

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.11

第40卷 第11期

目次

2018年中国长江三角洲地区气溶胶的垂直分布特征	沈吉, 曹念文(4743)
2018年石家庄市秋冬季典型霾污染特征	宿文康, 鲍晓磊, 倪爽英, 赵卫凤(4755)
武汉市PM _{2.5} 化学组分时空分布及聚类分析	张会涛, 田瑛泽, 刘保双, 杨佳美, 郁佳, 官攀, 吴建会, 张裕芬(4764)
郑州市某生活区大气PM _{2.5} 中重金属污染特征及生态、健康风险评估	何瑞东, 张轶舜, 陈永阳, 靳孟洁, 韩士杰, 赵金帅, 张瑞芹, 燕启社(4774)
厦门市降水中金属元素含量分布特征及来源解析	王珊珊, 程奕枫, 颜金培, 胡恭任(4783)
2015~2017年上海郊区大气新粒子生成特征	霍俊涛, 王新宁, 段玉森, 伏晴艳, 陈冰怡(4791)
太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析	闫世明, 王雁, 郭伟, 李莹, 张逢生(4801)
东北区域空气质量时空分布特征及重度污染成因分析	陈卫卫, 刘阳, 吴雪伟, 鲍秋阳, 高枳亭, 张学磊, 赵红梅, 张世春, 修艾军, 程天海(4810)
艾比湖流域气溶胶光学厚度时空演变及影响因素	陈香月, 丁建丽, 王敬哲, 葛翔宇, 梁静(4824)
中国住宅室内BTEX浓度水平及其影响因素	侯贝贝, 尹奕卉, 裴晶晶, 刘俊杰(4833)
石家庄地区芳香族化合物的污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 刘永桥, 杨玉磊, 赵清, 陈曦, 徐静(4841)
郑州市碳素行业无组织VOCs排放特征分析及健康风险评估	张轶舜, 王佳, 韩士杰, 何瑞东, 陈永阳, 靳孟洁, 赵庆炎, 张瑞芹, 燕启社(4847)
典型化工行业有害VOCs排放清单及长三角地区应用	鲁君, 黄奕玮, 黄成(4856)
2013~2017年江苏省人为源氨排放清单的建立及特征	侯新红, 于兴娜, 沈丽, 赵睿东, 王国祯, 张毓秀(4862)
焦化厂建构筑物和生产设施表面PAHs的赋存特征及健康风险	赵一澍, 廖晓勇, 李尤, 罗俊鹏, 龚雪刚, 侯艺璇(4870)
中国南海流沙湾中雄激素、糖皮质激素和孕激素的污染特征及其生态风险评价	杨雷, 张晋娜, 徐敏, 彭涛, 史文俊, 石义静, 应光国(4879)
岩溶流域洪水过程水化学动态变化及影响因素	原雅琼, 孙平安, 苏钊, 于爽, 钟丽华, 何师意, 徐茜(4889)
长江水体常量和微量元素的来源、分布与向海输送	吴文涛, 冉祥滨, 李景喜, 王昊, 李梦露, 刘军, 臧家业(4900)
望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价	徐晨, 王沛芳, 陈娟, 袁秋生, 胡斌(4914)
不同雨强对太湖河网河道入湖营养盐负荷影响	陈洁, 朱广伟, 许海, 詹旭, 朱梦圆, 宣文怡, 黄亚文(4924)
合肥市十八联圩湿地表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价	陈娜, 许凡, 谢三桃, 郭天星, 彭久赞, 雷琦, 张玮, 王丽卿(4932)
三峡库区不同河段支流丰水期叶绿素a和营养盐的空间分布特征	杨凡, 杨正健, 纪道斌, 苏青青, 龙良红, 刘心愿, 王耀耀, 赵冲(4944)
丹江口水库氮磷内源释放对比	王志齐, 刘新星, 姚志宏, 姚伦广, 常跃, 刘卓初, 曹连海(4953)
不同沉水植物净水能力与植株体细菌群落组成相关性	李琳, 岳春雷, 张华, 李贺鹏, 杨乐, 王琄(4962)
纳米氧化锌粒径对人工湿地性能及微生物群落的影响	王森, 任伶, 刘琳琳, 李颖, 张振, 孔范龙(4971)
水生植物生物炭去除水体中氮磷性能	刘舒蕾, 彭慧君, 杨佳怡, 肖琳(4980)
MgO改性莲蓬壳生物炭的制备及其磷吸附特性	王盛华, 朱丹晨, 邵敬爱, 向家涛, 杨海平, 易娟, 张世红, 陈汉平(4987)
微塑料对短流程膜工艺中膜污染的影响	王博东, 薛文静, 吕永涛, 苗瑞, 马百文(4996)
基于铁锰泥的除硝颗粒吸附剂制备及其比较	曾辉平, 于亚萍, 吕赛赛, 李冬, 张杰(5002)
氯氧铁非均相催化过氧化氢降解罗丹明B	张少朋, 陈瑞, 白淑琴, 刘锐平(5009)
天津市规模化奶牛养殖场废水中典型抗生素处理效果及生态风险评估	陈乾, 赵润, 牟美睿, 白鸽, 史宏伟, 刘海学, 吴惠惠(5015)
废水处理系统中抗生素抗性基因分布特征	姚鹏城, 陈嘉瑜, 张永明, 温东辉, 陈吕军(5024)
全程自养脱氮耦合反硝化除磷的启动及稳定运行	印雯, 陈亚, 张钰, 徐乐中, 吴鹏, 刘文如(5032)
FeCl ₃ -生化耦合技术调控未知诱因的污泥膨胀	魏东洋, 肖才林, 周雯, 李睿华, 曹茜(5040)
污泥龄对除磷亚硝化颗粒系统的影响	李冬, 刘博, 王文琪, 曹美忠, 李帅, 张杰(5048)
厌氧氨氧化耦合反硝化工艺的启动及微生物群落变化特征	宋壮壮, 吕爽, 刘哲, 时兴东, 潘傲, 张智(5057)
基质暴露水平对ANAMMOX微生物活性及生物量的影响	陈方敏, 高佳琦, 黄勇, 胡羽婷, 李祥, 顾澄伟, 谈新伟, 殷记强, 方文烨, 倪敏(5066)
太浦河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析	李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 朱永青, 彭月, 王凯, 李士俊(5073)
土壤重金属污染风险筛选值划分方法:以Cd为例	王锐, 张风雷, 徐姝姝, 张永文(5082)
半壁山金矿矿业活动区砷赋存的矿物特征及其对农田土壤砷累积的影响	温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 李鸣凤(5090)
土壤调理剂对镉污染稻田修复效果	周利军, 武琳, 林小兵, 王惠明, 刘晖, 张鸿燕, 胡敏, 石利萍, 张云, 黄欠如(5098)
改性蒙脱土对稻田土壤甲基汞的阻控修复	韩怡新, 何天容, 王祖波(5107)
铈锰改性生物炭对土壤As的固定效应	梁婷, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧(5114)
温和预氧化提高后续生物修复石油污染土壤	徐金兰, 王慧芳, 王荣, 章秋菊, 王杰(5124)
重金属污染农田生菜根际重金属固定细菌群落组成及其阻控效应	王铁军, 苏楠楠, 雷鹏, 邱明洋, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉(5133)
双氰胺和3,4-二甲吡唑磷酸盐对蔬菜种植土壤氨氧化细菌和古菌的影响	郭俊丽, 刘毅, 魏文学, 葛体达, 王光军(5142)
不同再生水灌溉方式对土壤-辣椒系统中细菌群落多样性及病原菌丰度的影响	崔丙健, 高峰, 胡超, 李中阳, 樊向阳, 崔二革(5151)
黄土高原地区两种土地利用方式CO ₂ 和N ₂ O排放特征	韩佳乐, 郝珊, 刘振杰, 张曼, 张阿凤(5164)
生物炭对华北平原4种典型土壤N ₂ O排放的影响	张秀玲, 孙贇, 张水清, 岳克, 曹红亮, 林杉(5173)
优化施肥模式对我国热带地区水稻-豇豆轮作系统N ₂ O和CH ₄ 排放的影响	胡玉麟, 汤水荣, 陶凯, 何秋香, 田伟, 秦兴华, 伍延正, 孟磊(5182)
《环境科学》征订启事(4995)	
《环境科学》征稿简则(5039)	
信息(4782, 4979, 5056)	

太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析

闫世明, 王雁*, 郭伟, 李莹, 张逢生

(山西省气象科学研究所, 太原 030002)

摘要: 采用环境空气质量指数(AQI)统计分析了2014~2018年太原市全年及秋冬季污染特征, 并采用HYSPLIT后向轨迹模型计算了2014~2017年秋冬季逐时后向轨迹, 结合太原市AQI, 通过聚类分析、潜在源贡献因子和浓度权重轨迹方法对影响太原市的污染物输送路径和潜在源区进行了分析。结果表明, 太原市污染状况不容乐观, 太原市2014~2018年全年优良天数波动较大, 尤其近两年从64%下降到不足50%; 然而秋冬季优良天数稳步上升, 2018年超过50%, 空气质量有好转趋势。污染类型可能发生变化, 全年及秋冬季PM_{2.5}为首要污染物的污染天数下降显著, PM₁₀为首要污染物的天数上升明显。聚类分析2014~2017年秋冬季太原的后向轨迹, 53%的气团来自偏西方向, 21%来自西北方向, 12%来自西南方向, 14%来自偏东方向, 其中西南方向轨迹是外来污染物输送进入太原的主要轨迹, 对太原空气质量有显著影响。PSCF和CWT分析表明, 影响太原空气质量的重要潜在源区主要位于汾渭平原的陕西汉中、西安和山西的吕梁、临汾等地。建立汾渭平原及其周边区域联防联控机制对控制区域污染有着重要意义。

关键词: 太原; 空气质量指数(AQI); 污染特征; 聚类轨迹; 潜在源区

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)11-4801-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201904140

Characteristics, Transportation, Pathways, and Potential Sources of Air Pollution During Autumn and Winter in Taiyuan

YAN Shi-ming, WANG Yan*, GUO Wei, LI Ying, ZHANG Feng-sheng

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

Abstract: Because of the atmospheric regional transmission, the air quality in Taiyuan is susceptible to air pollution from the surrounding areas. The annual and seasons air pollution characteristics of Taiyuan from 2014 to 2018 were analyzed using the environmental air quality index (AQI), the hourly backward trajectories in autumn and winter of 2014-2017 were calculated using the HYSPLIT model. The results showed that the air pollution situation in Taiyuan is not optimistic. There was a large fluctuation in the number of good days from 2014 to 2018, especially in the compliance rate of air quality, which varied from 64% to less than 50% over the past two years. However, the proportion of good days gradually increased in autumn and winter, exceeding 50% in 2018, and the trend in air quality improvement was obvious. The results also showed that air pollution may be more serious in spring and summer. Pollution types changed; whether annual or autumn and winter the days, PM_{2.5} as the main pollutant decreased significantly and the days with PM₁₀ increased significantly in autumn and winter. Based on the backward trajectory model and its combination with the AQI, using Taiyuan as the starting point, the backward 72 hour trajectory from 00:00 on September 1, 2014 to 23:00 on December 31, 2017 was calculated. The trajectory clustering analysis method, the potential source contribution factor weights (PSCF), and the concentration of the trajectory analysis (CWT) were used to discuss the source of contaminants in Taiyuan. The results showed that the simulated track after a clustering analysis could be divided into 8 categories, 53% of the trajectories come from the western region, 21% from the northwest, 12% from the southwest, and 14% from the east in autumn and winter of 2014-2017. The southwest trajectory was the main trajectory for the transportation of foreign pollutants into Taiyuan, and it has a significant impact on Taiyuan's air quality. PSCF and CWT analysis showed that the major potential sources affecting Taiyuan's air quality were mainly located in Fenwei plain, i. e., Hanzhong, Xi'an in Shaanxi Province, and Lvliang and Linfen in Shanxi Province. Establishing a joint prevention and control mechanism in the Fenwei plain and its surrounding areas would be of great significance for controlling pollution in the area.

Key words: Taiyuan; air quality index(AQI); pollution characteristics; trajectory cluster; potential sources

随着当今社会城市化进程的不断推进, 人类赖以生存的大气环境不断恶化, 大气污染问题已成为影响城市环境的重要因素^[1~3]。大气污染具有区域性, 污染物浓度不仅受本地排放源的影响, 还在一定程度上受区域传输的影响^[4], 大气污染物以边界层为载体, 在大气多尺度时空系统作用下, 通过化学转化及光化学作用, 形成污染时空多尺度分布^[5]。经济发达区域的多个城市可构成“城市群”, 其污染物扩散混合构成城市之间的羽流影响效应及其区域性大范围污染扩散现象^[6]。研究显示, 城市

间存在着大气污染的相互影响和输送污染物的传输路径^[4], 苏福庆等^[7,8]利用统计方法研究大气污染物的输送特征, 分析了静稳天气下北京市外来污染物各类尺度的输入通道流场及典型边界层输送汇以

收稿日期: 2019-04-15; 修订日期: 2019-05-22

基金项目: 山西省自然科学基金项目(201601D011084); 山西省青年科学基金项目(201801D221333); 山西省气象局重点项目(SXKZDDQ20185105)

作者简介: 闫世明(1975~), 男, 高级工程师, 主要研究方向为大气环境, E-mail: qksysm@126.com

* 通信作者, E-mail: qksyw@126.com

及跨区输送对北京市空气质量影响,陈朝晖等^[9]分析研究了华北区域大气污染过程中天气型及污染物输送路径。

目前运用后向轨迹模型 HYSPLIT4 (hybrid single-particle lagrangian integrated trajectory)^[10~12]通过模拟气流来源来判断上风向源区对目标地区是否存在影响是一种非常有效的方式。运用该模型,国内外学者开展了大量研究工作,Anil 等^[13]对伊斯坦布尔的可吸入颗粒物的远距离大气迁移影响进行了研究;Park 等^[14]对亚洲大陆到东北亚和西北太平洋的 SO₂ 远距离输送进行了研究;Fishman 等^[15]对美国东部的 O₃ 污染事件进行了研究;石春娥等^[16]结合聚类分析的方法研究了合肥地区不同输送轨迹与该地区 PM₁₀ 浓度之间的关系;赵恒等^[17]研究了 TRACE-P 期间中国香港大气污染物的来源;王郭臣等^[18]分析了地面和高空反向气流轨迹对北京的影响;占明锦等^[19]分析了不同气团来源对于瓦里关地区颗粒物的数浓度及其谱分布的影响;高晋徽等^[20]分析了长/近距离输送对南京地区 O₃、NO₂ 和 SO₂ 浓度变化的影响;陈霖等^[21]研究了半干旱地区黑碳气溶胶和含碳气体来源;杨阳等^[22]对北京沙尘前后气溶胶污染物的来源进行了分析;此外,相关学者利用后向轨迹并结合聚类分析、潜在源贡献因子分析法以及浓度权重轨迹分析法分析了西安^[23]、兰州^[24]、重庆^[25]、南昌^[26]、上海^[27]和郑州^[28]等地区的大气污染输送来源以及污染贡献源区。

上述研究多关注经济发达城市以及京津冀、长三角和珠三角地区,且多为针对某次重大污染事件或者季节性某个要素的浓度值进行后向轨迹的分析,对于较长时间尺度的后向轨迹综合聚类分析和污染源区的探究较少。太原位于汾渭平原北端,是京津冀大气污染传输通道城市之一,本研究选取太原 2014~2017 年污染较严重的秋冬季节进行后向轨迹的聚类分析,并应用潜在源区贡献因子(PSCF)和浓度权重轨迹(CWT)进行综合分析,研究太原市秋冬季大气污染物的传输来向和潜在源区,从而有效地进行工业企业的合理布局,控制入侵气团的污染浓度,减少外来污染物对太原市城市空气质量的影响。

1 材料与方法

1.1 数据来源

用于后向轨迹模式计算的气象场资料(2014 年 1 月至 2017 年 12 月)为美国国家环境预报中心(NCEP)提供的全球资料同化系统(global data assimilation

system, GDAS)数据,每日 4 个时次,即 00:00、06:00、12:00 和 18:00(UTC),水平分辨率为 1°×1°。

用于监测资料分析的数据来源于原中华人民共和国环境保护部数据中心实时发布的 AQI (air quality index, 空气质量指数;2014 年 1 月至 2018 年 12 月每日 AQI 以及 2014 年 1 月至 2017 年 12 月每小时 AQI)。

1.2 后向轨迹模式

本研究采用美国 NOAA 空气资源实验室研制的 HYSPLIT4 模式来计算和分析大气污染物的来源、输送、扩散轨迹,识别大气污染物随气团的移动方向。该模式模拟精度高,时间连续变化,被广泛应用于大气输送研究及污染过程分析中。由于模拟高度和轨迹运行时间的选取对 HYSPLIT 模式的模拟精度有较大影响,本研究的后向轨迹计算起始高度选取为 300 m,能反映气流的区域性流动特征,又可减小下垫面摩擦力的影响,能够更好地代表边界层底层的情况^[5]。轨迹运行时间选择为 72 h,以便包含二次污染物的生命周期^[29],时间间隔取为 1 h。

1.3 聚类分析

聚类分析是一种多元统计技术,可对大量的数据进行分组,合理有效地简化数据,提高信息的利用率,广泛地应用于大气污染研究中。根据气团移动速度和方向对大量轨迹进行分组,得出不同的输送轨迹组,可以比较直观地了解气团的来源方向和传输距离,从而估计大气污染物的潜在源区。本研究采用二分 k 均值算法进行聚类分析,该算法首先将所有的轨迹作为一组,然后将该组一分为二,之后选择其中的一个组继续划分,选择哪一个组进行划分取决于对其划分是否可以最大程度地降低误差平方和。重复上述基于距离平方和的划分过程,直到组数目和指定的要聚类的数量相等。

每个轨迹组的空间方差(total spatial variance, TSV)为组内每条轨迹与组平均轨迹对应点的距离平方和。轨迹间距离采用欧式距离进行计算,计算公式如下:

$$D_{12} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \{[X_1(i) - X_2(i)]^2 + [Y_1(i) - Y_2(i)]^2\}} \quad (1)$$

式中, $X_1(i)$ 和 $Y_1(i)$ 表示轨迹一的坐标, $X_2(i)$ 和 $Y_2(i)$ 表示轨迹二的坐标。

1.4 潜在源贡献因子分析法

潜在源贡献因子分析法(potential source contribution function, PSCF)是基于条件概率函数发展而来的一种方法,它基于气流轨迹分析来识别可能源区^[30],通过结合气团轨迹和某特征值(如 AQI、

污染物浓度值等)来给出可能的污染排放源方位。

PSCF 函数定义为经过研究区域的气团到达观测点时对应的某要素值超过设定的阈值的条件概率。将研究区域划分为一定分辨率的若干个网格,每个网格记为网格 (i, j) ,对研究的要素设定一个阈值,当轨迹所对应的要素值高于这个阈值时,认为该轨迹是污染轨迹,经过网格 (i, j) 的污染轨迹端点数为 m_{ij} ,而落在网格 (i, j) 内的所有轨迹端点数为 n_{ij} ,则 PSCF 可以定义为公式:

$$\text{PSCF}_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}} \quad (2)$$

对于某些偏远网格,由于轨迹总体停留时间较少及分母 n_{ij} 较小,可能会引起 PSCF 计算结果的较大不确定性。为了降低这些特殊网格对于计算结果的影响,引入权重系数 W_{ij} ,当某一网格内的 n_{ij} 小于研究区域内每个网格的平均轨迹端点数的一定位数时,就要使用 W_{ij} 来减小 PSCF 的不确定性。

$$\text{WPSCF}_{ij} = \text{PSCF}_{ij} \times W_{ij} \quad (3)$$

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00, & 5n_{\text{avg}} < n_{ij} \\ 0.70, & 3.5n_{\text{avg}} < n_{ij} \leq 5n_{\text{avg}} \\ 0.42, & 2.0n_{\text{avg}} < n_{ij} \leq 3.5n_{\text{avg}} \\ 0.17, & n_{ij} \leq 2.0n_{\text{avg}} \end{cases} \quad (4)$$

1.5 浓度权重轨迹分析法

浓度权重轨迹分析法 (concentration weighted trajectory method, CWT)^[31,32] 是一种计算潜在源区气流轨迹权重浓度,反映不同轨迹的污染程度的方法,可以定量给出每个网格的平均权重浓度,计算公式为:

$$\text{CWT}_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^M \tau_{ijk}} \sum_{k=1}^M C_k \tau_{ijk} \quad (5)$$

$$\text{WCWT}_{ij} = \text{CWT}_{ij} \times W_{ij} \quad (6)$$

式中, C_{ij} 是网格 (i, j) 上的平均权重浓度; k 是轨迹; M 是轨迹总数; C_k 是轨迹 k 经过网格 (i, j) 时对应的某要素值(如 AQI、污染物质量浓度等); τ_{ijk} 是轨迹 k 在网格 (i, j) 停留的时间。在 PSCF 分析法中所用的权重函数 W_{ij} 也适用于 CWT 分析法。

2 结果与讨论

2.1 太原市大气污染特征分析

依据历年中国生态环境状况公报,新标准第一阶段监测实施城市(共 74 个城市)中按照环境空气质量综合指数评价,太原市的环境空气质量指数 2015~2017 年分别位于倒数的第 6、10 和 13 位,环境空气污染较为严重^[33]。图 1 给出了太原市 2014~2018 年逐日 AQI 变化,年初 1 月前后出现最

高值,在 8 月前后出现最低值,2014~2018 年逐日 AQI 达标天数分别为 202、233、236、176 和 182 d,近两年达标天数显著下降,表明太原地区大气环境质量改善的基础仍十分脆弱,环境保护面临的形势依然严峻。

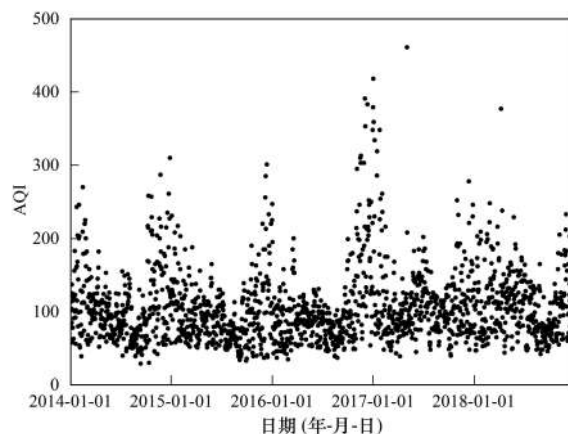


图 1 太原市 2014~2018 年环境空气质量指数逐日分布

Fig. 1 Daily distribution of air quality index in Taiyuan from 2014 to 2018

基于逐日 AQI 数据,分析了 2014~2018 年 AQI 月变化及不同 AQI 等级占比情况(图 2)。从图

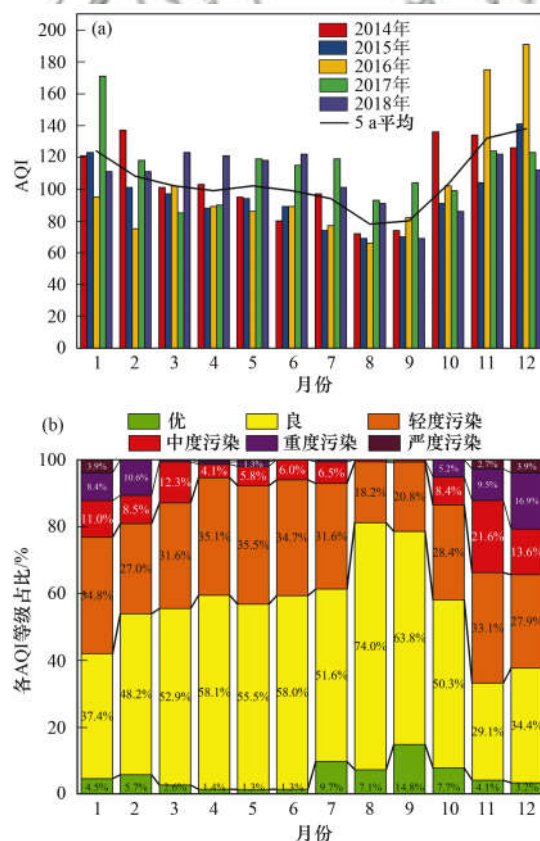


图 2 2014~2018 年 AQI 逐月变化以及不同 AQI 等级逐月占比情况

Fig. 2 Monthly variation of AQI and different AQI grades in Taiyuan from 2014 to 2018

2(a)可以看出,太原市 AQI 月均值呈现出“凹”型分布,其中 8 和 9 月为全年 AQI 最低的月份,同时也是优良天数占比最高的月份[图 2(b)],9 月空气质量为优的天数为全年最多;图 2 中也显示,11 月虽不是 AQI 最高的月份,但优良天数最少;太原以及周边地区从 10 月中下旬进入采暖期,因此,10 月至翌年 2 月 AQI 一直保持在较高的状态,同时也是中度污染以上天数占比较高的月份,本研究将重点关注此时段污染物传输特征,以下秋冬季均指这 5 个月。

图 3 为不同等级 AQI 全年及秋冬季占比变化情况。由图 3(a)可以看出,2015~2016 年优良天数比例较高超过 60%,2017 年又下降到不足 50%;伴随优良天数的减少,中度、重度污染以上出现天数比例明显上升。从秋冬季来看[图 3(b)],2014~2018 年秋冬季优良天数占比逐步上升,2018 年超过 50%,空气质量好转趋势明显,可能得益于政府在秋冬季实行的一系列污染管控措施,2017 和 2018 年秋冬季节多次发布重污染天气预警,重污染天气期间对重点污染企业进行关停和限产措施,并多次实施了车辆限行。结合全年及秋冬季优良天数

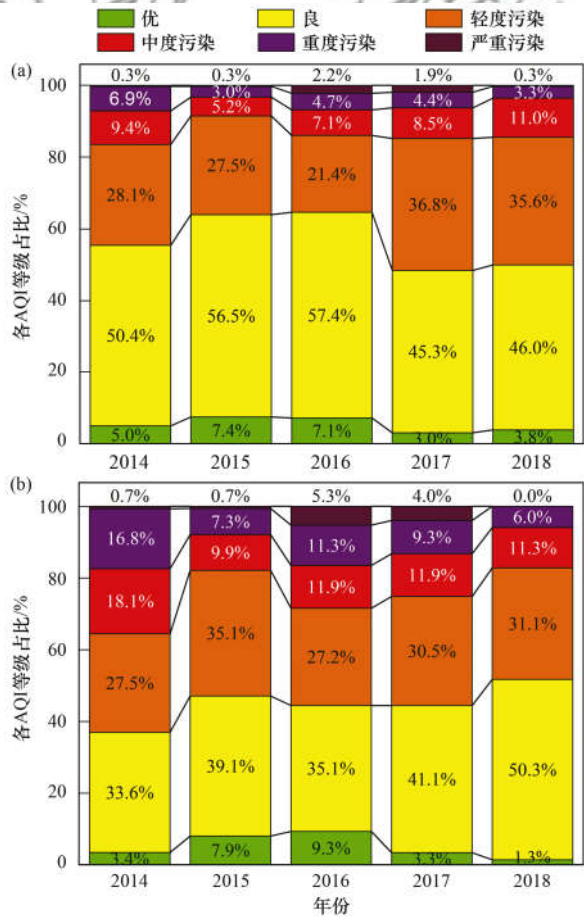


图 3 2014~2018 年全年及秋冬季 AQI 等级逐年占比情况
Fig. 3 Annual, autumn, and winter variation in different AQI grades in Taiyuan from 2014 to 2018

年变化特征分析表明,近年来全年优良天数下降可能来自于春季沙尘天气影响和夏季 O₃ 污染。

图 4 给出了不同年份及逐年秋冬季首要污染物占比情况。从全年来看,颗粒性污染物为首要污染物的天数占主导地位,但呈逐年下降趋势。其中,PM_{2.5}为首要污染物的天数占比下降趋势非常显著,PM₁₀占比则有上升趋势;此外, O₃ 为首要污染物的天数占比逐年上升趋势明显, SO₂ 则有明显地下降趋势。从秋冬季来看,总体变化趋势同全年类似, PM_{2.5}为首要污染物的天数占比下降趋势明显,而 PM₁₀则有明显的上升趋势;不同的是秋冬季 PM_{2.5} 为首要污染物的天数比例明显要高,接近全年均值的 2 倍,而 PM₁₀为首要污染物的天数占比在近两年增幅明显要高于全年,表明太原地区近年来污染类型可能发生变化,因此在污染治理过程中不仅要继续加大秋冬季颗粒物治理力度,也要进一步关注其他季节不同类型的污染情况。

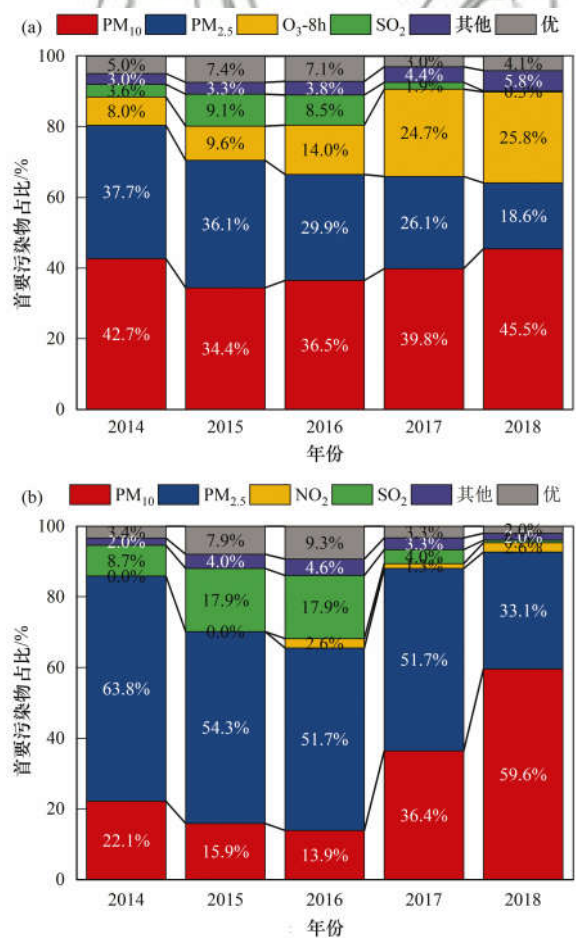


图 4 2014~2018 年全年及秋冬季各首要污染物占比情况
Fig. 4 Annual, autumn, and winter variation in the proportion of primary pollutants in Taiyuan from 2014 to 2018

2.2 输送路径分析

采用后向轨迹模式计算了到达太原(37.73°N, 112.55°E)的 2014 年 1 月 1 日至 2017 年 12 月 31

日这 4a 逐时后向轨迹. 采用二分 k 值法对其进行聚类, 得到太原市秋冬季典型的 8 类输送轨迹, 水平方向轨迹分布见图 5. 轨迹的路线和方向表示气团在到达计算点(太原市)所经过的地区, 根据其长短可以判断出气团移动的速度, 长轨迹对应移动快速的气团, 短轨迹对应移动缓慢的气团, 垂直方向的变化表示气团在垂直方向混合和垂直运动的信息. 表 1 给出了 8 类轨迹的平均速度, 其中第 1、3 和 7 类轨迹平均移动速度均超过 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 为远距离输送轨迹; 第 2 和 5 类轨迹平均移动速度在 8

$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 为中距离输送; 第 4、6 和 8 类轨迹移动速度低于 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 为近距离输送轨迹. 整体来看(图 5), 3 类西北轨迹(第 1、2 和 3 类)占 21.1%, 3 类偏西轨迹占 53% (第 5、6 和 7 类), 西南轨迹占 12% (第 8 类), 偏东方向轨迹占 13.9% (第 4 类). 轨迹结果与太原所处的地理位置和季风气候是相适应的, 太原市地处中纬度地带大陆内部, 其西北部为广阔的欧亚大陆腹地, 西北风盛行, 距东部海岸线较远, 且有太行山脉屏障, 偏东气流对本区域影响较小.

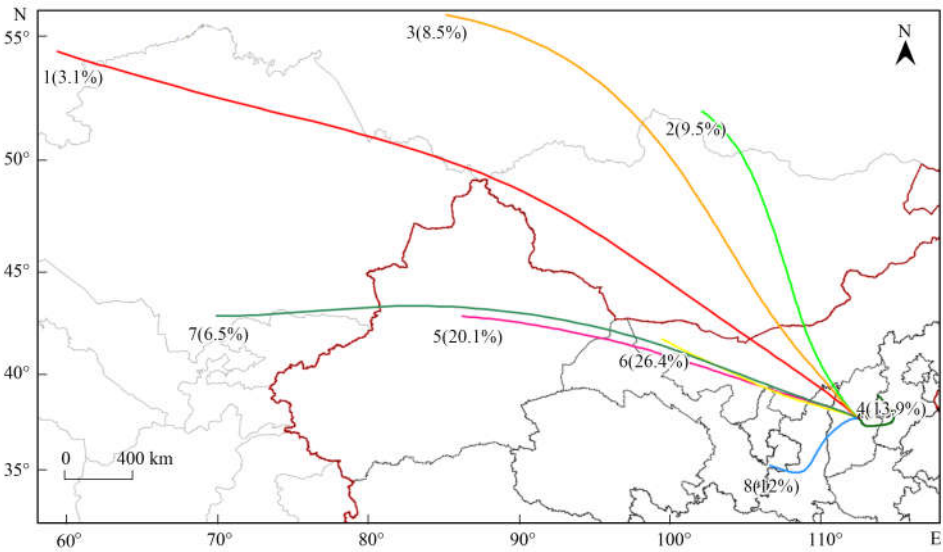


图 5 太原市 2014~2017 年秋冬季 8 类聚类轨迹

Fig. 5 Eight trajectory clusters to Taiyuan in autumn and winter from 2014 to 2017

表 1 太原市秋冬季 8 种聚类轨迹气团平均移动速度
Table 1 Air mass movement velocity of eight trajectory clusters to Taiyuan in autumn and winter

轨迹分类	1	2	3	4	5	6	7	8
平均风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	17.6	7.1	11.6	1.6	8.9	4.7	14.1	2.6

图 6 给出了太原市秋冬季 8 种聚类轨迹垂直分布. 结合轨迹水平和垂直分布情况可以看出, 第 1、3 和 7 类长距离轨迹在垂直方向上也有较大跨度, 传输过程有较为明显的先上升后下沉的过程, 说明这 3 类气团先是从源地的抬升, 然后以较快的速度向下游输送, 并在垂直混合和下沉运动的作用下达到目标城市; 第 5、6 和 7 类轨迹为方向一致但水平长度显著不同的轨迹, 其中第 6 类轨迹的气团速度和整体高度(垂直速度)均显著低于第 5 和 7 类轨迹, 轨迹越短、垂直高度越低, 更易将沿途的污染裹挟向下游输送, 因此第 6 类轨迹对目标地区的影响程度可能大于其他两类; 中距离轨迹第 2 和 5 类在垂直高度较为接近, 近距离轨迹第 4、6 和 8 类在垂直高度也较为接近, 但水平方向上经过区域不同, 对目标区域的影响也可能产生差异. 图 6 中还

可以看出, 第 8 类轨迹在垂直方向有明显的先下沉后上升的现象, 可能更易于传输气流中污染物的积累.

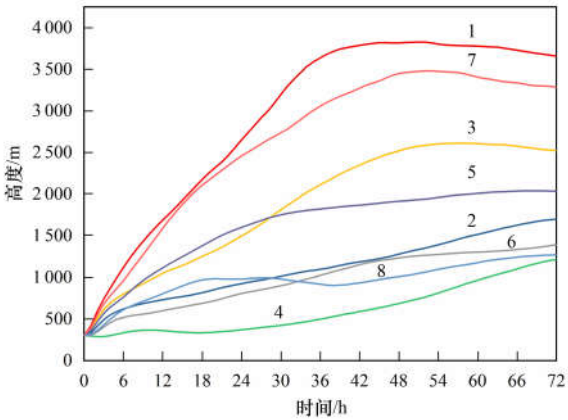


图 6 太原市秋冬季 8 种聚类轨迹垂直分布

Fig. 6 Profile of eight trajectory clusters to Taiyuan in autumn and winter

图 7 给出了太原市秋冬季 8 种聚类轨迹下 AQI 分布箱式图, 表 2 给出了不同聚类轨迹下优良天气统计特征. 结果显示, 不同轨迹下对应的太原市 AQI 均值有显著差异. 第 1、2 和 3 类轨迹下太原市

AQI 的优良比例均在 70% 以上, 其中偏北方向的第 2 类轨迹下太原 AQI 优良比例最高, 为最清洁轨迹. 偏西方向的第 5、6 和 7 类轨迹下 AQI 分布特征较为相似, 污染天气比例均在 50% 以上, 这 3 条轨迹均可能造成太原市 AQI 偏高, 其中第 6 类轨迹下太原污染天气比例均略高于第 5 和 7 类, 说明气团高度较低速度较慢时, 更容易将气团移动路径上的污染传输至下游. 第 4 类轨迹是唯一的偏东方向轨迹, 4 类轨迹下太原污染天气比例同第 6 类轨迹接近, 但优良比例低于第 6 类轨迹, 因此该轨迹对目标城市的影响较第 6 类轨迹影响偏小. 来自西南方向的第 8 类轨迹下太原市污染比例超过 84%, 该轨迹下太原市极易发生污染, 且污染程度也最重, 表明该轨迹为典型的污染轨迹, 其在垂直运动过程

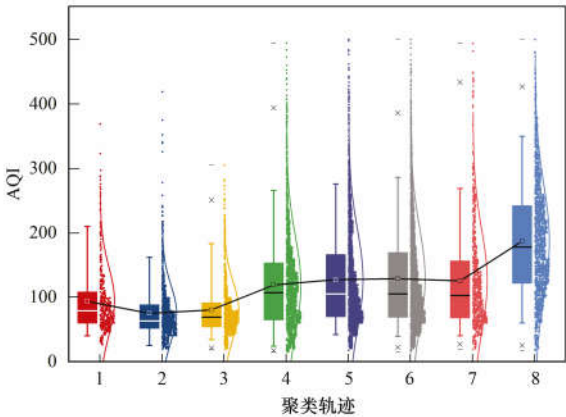


图 7 太原市秋冬季 8 种聚类轨迹 AQI 分布情况
Fig. 7 AQI of eight trajectory clusters to Taiyuan in autumn and winter

中的下沉后再抬升现象更容易将沿途路径的低层污染裹挟向下游输送, 造成目标城市的严重污染.

表 2 不同聚类轨迹统计分析结果

Table 2 Statistical analysis of eight trajectory clusters to Taiyuan in autumn and winter		
轨迹类型	优良比例/%	污染比例/%
1	71.32	28.67
2	82.69	17.31
3	81.16	18.84
4	46.52	53.48
5	47.53	52.47
6	46.70	53.31
7	48.41	51.59
8	15.95	84.05

表 3 为太原市在不同 AQI 等级下各聚类轨迹分布情况. 发生轻度污染时, 第 6 和 5 类轨迹出现几率较高均超过 20%, 第 4 类轨迹出现的几率也接近 20%; 发生中度污染时, 以第 6 类轨迹出现的几率最高达到 30%, 第 4、5 和 8 类轨迹出现的几率约 20%, 较为接近; 当发生重度污染时, 第 6 和 8 类轨迹出现的比重相当均为 28%, 其次是第 5 类轨迹比重为 22%; 发生严重污染时, 第 8 类轨迹出现的比重达到 34%, 其次是第 6 类轨迹 28% 和第 5 类轨迹 19%.

综合以上分析, 第 8 类轨迹是外来污染物输送入太原的主要轨迹, 其次为第 6 类轨迹和第 5 类轨迹, 第 4 类轨迹主要造成目标城市轻度和中度污染.

表 3 太原市不同 AQI 等级发生时各聚类轨迹所占的比重/%
Table 3 Proportion of trajectory clusters under different AQI grades/%

AQI 等级	轨迹分类								合计
	1	2	3	4	5	6	7	8	
优	3.01	19.49	14.45	18.64	14.58	21.78	4.32	3.73	100
良	4.65	14.64	13.59	11.59	19.86	25.70	6.12	3.85	100
轻度污染	2.46	5.05	4.62	17.89	21.78	28.40	6.55	13.24	100
中度污染	1.31	2.61	2.75	17.52	19.15	30.26	6.21	20.20	100
重度污染	1.33	1.67	2.25	9.92	21.74	28.32	5.94	28.84	100
严重污染	0.37	1.12	0.19	12.34	18.69	28.04	4.86	34.39	100

2.3 潜在源区分析

对太原市气流轨迹的聚类分析能够确定出影响太原市的气流轨迹的大致方向和贡献, 但难以明确地反映潜在源区的位置和贡献大小, 而潜在源贡献因子分析法 (PSCF) 和浓度权重轨迹分析法 (CWT) 可以分析潜在污染来源和贡献大小. 潜在源区一般结合某种污染物浓度来分析, 例如对某地区 $PM_{2.5}$ ^[24] 或 PM_{10} ^[31] 的潜在源区进行分析, AQI 作为一个综合指标可以更宏观地表征一个地区的总体污染程度, 本研究尝试结合太原地区

AQI 指数来对 2014 ~ 2017 年污染物潜在源区进行分析, 从而获得引起太原市 AQI 增高的潜在源区, 以期对引起太原市秋冬季污染的潜在源区有更深入地了解.

PSCF 基于条件概率函数来判断污染源可能方位, 因此从一次污染过程或者短期污染过程来进行潜在源区贡献的计算并不能准确反映影响某地的潜在源区贡献, 或者说只能局限于某次过程的潜在源区贡献, 因此本研究基于 2014 ~ 2017 年秋冬季的后向轨迹来进行 PSCF 计算, 以更全面反映潜在源

区对太原市的长期影响和贡献。太原市秋冬季污染的潜在源区贡献计算结果见图 8, 颜色越深, 表示 PSCF 的计算值越大, 表明该网格对计算点太原市 AQI 的影响越大。由图可见, 对太原市 AQI 影响较大即 PSCF 高值区(潜在贡献 0.8 以上)主要位于甘肃庆阳以南、陕西汉中以北包括西安、铜川、陕西延安以南和山西的吕梁、临汾以及河南洛阳以北、山西晋城以西等地, 这些潜在源区的气团主要沿着第 8 类轨迹通过近距离输送到达太原; 通过第 6 和 5 类轨迹进行中远距离输送的张掖以北、银川以北等区域, 潜在贡献 0.6 左右; 通过第 4 类轨迹进行近距离输送的河北石家庄、邢台等区域潜在贡献为 0.5 左右。

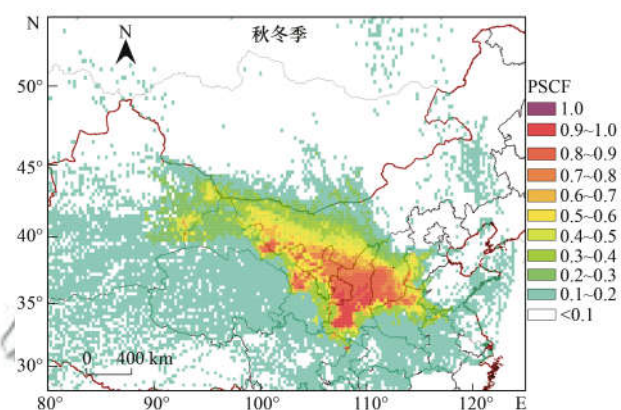


图 8 太原市潜在源区贡献分析结果

Fig. 8 PSCF analysis in autumn and winter from 2014 to 2017 in Taiyuan

运用 CWT 分析可以进一步确定潜在源区的权重浓度(本文基于 AQI 计算, 即 AQI 的大小), 见图 9。结合图 8 和图 9 可以看出, 两种方法结论基本一致。CWT 计算结果表明, 对太原市 AQI 值贡献超过 200 以上的区域主要是甘肃庆阳以南、陕西汉中以北包括西安和铜川等地; 对太原市 AQI 值贡献超过 150 以上的地区是内蒙阿拉善盟以南、陕西延安以南、山西的吕梁以南、临汾以及河南洛阳、郑州以北、山西晋城等地; 对太原市 AQI 值超过 100 以上贡献的区域主要是内蒙中西部、陕西榆林、山西晋中、长治以及河北西南、河南郑州、开封以北地区。以上这些区域对太原市秋冬季 AQI 的贡献在 100 以上, 是重要的潜在源区。

通过对太原 2014~2017 年输送路径和潜在源区分析表明, 偏西南方向的第 8 类轨迹是造成太原秋冬季大气严重污染的主要输送途径, 太原市大气严重污染主要的潜在源区就是汾渭平原的核心区域, 包括陕西省西安、宝鸡、汉中等区域以及山西省汾河谷地的吕梁、晋中、临汾和运城等地区。杨晓春等^[23]和王珊等^[34]对西安地区一次重污染过程

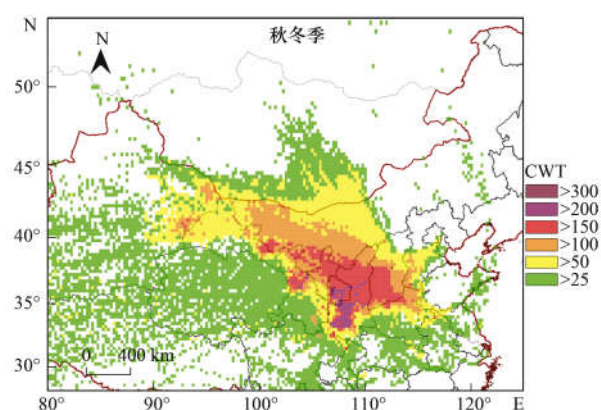


图 9 太原市浓度权重轨迹分析结果

Fig. 9 CWT analysis in autumn and winter from 2014 to 2017 in Taiyuan

的后向轨迹进行了模拟, 段时光^[28]等对郑州冬季 PM_{2.5} 的输送路径进行了分析, 结果显示, 山西汾河谷地也是西安、郑州等地区重污染过程中输入污染物的重要来源之一, 因此, 太原和周边地区的影响是显著且相互的, 建立起有效的区域联防联控机制, 才能提高空气污染治理效果。

3 结论

(1) 太原市 2014~2018 年优良天数波动较大, 2014 年优良天占 55%, 2015、2016 年上升到 64%, 2017、2018 年下降到不足 50%; 秋冬季变化则不同, 2014~2018 年秋冬季优良天数占比逐步上升, 2018 年超过 50%, 空气质量好转趋势明显。太原 8、9 月空气质量最佳, 从 10 月开始转差一直持续到翌年 2 月。污染类型发生变化, 全年 PM_{2.5} 为首要污染物的天数显著下降, PM₁₀ 和 O₃ 为首要污染物的天数明显上升, 秋冬季亦是 PM_{2.5} 为首要污染物的天数下降, PM₁₀ 上升。

(2) 利用 HYSPLIT4 模型和气流轨迹聚类分析 2014~2017 年秋冬季太原的后向轨迹, 得到 8 类轨迹, 21% 来自西北方向, 53% 来自偏西方向, 12% 来自西南方向, 14% 来自偏东方向。远距离输送对太原影响较小, 近距离输送对太原影响较大, 西南方向轨迹下太原有 84% 的比例出现污染天气, 且多重污染, 是外来污染物输送进入太原的主要轨迹, 偏西方向近距离轨迹和偏东方向轨迹下太原发生污染天气的比例也高于 50%。

(3) 潜在源贡献因子分析和浓度权重轨迹分析结果具有一致性, 甘肃庆阳以南, 陕西的汉中、西安、铜川、延安和山西的吕梁、临汾、晋城以西以及河南洛阳以北等地是对太原污染贡献最大的区域, 表明建立汾渭平原及周边区域联防联控机制对控制区域污染有着重要意义。

参考文献:

- [1] 肖悦, 田永中, 许文轩, 等. 中国城市大气污染特征及社会经济影响分析[J]. 生态环境学报, 2018, **27**(3): 518-526.
Xiao Y, Tian Y Z, Xu W X, *et al.* Study on the spatiotemporal characteristics and socioeconomic driving factors of air pollution in China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, **27**(3): 518-526.
- [2] 王晓琦, 郎建奎, 程水源, 等. 京津冀及周边地区 PM_{2.5} 传输规律研究[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(11): 3211-3217.
Wang X Q, Lang J L, Cheng S Y, *et al.* Study on transportation of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) and its surrounding area[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(11): 3211-3217.
- [3] 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.
- [4] 苏彬彬, 许煜洋, 张若宇, 等. 区域传输对华东森林及高山背景点位大气污染物浓度的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(8): 2871-2877.
Su B B, Xu J Y, Zhang R Y, *et al.* Influence of atmospheric transport on air pollutant levels at a mountain background site of East China[J]. Environmental Science, 2014, **35**(8): 2871-2877.
- [5] 邓雪娇, 黄健, 吴兑, 等. 深圳地区典型大气污染过程分析[J]. 中国环境科学, 2006, **26**(S1): 7-11.
Deng X J, Huang J, Wu D, *et al.* Analyses on the typical atmospheric pollution processes in Shenzhen area[J]. China Environmental Science, 2006, **26**(S1): 7-11.
- [6] 徐祥德, 周丽, 周秀曦, 等. 城市环境大气重污染过程周边源影响域[J]. 中国科学 D 辑 地球科学, 2004, **34**(10): 958-966.
Xu X D, Zhou L, Zhou X J, *et al.* Influencing domain of peripheral sources in the urban heavy pollution process of Beijing [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2005, **48**(4): 565-575.
- [7] 苏福庆, 任阵海, 高庆先, 等. 北京及华北平原边界层大气中污染物的汇集系统——边界层输送汇[J]. 环境科学研究, 2004, **17**(1): 21-25, 33.
Su F Q, Ren Z H, Gao Q X, *et al.* Convergence system of air contamination in boundary layer above Beijing and North China: transportation convergence in boundary layer[J]. Research of Environmental Sciences, 2004, **17**(1): 21-25, 33.
- [8] 苏福庆, 高庆先, 张志刚, 等. 北京边界层外来污染物输送通道[J]. 环境科学研究, 2004, **17**(1): 26-29, 40.
Su F Q, Gao Q X, Zhang Z G, *et al.* Transport pathways of pollutants from outside in atmosphere boundary layer [J]. Research of Environmental Sciences, 2004, **17**(1): 26-29, 40.
- [9] 陈朝晖, 程水源, 苏福庆, 等. 华北区域大气污染过程中天气型和输送路径分析[J]. 环境科学研究, 2008, **21**(1): 17-21.
Chen Z H, Cheng S Y, Su F Q, *et al.* Analysis of synoptic patterns and transports during regional atmospheric pollution process in North China[J]. Research of Environmental Sciences, 2008, **21**(1): 17-21.
- [10] Draxler R R, Hess G D. Description of the HYSPLIT₄ modeling system[R]. NOAA Technical Memorandum ERL ARL- 224, Silver Spring: NOAA Air Resources Laboratory, 1997.
- [11] Draxler R R, Hess G D. An overview of the HYSPLIT₄ modelling system for trajectories, dispersion, and deposition[J]. Australian Meteorological Magazine, 1998, **47**(4): 295-308.
- [12] Draxler R R. HYSPLIT₄ user's guide[M]. Silver Spring: US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Research Laboratories, Air Resources Laboratory, 1999.
- [13] Anil I, Karaca F, Alagha O. Investigation of long-range atmospheric transport effects on Istanbul: "Inhalable particulate matter episodes"[J]. Ekoloji, 2009, **19**(73): 86-97.
- [14] Park J, Ryu J, Kim D, *et al.* Long-range transport of SO₂ from continental Asia to northeast Asia and the northwest Pacific Ocean: flow rate estimation using OMI data, surface *in situ* data, and the HYSPLIT model[J]. Atmosphere, 2016, **7**(4): 53.
- [15] Fishman J, Balok A E. Calculation of daily tropospheric ozone residuals using TOMS and empirically improved SBUV measurements: application to an ozone pollution episode over the eastern United States [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1999, **104**(D23): 30319-30340.
- [16] 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.
- [17] 赵恒, 王体健, 江飞, 等. 利用后向轨迹模式研究 TRACE-P 期间香港大气污染物的来源[J]. 热带气象学报, 2009, **25**(2): 181-186.
Zhao H, Wang T J, Jiang F, *et al.* Investigation into the source of air pollutants to Hong Kong by using backward trajectory method during the Trace-P campaign [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2009, **25**(2): 181-186.
- [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] 占明锦, 孙俊英, 张养梅, 等. 气团来源对瓦里关地区颗粒物数谱分布的影响[J]. 冰川冻土, 2009, **31**(4): 659-663.
Zhan M J, Sun J Y, Zhang Y M, *et al.* The influence of air mass sources on the particle number concentration and the size distribution at Mt. Waliguan [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, **31**(4): 659-663.
- [20] 高晋徽, 朱彬, 王东东, 等. 南京北郊 O₃、NO₂ 和 SO₂ 浓度变化及长/近距离输送的影响[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(5): 1149-1159.
Gao J H, Zhu B, Wang D D, *et al.* The variation of air pollutants and the impact of long-range transport in the northern suburb of Nanjing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, **32**(5): 1149-1159.
- [21] 陈霖, 张镭, 张磊, 等. 半干旱地区黑碳气溶胶和含碳气体特征及来源[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(8): 1345-1352.
Chen L, Zhang L, Zhang L, *et al.* Characteristics of black carbon aerosol and carbonaceous gases and their emission sources in semi-arid region[J]. China Environmental Science, 2012, **32**(8): 1345-1352.
- [22] 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.
- [23] 杨晓春, 杜萌萌, 吴其重, 等. 西安地区一次重污染过程的气象条件及轨迹分析[J]. 干旱气象, 2016, **34**(3): 547-552.
- Yang X C, Du M M, Wu Q Z, *et al.* Analysis on meteorological condition and trajectory of a serious pollution weather in Xi'an of Shaanxi[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, **34**(3): 547-552.
- [24] 刘娜, 余晔, 何建军, 等. 兰州冬季大气污染源分析[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.
- [25] 梁丹, 王彬, 王云琦, 等. 重庆市冬季 PM_{2.5} 及气态污染物的分布特征与来源[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(7): 1039-1046.
- Liang D, Wang B, Wang Y Q, *et al.* Distribution characteristics and sources of PM_{2.5} and gaseous pollutants in winter in Chongqing[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, **28**(7): 1039-1046.
- [26] 赵阳, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 2013 年南昌市区 PM_{2.5} 的浓度水平及时空分布特征与来源[J]. 环境科学研究, 2017, **30**(6): 854-863.
- Zhao Y, Hu G R, Yu R L, *et al.* Concentrations and spatial-temporal characteristics and source analysis of PM_{2.5} in Nanchang City in 2013[J]. Research of Environmental Sciences, 2017, **30**(6): 854-863.
- [27] 周敏, 乔利平, 朱书慧, 等. 2013 年 12 月上海市重度污染期间细颗粒物化学特征与输送轨迹影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1179-1187.
- Zhou M, Qiao L P, Zhu S H, *et al.* Chemical characteristics of particulate matters and trajectory influence on air quality in Shanghai during the heavy haze episode in December, 2013[J]. Environmental Science, 2016, **37**(4): 1179-1187.
- [28] 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.
- [29] Wojcik G S, Chang J S. A re-evaluation of sulfur budgets, lifetimes, and scavenging ratios for eastern North America[J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 1997, **26**(2): 109-145.
- [30] Begum B A, Kim E, Jeong C H, *et al.* Evaluation of the potential source contribution function using the 2002 Quebec forest fire episode[J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(20): 3719-3724.
- [31] 王郭臣, 王珏, 信玉洁, 等. 天津 PM₁₀ 和 NO₂ 输送路径及潜在源区研究[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(12): 3009-3016.
- Wang G C, Wang J, Xin Y J, *et al.* Transportation pathways and potential source areas of PM₁₀ and NO₂ in Tianjin[J]. China Environmental Science, 2014, **34**(12): 3009-3016.
- [32] 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.
- [33] 中华人民共和国生态环境部. 2014-2017 中国生态环境状况公报[EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/>, 2018-05-31.
- [34] 王珊, 廖婷婷, 王莉莉, 等. 西安一次霾重污染过程大气环境特征及气象条件影响分析[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(11): 3452-3462.
- Wang S, Liao T T, Wang L L, *et al.* Atmospheric characteristics of a serious haze episode in Xi'an and the influence of meteorological conditions[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(11): 3452-3462.

CONTENTS

Characteristics of Aerosol Vertical Distribution over the Yangtze River Delta Region of China in 2018	SHEN Ji, CAO Nian-wen (4743)
Characteristics of Haze Pollution Episodes During Autumn and Winter in 2018 in Shijiazhuang	SU Wen-kang, BAO Xiao-lei, NI Shuang-ying, <i>et al.</i> (4755)
Spatial Temporal Characteristics and Cluster Analysis of Chemical Components for Ambient PM _{2.5} in Wuhan	ZHANG Hui-tao, TIAN Ying-ze, LIU Bao-shuang, <i>et al.</i> (4764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Atmospheric PM _{2.5} in a Living Area of Zhengzhou City	HE Rui-dong, ZHANG Yi-shun, CHEN Yong-yang, <i>et al.</i> (4774)
Distribution Characteristics and Sources of Metal Elements in Rainwater in Xiamen	WANG Shan-shan, CHENG Yi-feng, YAN Jin-pei, <i>et al.</i> (4783)
First Long-Term Study of Atmospheric New Particle Formation in the Suburb of Shanghai from 2015 to 2017	HUO Jun-tao, WANG Xin-ning, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (4791)
Characteristics, Transportation, Pathways, and Potential Sources of Air Pollution During Autumn and Winter in Taiyuan	YAN Shi-ming, WANG Yan, GUO Wei, <i>et al.</i> (4801)
Spatial and Temporal Characteristics of Air Quality and Cause Analysis of Heavy Pollution in Northeast China	CHEN Wei-wei, LIU Yang, WU Xue-wei, <i>et al.</i> (4810)
Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanism of Aerosol Optical Depth in the Ebinur Lake Basin	CHEN Xiang-yue, DING Jian-li, WANG Jing-zhe, <i>et al.</i> (4824)
Concentration Levels and Impact Factors of Benzene Series in Chinese Residential Building	HOU Bei-bei, YIN Yi-hui, PEI Jing-jing, <i>et al.</i> (4833)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Aromatic Compounds in Shijiazhuang	YANG Yang, LI Xing-ru, LIU Shui-qiao, <i>et al.</i> (4841)
Emission Characteristics Analysis and Health Risk Assessment of Unorganized VOCs in the Carbon Industry, Zhengzhou	ZHANG Yi-shun, WANG Jia, HAN Shi-jie, <i>et al.</i> (4847)
Hazardous Volatile Organic Compound Emission Inventory Study and Its Application in a Typical Chemical Industry in the Yangtze River Delta	LU Jun, HUANG Yi-wei, HUANG Cheng (4856)
Establishment and Characteristics of an Artificial Ammonia Emissions Inventory in Jiangsu Province from 2013 to 2017	HOU Xin-hong, YU Xing-na, SHEN Li, <i>et al.</i> (4862)
Occurrence Characteristics and Health Risks of PAHs on the Surface of Buildings and Devices in the Coking Plant	ZHAO Yi-shu, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4870)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Androgens, Glucocorticoids, and Progesterone in the Liusha Bay, South China Sea	YANG Lei, ZHANG Jin-na, XU Min, <i>et al.</i> (4879)
Dynamic Changes in Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in the Karst Watershed Flood Process	YUAN Ya-qiong, SUN Ping-an, SU Zhao, <i>et al.</i> (4889)
Sources, Distribution, and Fluxes of Major and Trace Elements in the Yangtze River	WU Wen-tao, RAN Xiang-bin, LI Jing-xi, <i>et al.</i> (4900)
Contaminant Characteristics and Ecological Risk Assessments of Heavy Metals from River Networks in the Western Area of the Wangyu River	XU Chen, WANG Pei-fang, CHEN Juan, <i>et al.</i> (4914)
Influence of Rainfall Intensity on the Nutrient Loading from an Inflowing River in the Plain River Network of the Taihu Catchment	CHEN Jie, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (4924)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments from Shibalianwei Wetland in Hefei, Anhui Province, China	CHEN Shan, XU Fan, XIE San-tao, <i>et al.</i> (4932)
Spatial Distribution Characteristics of Chlorophyll-a and Nutrient Salts in Tributaries of Different River Sections in the Three Gorges Reservoir Area During the Flood Season	YANG Fan, YANG Zheng-jian, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4944)
Endogenous Release of Nitrogen and Phosphorus in the Danjiangkou Reservoir	WANG Zhi-qi, LIU Xin-xing, YAO Zhi-hong, <i>et al.</i> (4953)
Correlation Between Water Purification Capacity and Bacterial Community Composition of Different Submerged Macrophytes	LI Lin, YUE Chun-lei, ZHANG Hua, <i>et al.</i> (4962)
Size-dependent Effects of Zinc Oxide Nanoparticles on Performance and Microbial Community Structure of a Constructed Wetland	WANG Sen, REN Ling, LIU Lin-lin, <i>et al.</i> (4971)
Removal of Nitrogen and Phosphorus from Water by Biomass Carbon of Aquatic Plants	LIU Shu-lei, PENG Hui-jun, YANG Jia-yi, <i>et al.</i> (4980)
Preparation of MgO Modified Lotus Shell Biochar and Its Phosphorus Adsorption Characteristics	WANG Sheng-hua, ZHU Dan-chen, SHAO Jing-ai, <i>et al.</i> (4987)
Effects of Microplastics on Membrane Fouling During a Shortened Ultrafiltration Membrane Process	WANG Bo-dong, XUE Wen-jing, LÜ Yong-tao, <i>et al.</i> (4996)
Preparation and Comparison of Arsenic Removal Granular Adsorbent Based on Iron-Manganese Sludge	ZENG Hui-ping, YU Ya-ping, LÜ Sai-sai, <i>et al.</i> (5002)
Catalytic Degradation of Rhodamine B by FeOCl Activated Hydrogen Peroxide	ZHANG Shao-peng, CHEN Yu, BAI Shu-qin, <i>et al.</i> (5009)
Treatment Effect and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Wastewater from Large-scale Dairy Farms in Tianjin	CHEN Qian, ZHAO Run, MOU Mei-rui, <i>et al.</i> (5015)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	YAO Peng-cheng, CHEN Jia-yu, ZHANG Yong-ming, <i>et al.</i> (5024)
Start-up and Stable Operation of CANON Coupled with Denitrifying Phosphorus Removal	YIN Wen, CHEN Ya, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (5032)
Control of Sludge Bulking Caused by Unknown Reason Through FeCl ₃ Coupled with Biochemical Methods	WEI Dong-yang, XIAO Cai-lin, ZHOU Wen, <i>et al.</i> (5040)
Effects of Solid Retention Time on the Phosphorus Removal and Nitrosation Granules System	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (5048)
Start-up of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification Process and Changes in Microbial Community Characteristics	SONG Zhuang-zhuang, LÜ Shuang, LIU Zhe, <i>et al.</i> (5057)
Influence of Substrate Exposure Level on ANAMMOX Microbial Activity and Biomass	CHEN Fang-min, GAO Jia-qi, HUANG Yong, <i>et al.</i> (5066)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils in the Taige Canal Valley	LI Wei-di, CUI Yun-xia, ZENG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (5073)
Method of Dividing the Value of Soil Heavy Metal Pollution Risk Screening: Using Cd as an Example	WANG Rui, ZHANG Feng-lei, XU Shu-shu, <i>et al.</i> (5082)
Mineral Characteristics of Arsenic in the Active Area of the Banbishan Gold Mine and Its Effect on Arsenic Accumulation in Farmland Soil	WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, SHEN Jun-feng, <i>et al.</i> (5090)
Remediation of Cadmium Contaminated Paddy Fields Using Soil Conditioners	ZHOU Li-jun, WU Lin, LIN Xiao-bing, <i>et al.</i> (5098)
Inhibition and Remediation of Methylmercury Contaminated Soil by Use of Modified Montmorillonite	HAN Yi-xin, HE Tian-rong, WANG Zu-bo (5107)
Cerium-manganese Modified Biochar Immobilizes Arsenic in Farmland Soils	LIANG Ting, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5114)
Improving Bioremediation of Crude Oil-contaminated Soil by Mild Pre-oxidation	XU Jin-lan, WANG Hui-fang, WANG Rong, <i>et al.</i> (5124)
Community Structure of Heavy Metal Immobilized Bacteria in the Lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.) Rhizosphere in Soil Polluted by Heavy Metals and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Lettuce	WANG Tie-jun, SU Nan-nan, LEI Peng, <i>et al.</i> (5133)
Impact of Dicyandiamide (DCD) and 3,4-Dimethylpyrazole Phosphate (DMPP) on Ammonia-oxidizing Bacteria and Archaea in a Vegetable Planting Soil	GUO Jun-li, LIU Yi, WEI Wen-xue, <i>et al.</i> (5142)
Effect of Different Reclaimed Water Irrigation Methods on Bacterial Community Diversity and Pathogen Abundance in the Soil-Pepper Ecosystem	CUI Bing-jian, GAO Feng, HU Chao, <i>et al.</i> (5151)
Characteristics of CO ₂ and N ₂ O Emissions Under Two Land Use Types in the Loess Plateau of China	HAN Jia-le, HAO Shan, LIU Zhen-jie, <i>et al.</i> (5164)
Effects of Biochar on N ₂ O Emission from Four Typical Soils in the North China Plain	ZHANG Xiu-ling, SUN Yun, ZHANG Shui-qing, <i>et al.</i> (5173)
Effects of Optimizing Fertilization on N ₂ O and CH ₄ Emissions in a Paddy-Cowpea Rotation System in the Tropical Region of China	HU Yu-lin, TANG Shui-rong, TAO Kai, <i>et al.</i> (5182)