Liu Q, Liu X, Liu T Q, et al. Seasonal variation in particle contribution and aerosol types in Shanghai based on satellite data from MODIS and CALIOP[J]. Particuology, 2020, 51: 18-25.
- [5] Torres O, Bhartia P K, Herman J R, et al. A long-term record of aerosol optical depth from TOMS observations and comparison to AERONET measurements[J]. Journal of Atmospheric Sciences, 2002, 59(3): 398-413.
- [6] Chen W, Tian H M, Zhao H M, et al. Multichannel characteristics of absorbing aerosols in Xuzhou and implication of black carbon[J]. Science of the Total Environment, 2020, 714, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136820.
- [7] 郭志明, 张向云, 刘頔, 等. 太原市  $\text{PM}_{2.5}$  中碳质组分季节变化与组成特征[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(2): 65-69.  
Guo Z M, Zhang X Y, Liu D, et al. Characterization and seasonal variation of carbonaceous aerosol in urban atmosphere of Taiyuan[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(2): 65-69.
- [8] 张鹏, 王春姣, 陈林, 等. 沙尘气溶胶卫星遥感现状与需要关注的若干问题[J]. 气象, 2018, 44(6): 725-736.  
Zhang P, Wang C J, Chen L, et al. Current status of satellite-based dust aerosol remote sensing and some issues to be concerned[J]. Meteorological Monthly, 2018, 44(6): 725-736.
- [9] 彭小乐, 郝庆菊, 温天雪, 等. 重庆市北碚城区气溶胶中有机碳和元素碳的污染特征[J]. 环境科学, 2018, 39(8): 3502-3510.  
Peng X L, Hao Q J, Wen T X, et al. Pollution characteristics of organic carbon and elemental carbon in atmospheric aerosols in Beibei district, Chongqing[J]. Environmental Science, 2018, 39(8): 3502-3510.
- [10] Ban-Weiss G A, Cao L, Bala G, et al. Dependence of climate forcing and response on the altitude of black carbon aerosols[J]. Climate Dynamics, 2012, 38(5-6): 897-911.
- [11] Deng X J, Tie X X, Wu D, et al. Long-term trend of visibility and its characterizations in the Pearl River Delta (PRD) region, China[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(7): 1424-1435.

- [12] 曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 等. 北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1067-1077.  
Zeng W, Hao Q J, Zhao Z J, *et al.* Characteristics of aerosol optical depth in the urban area of Beibei and its correlation with particle concentration [J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1067-1077.
- [13] Li Z Q, Wang Y, Guo J P, *et al.* East Asian study of tropospheric aerosols and their impact on regional clouds, precipitation, and climate (EAST-AIR<sub>CPC</sub>) [J]. Journal of Geophysical Research, 2019, **124**(23): 13026-13054.
- [14] Gong D Y, Wang W S, Qian Y, *et al.* Observed holiday aerosol reduction and temperature cooling over East Asia[J]. Journal of Geophysical Research, 2014, **119**(11): 6306-6324.
- [15] Petäjä T, Järvi L, Kerminen V M, *et al.* Enhanced air pollution via aerosol-boundary layer feedback in China [J]. Scientific Reports, 2016, **6**(1), doi: 10.1038/srep18998.
- [16] 王银牌, 喻鑫, 谢广奇. 中国近15年气溶胶光学厚度时空分布特征[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(2): 426-434.  
Wang Y P, Yu X, Xie G Q. Spatial distribution and temporal variation of aerosol optical depth over China in the past 15 years [J]. China Environmental Science, 2018, **38**(2): 426-434.
- [17] Ying L, Henze D K, Jack D, *et al.* Assessing public health burden associated with exposure to ambient black carbon in the United States[J]. Science of the Total Environment, 2016, **539**: 515-525.
- [18] Heald C L, Collett Jr J L, Lee T, *et al.* Atmospheric ammonia and particulate inorganic nitrogen over the United States[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, **12**(21): 10295-10312.
- [19] Yin P, Guo J P, Wang L J, *et al.* Higher risk of cardiovascular disease associated with smaller size-fractionated particulate matter [J]. Environmental Science & Technology Letters, 2020, **7**(2): 95-101.
- [20] 郑庆锋, 史军, 谈建国, 等. 2007~2016年上海颗粒物浓度特征与气候背景异同分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 14-22.  
Zheng Q F, Shi J, Tan J G, *et al.* Characteristics of aerosol particulate concentrations and their climate background in Shanghai during 2007-2016[J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 14-22.
- [21] 王璐, 袁亮, 张小玲, 等. 成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1561-1572.  
Wang L, Yuan L, Zhang X L, *et al.* Characteristics and source apportionment of black carbon in Chengdu [J]. Environmental Science, 2020, **41**(4): 1561-1572.
- [22] 赵楠, 曹梵诗, 田晴, 等. 长三角地区吸收性气溶胶时空分布特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(9): 3898-3907.  
Zhao N, Cao F S, Tian Q, *et al.* Spatial-Temporal distribution of absorptive aerosols in the Yangtze River delta[J]. Environmental Science, 2019, **40**(9): 3898-3907.
- [23] 胡京南, 柴发合, 段善春, 等. 京津冀及周边地区秋冬季PM<sub>2.5</sub>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<sub>2.5</sub> 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.
- [24] 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.
- [25] 杨燕萍, 陈强, 王莉娜, 等. 西北工业城市冬季PM<sub>2.5</sub>污染特征及理化性质[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5267-5275.  
Yang Y P, Chen Q, Wang L N, *et al.* Winter pollution characteristics and physicochemical properties of PM<sub>2.5</sub> in a northwest industrial city [J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5267-5275.
- [26] 黄雯倩, 陈彦彤, 李旭东, 等. 黑炭气溶胶质谱仪(SP-AMS)分析春季PM<sub>2.5</sub>中水溶性有机气溶胶[J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 609-619.  
Huang W Q, Chen Y T, Li X D, *et al.* Analysis of water soluble organic aerosol in spring PM<sub>2.5</sub> with Soot particle aerosol mass spectrometry (SP-AMS) [J]. Environmental Science, 2020, **41**(2): 609-619.
- [27] 熊秋芬, 张昕, 陶祖钰. 一次温带气旋涡度场演变特征及气旋发生发展机制分析[J]. 气象, 2016, **42**(3): 294-304.  
Xiong Q F, Zhang X, Tao Z Y. An analysis of vorticity evolution and physics mechanism on an extratropical cyclone [J]. Meteorological Monthly, 2016, **42**(3): 294-304.
- [28] Liu X, Kong S F, Yan Q, *et al.* Size-segregated carbonaceous aerosols emission from typical vehicles and potential depositions in the human respiratory system [J]. Environmental Pollution, 2020, **264**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114705.
- [29] 齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 等. 基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1604-1612.  
Qi B, Che H Z, Xu T T, *et al.* Column-integrated aerosol optical properties determined using ground-based sun photometry measurements in the Hangzhou region [J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1604-1612.
- [30] 艾沙江·艾力, 梁菲菲, 徐海量, 等. 和田绿洲沙尘暴物质输送路径及其对大气环境质量的影响[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(8): 2882-2891.  
Aishajiang A L, Liang F F, Xu H L, *et al.* Transport pathway of dust storm and its impact on air quality in Hetian oasis [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(8): 2882-2891.
- [31] Salmabadi H, Khalidy R, Saedi M. Transport routes and potential source regions of the Middle Eastern dust over Ahvaz during 2005-2017 [J]. Atmospheric Research, 2020, **241**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.104947.
- [32] 时燕, 刘瑞梅, 罗毅, 等. 近20年来中国PM<sub>2.5</sub>污染演变的时空过程[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 1-13.  
Shi Y, Liu R M, Luo Y, *et al.* Spatiotemporal variations of PM<sub>2.5</sub> pollution evolution in China in recent 20 years [J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 1-13.
- [33] 罗毅, 邓琼飞, 杨昆, 等. 近20年来中国典型区域PM<sub>2.5</sub>时空演变过程[J]. 环境科学, 2018, **39**(7): 3003-3013.  
Luo Y, Deng Q F, Yang K, *et al.* Spatial-temporal change evolution of PM<sub>2.5</sub> in typical regions of China in recent 20 years [J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3003-3013.
- [34] 李国辉, 冯添. 关中地区重污染期间PM<sub>2.5</sub>输送与来源的模拟研究[J]. 地球环境学报, 2016, **7**(4): 412-424.  
Li G H, Feng T. Simulating the transport and source of PM<sub>2.5</sub> during hazy days in the Guanzhong Basin, China [J]. Journal of Earth Environment, 2016, **7**(4): 412-424.
- [35] 孟宁, 贝耐芳, 李国辉, 等. 关中地区冬季人为源减排对PM<sub>2.5</sub>浓度的影响[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(5): 1646-1656.

- Meng N, Bei N F, Li G H, *et al.* Response of the wintertime  $PM_{2.5}$  level to anthropogenic emission mitigations in the Guanzhong basin[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(5): 1646-1656.
- [36] Chan K L. Biomass burning sources and their contributions to the local air quality in Hong Kong [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **596-597**: 212-221.
- [37] 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 等. 长江经济带  $PM_{2.5}$  分布格局演变及其影响因素[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1013-1024.  
Huang X G, Zhao J B, Cao J J, *et al.* Evolution of the distribution of  $PM_{2.5}$  concentration in the Yangtze River economic belt and its influencing factors [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1013-1024.
- [38] 史芳天, 罗彬, 张巍, 等. 成都平原  $PM_{2.5}$  中碳质组分时空分布特征与来源[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 520-528.  
Shi F T, Luo B, Zhang W, *et al.* Spatio-temporal variations and source apportionment of carbonaceous species in  $PM_{2.5}$  across multiple sampling locations in the Chengdu Plain [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 520-528.
- [39] 国务院. 大气污染防治行动计划[EB/OL]. [http://zfs.mee.gov.cn/fg/gwyw/201309/t20130912\\_260045.htm](http://zfs.mee.gov.cn/fg/gwyw/201309/t20130912_260045.htm), 2013-09-10.
- [40] 张亮林, 潘竟虎, 张大弘. 基于 MODIS 数据的中国气溶胶光学厚度时空分布特征[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(11): 4431-4439.  
Zhang L L, Pan J H, Zhang D H. Spatio-temporal distribution characteristics of aerosol optical depths in China based on MODIS data[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(11): 4431-4439.
- [41] 苗青青, 姜楠, 张瑞芹, 等. 中原城市群典型城市秋冬季大气  $PM_{2.5}$  污染特征及溯源[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 19-29.  
Miao Q Q, Jiang N, Zhang R Q, *et al.* Characteristics and source of  $PM_{2.5}$  pollution in typical cities of central plains urban agglomeration in autumn and winter[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 19-29.
- [42] Zhou B H, Wang Q Y, Zhou Q, *et al.* Seasonal characteristics of black carbon aerosol and its potential source regions in Baoji, China[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2018, **18**(2): 397-406.
- [43] Chen W, Tian H M, Qin K. Black carbon aerosol in the industrial city of Xuzhou, China: temporal characteristics and source appointment [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2019, **19**(4): 794-811.
- [44] 余光明, 徐建中, 康世昌, 等. 祁连山老虎沟地区大气颗粒物输送轨迹及潜在源区[J]. *干旱区研究*, 2020, **37**(3): 671-679.  
Yu G M, Xu J Z, Kang S C, *et al.* Trajectory analysis of atmospheric transport of particles in Laohugou area, western Qilian mountains[J]. *Arid Zone Research*, 2020, **37**(3): 671-679.
- [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**(203): 7073-7083.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 蔺雪芹, 王岱. 中国城市空气质量时空演化特征及社会经济驱动力[J]. *地理学报*, 2016, **71**(8): 1357-1371.  
Lin X Q, Wang D. Spatio-temporal variations and socio-economic driving forces of air quality in Chinese cities [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, **71**(8): 1357-1371.
- [49] 丁铨, 于兴娜, 侯思宇. 西安市大气降水污染和沉降特征及其来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 647-655.  
Ding C, Yu X N, Hou S Y. Pollution and deposition characteristics of precipitation and its source apportionment in Xi'an city[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 647-655.
- [50] 王圣, 徐静馨, 孙雪丽, 等. 汾渭平原采暖期与非采暖期大气环境质量时空变化特征研究[J]. *环境污染与防治*, 2019, **41**(12): 1451-1458.  
Wang S, Xu J X, Sun X L, *et al.* Spatial-temporal variation characteristics of air pollution in Fenwei Plain during heating and non-heating seasons [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, **41**(12): 1451-1458.
- [51] 张逸琴, 王杰, 高健, 等. 2016~2017 年采暖期华北平原东部  $PM_{2.5}$  组分特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(12): 5202-5212.  
Zhang Y Q, Wang J, Gao J, *et al.* Chemical composition characteristics and source apportionment of  $PM_{2.5}$  during the heating period of 2016-2017 in the eastern part of the North China Plain[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5202-5212.
- [52] 姜磊, 周海峰, 赖志柱, 等. 中国城市  $PM_{2.5}$  时空动态变化特征分析: 2015-2017 年[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(10): 3816-3825.  
Jiang L, Zhou H F, Lai Z Z, *et al.* Analysis of spatio-temporal characteristic of  $PM_{2.5}$  concentrations of Chinese cities: 2015-2017[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(10): 3816-3825.
- [53] 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.
- [54] 娄彩荣, 刘红玉, 李玉玲, 等. 大气颗粒物 ( $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ ) 对地表景观结构的响应研究进展[J]. *生态学报*, 2016, **36**(21): 6719-6729.  
Lou C R, Liu H Y, Li Y L, *et al.* Research on the response of air particles ( $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ ) to landscape structure: a review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(21): 6719-6729.
- [55] 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.
- [56] Guo J P, Li Y, Cohen J B, *et al.* Shift in the temporal trend of boundary layer height in China using long-term (1979-2016) radiosonde data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(11): 6080-6089.

## CONTENTS

Advances and Challenges in Biosafety Research for Urban Environments .....	SU Jian-qiang, AN Xin-li, HU An-yi, <i>et al.</i> (2565)
Key Problems and Novel Strategy of Controlling Emerging Trace Organic Contaminants During Municipal Wastewater Reclamation .....	WANG Wen-long, WU Qian-yuan, DU Ye, <i>et al.</i> (2573)
Mechanisms Summary and Potential Analysis of EPS as a Flame Retardant .....	HAO Xiao-di, ZHAO Zi-cheng, LI Ji, <i>et al.</i> (2583)
Concentrations, Sources, and Health Risks of PM <sub>2.5</sub> Carrier Metals in the Beijing Urban Area and Suburbs .....	ZHOU An-qi, LIU Jian-wei, ZHOU Xu, <i>et al.</i> (2595)
MAIAC AOD and PM <sub>2.5</sub> Mass Concentrations Characteristics and Correlation Analysis in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas .....	JIN Jian-nan, YANG Xing-chuan, YAN Xing, <i>et al.</i> (2604)
Formation and Prevention of Secondary Nitrate in PM <sub>2.5</sub> in Tianjin .....	XIAO Zhi-mei, WU Ting, WEI Yu-ting, <i>et al.</i> (2616)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitro Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM <sub>2.5</sub> of Nanjing, China .....	FU Yin-yin, WEN Hao-zhe, WANG Xiang-hua, <i>et al.</i> (2626)
Spatio-temporal Patterns and Potential Sources of Absorbing Aerosols in the Fenwei Plain .....	LIU Min-xia, LI Liang, YU Rui-xin, <i>et al.</i> (2634)
Sources Apportionment of Oxygenated Volatile Organic Compounds (OVOCs) in a Typical Southwestern Region in China During Summer .....	CHEN Mu-lan, WANG Sai-nan, CHEN Tian-shu, <i>et al.</i> (2648)
Aqueous-phase Oxidation of Dissolved Organic Matter (DOM) from Extracts of Ambient Aerosols .....	TAO Ye, CHEN Yan-tong, LI Nan-wang, <i>et al.</i> (2659)
Changes and Potential Sources of Atmospheric Black Carbon Concentration in Shanghai over the Past 40 Years Based on MERRA-2 Reanalysis Data .....	CAO Shan-shan, DUAN Yu-sen, GAO Chan-chan, <i>et al.</i> (2668)
Spatio-Temporal Evolution Characteristics and Source Apportionment of O <sub>3</sub> and NO <sub>2</sub> in Shijiazhuang .....	WANG Shuai, NIE Sai-sai, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (2679)
Applying Photochemical Indicators to Analyze Ozone Sensitivity in Handan .....	NIU Yuan, CHENG Shui-yuan, OU Sheng-ju, <i>et al.</i> (2691)
Spatiotemporal Distribution of Aerosol Optical Depth Based on Landsat Data in the Hinterland of the Guanzhong Basin and Its Relationship with Urbanization .....	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, ZHANG Xiu, <i>et al.</i> (2699)
Multidimensional Verification of Anthropogenic VOCs Emissions Inventory Through Satellite Retrievals and Ground Observations .....	WANG Yue, WEI Wei, REN Yun-ting, <i>et al.</i> (2713)
Estimation of the SOA Formation Potential of the National Trunk Highway in Central Plains Urban Agglomeration .....	WANG Na-ping, LI Hai-ping, ZHANG Fan (2721)
Economic Benefit of Air Quality Improvement During Implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in Beijing .....	LU Ya-ling, FAN Zhao-yang, JIANG Hong-qiang, <i>et al.</i> (2730)
Emission Performance Quantitative Evaluation and Application of Industrial Air Pollution Sources .....	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (2740)
Screening and Sequencing High-risk Antibiotics in China's Water Environment Based on Ecological Risks .....	ZHOU Li, LIU Shan, GUO Jia-hua, <i>et al.</i> (2748)
China's Reuse Water Development and Utilization Potential Based on the RDA-REM Model .....	ZHENG Jin-tao, MA Tao, LIU Jiu-fu, <i>et al.</i> (2758)
Characteristic Analysis of SWAT Model Parameter Values Based on Assessment of Model Research Quality .....	RONG Yi, QIN Cheng-xin, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (2769)
Sensitivity Analysis of Boundary Load Reduction in a Large Shallow Lake Water Quality Model .....	WANY Ya-ning, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (2778)
Comparison of Available Nitrogen and Phosphorus Characteristics in the Land-Water Transition Zone of Different Watersheds and Their Environmental Significance .....	ZHU Hai, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2787)
Analysis of Spatial-Temporal Variation Characteristics of Potential Non-point Source Pollution Risks in the Upper Beiyun River Basin Using Different Weighting Methods .....	LI Hua-lin, ZHANG Jian-jun, ZHANG Yao-fang, <i>et al.</i> (2796)
Characteristics of Runoff-related Total Nitrogen and Phosphorus Losses Under Long-term Fertilization and Cultivation on Purple Soil Sloping Croplands .....	WU Xiao-yu, LI Tian-yang, HE Bing-hui (2810)
Hydrochemistry and Its Controlling Factors and Water Quality Assessment of Shallow Groundwater in the Weihe and Jinghe River Catchments .....	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (2817)
Characteristics and Drivers of Dissolved Carbon Dioxide and Methane Concentrations in the Nantiaoxi River System in the Upper Reaches of the Taihu Lake Basin During Summer-Autumn .....	LIANG Jia-hui, TIAN Lin-lin, ZHOU Zhong-yu, <i>et al.</i> (2826)
Nitrogen Distribution and Inorganic Nitrogen Diffusion Flux in a Shallow Lake During the Low Temperature Period: A Case Study of the Baiyangdian Lake .....	WEN Yan, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang (2839)
Effects of Sediment Microenvironment on Sedimentary Phosphorus Release Under Capping .....	CHEN Shu-tong, LI Da-peng, XU Chu-tian, <i>et al.</i> (2848)
Coadsorption of Heavy Metal and Antibiotic onto Humic Acid from Polder River Sediment .....	XUE Xiang-dong, YANG Chen-hao, YU Jian-lin, <i>et al.</i> (2856)
Effects of Two PPCPs on Nitrification in Sediments in the Yarlung Zangbo River .....	LING Xin, XU Hui-ping, LU Guang-hua (2868)
Wastewater Treatment Effects of Ferric-carbon Micro-electrolysis and Zeolite in Constructed Wetlands .....	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, ZHANG Yao-yu, <i>et al.</i> (2875)
CDS-BOC Nanophotocatalyst Activating Persulfate Under Visible Light for the Efficient Degradation of Typical PPCPs .....	LEI Qian, XU Lu, AI Wei, <i>et al.</i> (2885)
Preparation of pg-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /BiOBr/Ag Composite and Photocatalytic Degradation of Sulfamethoxazole .....	YANG Li-wei, LIU Li-jun, XIA Xun-feng, <i>et al.</i> (2896)
Sodium Alginate Loading of Zero-Valent Iron Sulfide for the Reduction of Cr(VI) in Water .....	WANG Xu, YANG Xin-nan, HUANG Bi-jian, <i>et al.</i> (2908)
Adsorption Mechanism of Cadmium by Superparamagnetic Nano-Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @SiO <sub>2</sub> Functionalized Materials .....	ZHANG Li-zhi, YI Ping, FANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2917)
Pollution Characteristics and Removal of Typical Pharmaceuticals in Hospital Wastewater and Municipal Wastewater Treatment Plants .....	YE Pu, YOU Wen-dan, YANG Bin, <i>et al.</i> (2928)
Abundance Change of Antibiotic Resistance Genes During PDWW Recycling and Correlations with Environmental Factors .....	XU Yao-yao, WANG Rui, JIN Xin, <i>et al.</i> (2937)
Simultaneous Domestication of Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules .....	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (2946)
Long-term Storage and Rapid Activity Recovery of ANAMMOX Granular Sludge .....	LI Dong, LIU Ming-yang, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (2957)
Migration and Environmental Effects of Heavy Metals in the Pyrolysis of Municipal Sludge .....	JIANG Yuan-yuan, WANG Yan, DUAN Wen-yang, <i>et al.</i> (2966)
Profiling of Antibiotic Resistance Genes in Different Croplands .....	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (2975)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Cattle Farms in Ningxia .....	ZHANG Jun-hua, CHEN Rui-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (2981)
Effects of Temperature and Stirring on the Changes of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Anaerobic Digestion of Dairy Manure .....	XU Ji-fei, ZHANG Qiu-ping, ZHU Tian-jiao, <i>et al.</i> (2992)
Effects of Wheat Straw-derived Biochar Application on Soil Carbon Content Under Different Tillage Practices .....	LIU Zhen-jie, LI Peng-fei, HUANG Shi-wei, <i>et al.</i> (3000)
Spatial Patterns of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Their Influencing Factors in a Typical Agro-pastoral Ecotone .....	ZHANG Yan-jiang, WANG Jun-peng, WANG Yu, <i>et al.</i> (3010)
Spatial Distribution Characteristics, Pollution, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals Around Mercury Mining Areas .....	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (3018)
Interaction and Mechanism Between Conditioning Agents and Two Elements in the Soil Enriched with Phosphorus and Cadmium .....	HUANG Yang, HU Xue-yu, CAO Kun-kun, <i>et al.</i> (3028)
Mechanism of S-allyl-L-cysteine Alleviating Cadmium Stress in Seedling Roots and Buds of Rice Seedlings .....	CHENG Liu-long, HUANG Yong-chun, WANG Chang-rong, <i>et al.</i> (3037)
Consecutive 4-year Elevated Atmospheric CO <sub>2</sub> on Shaped Microbial Communities in the Rhizosphere Soil of <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Seedlings Grown in Pb-contaminated Soils .....	JIA Xia, Lkhagvajargal Khadkhurel, ZHAO Yong-hua, <i>et al.</i> (3046)
Biodegradation of Polystyrene by <i>Geobacillus stearothermophilus</i> .....	XING Rui-zhi, ZHAO Zi-qiang, ZHAO Wen-qi, <i>et al.</i> (3056)
Micro-morphological Characteristics of Particles on Holly and Ligustrum Leaf Surfaces and Seasonal Changes in Bacterial Communities .....	LI Hui-juan, XU Ai-ling, QIAO Feng-lu, <i>et al.</i> (3063)
Effects of Roxithromycin on Reproduction, Growth, and Anti-oxidation System of <i>Daphnia magna</i> .....	ZHANG Ling-yu, LIU Jian-chao, LENG Yang, <i>et al.</i> (3074)
Relationship Between Relative Crop Yield/Woody Plant Biomass and Ground-level Ozone Pollution in China .....	FENG Zhao-zhong, PENG Jin-long (3084)