

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



2020

Vol.41 No.7
第41卷 第7期

目次

中国钢铁行业大气环境影响 汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 贾敏, 郭静, 田军, 黄满堂, 崔维庚, 王彤, 李时蓓, 敬红, 甄瑞卿, 孙露, 成国庆 (2981)

华北地区大气细颗粒物(PM_{2.5})年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应 杨伟, 姜晓丽 (2995)

郑州市民运会期间大气PM_{2.5}改善效果评估 王申博, 娄亚敏, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 张瑞芹 (3004)

成都夏冬季PM_{2.5}中水溶性无机离子污染特征 冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 刘琴, 张巍, 张建强 (3012)

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 雷雨, 张小玲, 康平, 王浩霖, 青泉, 欧奕含, 卢宁生, 邓中慈 (3021)

四川省典型行业挥发性有机物源成分谱 徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 王继钦, 王波 (3031)

成都市工业挥发性有机物排源成分谱 周子航, 邓也, 周小玲, 吴柯颖, 谭钦文, 尹代娟, 宋丹林, 陈秋宇, 曾文斌 (3042)

郑州市典型工业企业VOCs排放特征及风险评估 齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 杨艺, 韩丽岩, 李博伟 (3056)

阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响 牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 高千卓, 邓萌杰, 闫雨龙, 胡冬梅, 吴婧, 彭林 (3066)

典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性 景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 彭亚荣, 李英杰, 王倩, 沈建东, 王红丽 (3076)

华北地区典型重工业城市夏季近地面O₃污染特征及敏感性 欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 姚森, 周志博, 关攀博, 段文娇, 姚诗音 (3085)

稳定同位素模型解析大气氨来源的参数敏感性 顾梦娜, 潘月鹏, 何月欣, 田世丽, 王彦君, 吕雪梅, 倪雪, 孙杰, 吴电明, 方运震 (3095)

苏州市大气中汞的形态分布特征及来源分析 卢仁杰, 吴也正, 张晓婕, 沈莹, 吴福全, 薛媛媛, 邹强, 麻春艳 (3102)

轻型汽油车稳态工况下的尾气排放特征 谢岩, 廖松地, 朱曼妮, 王怡然, 王日起, 张立航, 余飞, 钟庄敏, 白莉, 黄江荣, 刘俊文, 郑君瑜 (3112)

非超低与超低排放煤电机组启动过程NO_x排放特征对比分析 李辉, 朱法华, 孙雪丽, 王宗爽, 王圣, 裴杰, 谭玉菲, 薛峰, 郭敏, 郑桂博 (3121)

邢台市道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别 宋怡, 卢新卫, 周潇, 葛子赫 (3130)

叶片微观结构变化对其颗粒物滞纳能力的影响 魏文俊, 王兵, 牛香 (3136)

关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源 赵明华, 陆彦玮, Rachana Heng, 司炳成 (3148)

岩溶流域不同水体硝酸盐的来源解析 田永著, 韩志伟, 赵然, 李耕, 曾祥颖, 黄家琰 (3157)

木沥河流域氮素污染及其污染源解析 齐冉, 徐菲菲, 杨帆, 颜昌宙 (3165)

辽河口沉积物环境要素时空动态及影响因素分析 齐玥, 孙永光, 马恭博, 吴楠, 付元宾 (3175)

鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其生态效应 王朔月, 高扬, 陆瑶, 贾璐杰, 李兆喜, 马明真, 温学发 (3186)

象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析 王磊, 汪文东, 刘懂, 李刚, 于红梅, 黄沙, 徐耀阳 (3194)

乐安河河流水体典型全氟化合物的浓度及其前体物的污染贡献 张慧, 王世亮, 余杨 (3204)

连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征 李征, 高春梅, 杨金龙, 吴立珍, 张硕, 刘艳华, 靳迪迪 (3212)

茅洲河流域民用井中耐药基因的分布特征与健康风险 吴黛灵, 邹海燕, 何璐茜, 高方舟, 应光国, 何良英 (3222)

金盆水库沉积物铁锰释放规律 路林超, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 张晗, 王晨旭, 司凡 (3231)

城市湖泊沉积物微塑料污染特征 王璇, 牛司平, 宋小龙, 饶竹, 战楠 (3240)

西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析 刘晓丹, 黄毅, 王永花, 汪贝贝, 吴兵, 陆光华 (3249)

海水中的红霉素与营养盐对微藻的复合影响 王娜, 赵卫红, 苗辉 (3257)

梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律 温佳琦, 王皓冉, 陈永灿, 刘昭伟 (3266)

宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析 徐宇婕, 龚玥敏, 毕军鹏, 王洋, 程军蕊, 王侃 (3275)

分层型水库藻类垂直演替的水质与细菌种群调控 闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 贾竞宇, 刘凯文, 苗雨甜, 宗容容 (3285)

长距离供水系统中消毒副产物分布特征及二次加氯的影响 毕薇薇, 叶胜, 于健全, 杨玉龙, 陈晨, 李青松, 马晓雁 (3297)

供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型 刘俊萍, 陈镜吉, 宋亚丽, 杨玉龙, 李青松, 马晓雁 (3307)

碱和磁复合改性小麦秸秆生物炭对水体中镉的吸附特性及机制 崔志文, 任艳芳, 王伟, 张黎明, 张陆云, 王曦玥, 何俊瑜 (3315)

弱磁场强化氧化石墨烯负载纳米零价铁(GO-nFe⁰/WMF)对水中Cr(VI)的去除特性及机制 计盟, 鲍建国, 朱晓伟, 杜江坤, 郑汉 (3326)

一硫代砷在针铁矿上的吸附及影响因素 廖丹雪, 单慧娟, 张进贤, 彭三曦, 黄健, 陈辉, 赵超然, 曾春芽 (3337)

生物滤池快速启动ANAMMOX运行策略及菌群特征 王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (3345)

低碳源条件下供氧模式对活性污泥系统脱氮性能的影响 张欣瑞, 池玉蕾, 王倩, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3356)

羟胺对厌氧氨氧化污泥群落的影响 邢崇阳, 范禹辰, 陈璇, 郭劲松, 申渝, 晏楠, 方芳, 陈猷鹏 (3365)

低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性 高春娣, 张娜, 韩徽, 任浩, 李悦, 侯春艳, 王传德, 彭永臻 (3373)

我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化 董滨, 高君, 陈思思, 杨殿海, 戴晓虎 (3384)

城镇河流CO₂及CH₄排放与市政排水管网污水输入的关联影响 李磊, 陈浩, 朱奔, 王宇晖, 聂云汉, 赵昕, 贾其隆, 叶建峰 (3392)

控释尿素对黄河故道沙性潮土N₂O排放的影响 姜右锦, 袁俊吉, 丁维新, 刘阳, 张松林 (3402)

我国典型露地蔬菜生产中的温室气体排放 张芬, 程泰鸿, 陈新平, 王孝忠 (3410)

不同母质发育土壤Cd环境行为对水分管理模式的响应差异 黄敬, 李欣阳, 文沙, 蒋凯, 龙坚, 彭佩钦, 侯红波 (3418)

锰基改性生物炭对弱碱性Cd污染土壤团聚体结构以及Cd含量特征的影响 孙彤, 付宇童, 李可, 徐应明, 孙约兵 (3426)

钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响 曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 郭晓, 黄洋 (3434)

叶面喷施2,3-二巯基丁二酸对水稻幼苗镉吸收转运及抗氧化系统的影响 杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 黄益宗, 程六龙, 张长波 (3441)

《环境科学》征订启事 (3011) 《环境科学》征稿简则 (3084) 信息 (3174, 3185, 3391)

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

雷雨¹, 张小玲^{1*}, 康平¹, 王浩霖², 青泉³, 欧奕含¹, 卢宁生¹, 邓中慈¹

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225; 2. 中山大学大气科学学院, 广州 510275; 3. 四川省气象台高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072)

摘要: 川南自贡市大气颗粒物污染比较严重, 2015~2018年PM₁₀和PM_{2.5}平均浓度分别为(95.42±9.53) μg·m⁻³和(65.95±6.98) μg·m⁻³, 并有明显的下降趋势, 冬季PM₁₀和PM_{2.5}浓度远高于其它季节, 1月平均浓度最高, 分别为(138.08±52.29) μg·m⁻³和(108.50±18.05) μg·m⁻³, 夏季平均浓度最低。PM_{2.5}与PM₁₀的平均比值为69.12%, 冬季比值约为夏季的1.17倍, 空气污染以PM_{2.5}为主。采用拉格朗日混合单粒子轨迹模型(HYSPLIT)和全球资料同化系统的GDAS气象数据, 对自贡市细颗粒物(PM_{2.5})浓度和逐日72 h后向轨迹进行计算和聚类研究, 利用潜在源贡献分析法(PSCF)和浓度权重轨迹分析法(CWT), 探讨不同季节影响自贡市PM_{2.5}浓度的潜在源区以及不同源区的污染贡献。结果表明, 自贡市近地面四季多受东南风、偏西风和西北风控制, 高浓度PM_{2.5}多出现在0~2 m·s⁻¹的低风速区; 不同季节、不同输送路径对自贡PM_{2.5}污染影响的差异显著, 春季主要受到来自偏西和偏北方向短距离输送气流的影响, 夏季污染轨迹主要来自短距离输送的东南气流, 秋季主要受来自资阳, 经遂宁、重庆和内江的短距离输送气流的影响, 冬季除受到资阳、遂宁和内江等周边城市的影响外, 还受到来自西藏中部的远距离输送气流影响; 除夏季外, 自贡市潜在源区主要位于重庆西部与川南交界区域, 冬季的主要贡献区范围最广、贡献程度最大, 夏季潜在源区范围最小且贡献程度最弱。

关键词: 大气颗粒物; 后向轨迹聚类分析; 潜在源贡献(PSCF); 浓度权重轨迹(CWT); 自贡市
中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)07-3021-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.201911096

Analysis of Transport Pathways and Potential Sources of Atmospheric Particulate Matter in Zigong, in South of Sichuan Province

LEI Yu¹, ZHANG Xiao-ling^{1*}, KANG Ping¹, WANG Hao-lin², QING Quan³, OU Yi-han¹, LU Ning-sheng¹, DENG Zhong-ci¹

(1. Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 3. Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan Provincial Meteorological Observatory, Chengdu 610072, China)

Abstract: Atmospheric particulate matter pollution in Zigong City in southern Sichuan is quite severe. The average concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5} from 2015 to 2018 were (95.42±9.53) μg·m⁻³ and (65.95±6.98) μg·m⁻³, with an obvious trend of decline. The concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5} in winter were much higher than in other seasons, with the highest average concentrations being (138.08±52.29) μg·m⁻³ and (108.50±18.05) μg·m⁻³ in January, respectively, whereas in summer, the average concentrations were lowest. The average ratio of PM_{2.5} to PM₁₀ is 69.12%, and the ratio in winter is about 1.17 times that in summer; thus, PM_{2.5} is mainly responsible for the air pollution. To explore the potential sources of fine particulate matter (PM_{2.5}) in Zigong City and the pollution contributions of different sources in different seasons, the concentration of PM_{2.5} in Zigong and the daily trajectory after 72 h were calculated and clustered by the combined use of a variety of potential source analysis methods and data. These methods and data included the hybrid single particle lagrangian integrated trajectory (HYSPLIT) model, global data assimilation system (GDAS) meteorological data, potential source contribution analysis (PSCF), and concentration of weight trajectory analysis (CWT). The results showed that the area near Zigong is mostly controlled by southeasterly, westerly, and northwesterly winds in all seasons, and the high PM_{2.5} concentration is mostly located in the low-wind-speed zone of 0-2 m·s⁻¹. The influence of different seasons and transport routes on PM_{2.5} pollution in Zigong is significant. In spring, it is mainly affected by short-distance air flow from the west and north; in summer, the pollution mainly comes from the southeast air flow of short-distance transportation; in autumn, it is mainly affected by short-distance transportation air flow from Ziyang, Suining, Chongqing, and Neijiang; and in winter, it is not only affected by the surrounding cities such as Ziyang, Suining, and Neijiang but also by the long-distance transportation air flow from central Tibet. In general, the potential source area of particulate matter in Zigong City is mainly located in the border area between the west of Chongqing

收稿日期: 2019-11-12; 修订日期: 2020-02-07

基金项目: 四川省科技计划项目(2018SZDZX0023, 2018JY0011); 国家重点研发计划项目(2018YFC0214002, 2018YFC0214001); 国家自然科学基金重大项目(91644226)

作者简介: 雷雨(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向大气物理学与大气环境, E-mail: 993365892@qq.com

* 通信作者, E-mail: xlzhang@ium.cn

and the south of Sichuan. In winter, the main contribution area is at its widest, while in summer, the potential source area is smallest.

Key words: atmospheric particles; back trajectory cluster analysis; potential source contribution (PSCF); concentration weighted trajectory (CWT); Zigong City

随着工业化和城市化进程的不断加快,城市和区域面临严峻的大气污染问题^[1,2],中国政府于2013年9月发布了《大气污染防治行动计划》,旨在缓解全国范围内尤其是部分典型地区的细颗粒物(PM_{2.5})严重污染^[3].据报道,2013~2018年间,全国PM_{2.5}年平均浓度下降了30%~50%,同时2013~2018年二氧化硫(SO₂)和一氧化碳(CO)的观测结果表明,细颗粒物浓度的下降与严格控制煤炭燃烧排放有关^[4].虽然我国大气污染治理已经取得很大进步,但大气污染物排放量仍居世界前列,减排任务依然艰巨.污染物来源除了本地排放累积以外,还与跨区域输送有关.薛文博等^[5]的研究表明,京津冀、长三角、珠三角及川渝地区的PM_{2.5}浓度的区域输送贡献分别达到22%、37%、28%和14%.李颜君等^[6]的研究发现北京市全年西北输送气流占总轨迹的比例最高,达59.97%,且其输送距离最远、输送高度最高和移速最快;冬季潜在源区范围最大,夏季范围最小.Hao等^[7]的研究发现2009~2018年渤海湾西岸PM_{2.5}的主要来源为人为源,次要来源为自然源,且南风 and 西北风是天津PM_{2.5}浓度高的两个主要输送通道.段时光等^[8]的研究发现郑州市冬季超过60%的气流轨迹来自西北方向,PM_{2.5}的潜在源区主要是北部的京津冀传输通道城市.四川盆地因其复杂的地形和不利的天气条件,导致污染物不易扩散,是中国五大空气重污染区域之一^[9].川南城市群(自贡、泸州、宜宾和内江)是四川第二大经济区,肖丹华等^[10]的研究指出,川南城市群污染程度最高,川东北城市群污染最轻,成都平原城市群污染程度居中.目前对于四川盆地PM_{2.5}污染颗粒物输送路径

及潜在源区的研究成果很少,并大多数局限于省会城市成都地区^[11].Liao等^[12]利用HYSPLIT对成都市2013年冬季重污染期间PM_{2.5}的传输路径及潜在源区的分析结果表明,盆地内部的气流轨迹占比达77%以上,潜在源区主要位于盆地的东南部及西部边缘,而自贡市位于高潜在源区内.龙启超等^[13]对乐山市2016年12月至2017年2月的后向轨迹与PM_{2.5}浓度日均值分析发现,自贡市对乐山市PM_{2.5}的潜在源贡献在0.96以上.方选进等^[14]对近十年自贡市的大气颗粒物做来源解析,发现PM_{2.5}的主要成分是元素碳,机动车尾气是PM_{2.5}的首要污染源,煤炭燃烧是PM_{2.5}次要污染源.自贡位于川南城市群中北部,汽车保有量达20多万辆,能源消耗高达1 724万t标准煤,占整个川南城市群的34%,加上其地形特征(图1)和气候特征的影响,导致颗粒物浓度增加.有研究结果显示,自贡市PM_{2.5}、PM₁₀污染的年平均超标倍数分别从2014年1.11和0.54逐年下降到2018年的0.54和0.11,日平均超标天数分别从2016年的145 d和76 d下降到2018年的87 d和32 d^[15].这说明,自贡市政府近5年开展的节能减排、蓝天保卫战等一系列防治大气污染的措施取得了一定的效果.但自贡市颗粒物污染问题仍然比较突出,是川南城市群中大气污染状况最严重的城市^[16],自贡市第一产业以农业种植为主,秸秆燃烧问题依旧是秋冬季空气污染的重要来源,秸秆禁烧及其综合利用是近几年自贡市大气污染防治的重点部署工作之一(<http://www.zg.gov.cn/web/shbj>),因此本文选取自贡市作为典型城市,研究川南PM_{2.5}颗粒物的输送过程和影响.

本文利用后向轨迹聚类分析法,结合自贡市

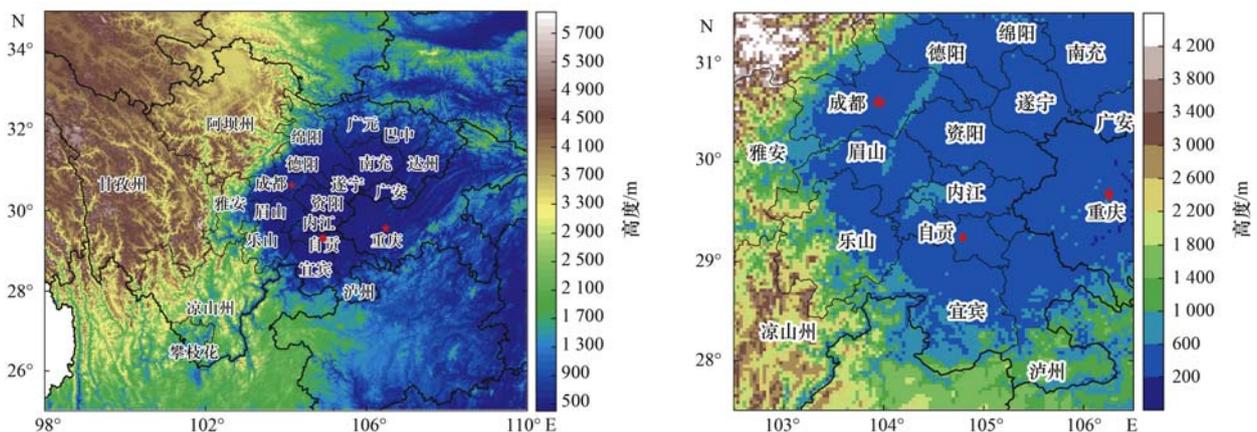


图1 川南城市群及自贡市地理位置

Fig. 1 Geographical location of south Sichuan urban agglomeration and Zigong City

2015 年 3 月至 2019 年 2 月 $PM_{2.5}$ 观测资料, 分析近 4 年各季节不同气流输送轨迹与自贡市 $PM_{2.5}$ 浓度的关系, 并统计分析不同轨迹及污染轨迹的空间特征和污染物特征, 同时利用潜在源贡献分析法 (PSCF) 和浓度权重轨迹分析法 (CWT) 探究影响自贡市 $PM_{2.5}$ 浓度的主要潜在源区, 为不同季节自贡市及川南城市群大气污染治理及区域联防联控提供科学的依据和参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究中 $PM_{2.5}$ 浓度逐时观测资料来源于全国空气质量环境监测平台, 时间范围为 2015 年 3 月至 2019 年 2 月; 地面气象资料来源于四川省气象台; 后向轨迹使用的气象数据为美国环境预报中心 (NCEP) 提供的 2015 ~ 2019 年全球资料同化系统数据 (GDAS) (<ftp://gus.arlhq.noaa.gov/pub/archives/>), 该数据的空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 时间分辨率为 6 h; 为了保证研究结果的准确性, 根据《环境空气质量标准 (GB 3095-2012)》^[17] 针对数据有效性的要求对原始数据进行质量控制, 剔除原始数据中小时 $PM_{2.5}$ 浓度 ≤ 0 的值和缺测值, 去除掉的缺测值和异常值仅占样本总量的 3.7%。本研究中季节划分采用气象意义上的定义: 3 ~ 5 月为春季、6 ~ 8 月为夏季、9 ~ 11 月为秋季和 12 月至次年 2 月为冬季。

1.2 后向轨迹及潜在源分析

本文利用后向轨迹模式 (HYSPLIT)^[18] 和基于 Wang 等^[19] 开发的 Meteoinfo 软件中 TrajStat 插件对自贡市进行后向轨迹聚类、潜在源贡献分析 (PSCF) 和浓度权重轨迹分析 (CWT)。将自贡市 ($104.77^\circ E$, $29.34^\circ N$) 作为模拟受点, 分别以每天的 00:00、06:00、12:00 和 18:00 (世界时) 作为模拟的起始时间, 模拟的后向时间长度为 72 h, 轨迹高度为 500 m, 采用欧氏距离算法^[20~21], 对到达受点的所有轨

迹进行聚类分组。

潜在源区的研究区域范围为 $92^\circ \sim 110^\circ E$, $24^\circ \sim 36^\circ N$, 将其进行网格化细分, 并以日均 $PM_{2.5}$ 浓度的二级限值 $75 \mu g \cdot m^{-3}$ 作为阈值区分污染轨迹和清洁轨迹。PSCF 值基于空间网格计算, 定义为所选研究区域内经过网格 (i, j) 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^[22,23]。为了降低由 n_{ij} 值波动带来的不确定性, 本次研究引入王郭臣等^[24] 定义的权重 W_{ij} 计算加权潜在源贡献分析 (WPSCF)。为进一步定量分析不同气流轨迹的污染程度, 采用 CWT 确定主要潜在源区^[25], 同样引入权重函数 W_{ij} 提高 CWT 值的准确性, 并计算加权重浓度轨迹分析 (WCWT)。PSCF、WPSCF、CWT 和 WCWT 的具体计算公式参见文献^[26~29]。

2 结果与分析

2.1 自贡市颗粒物浓度特征

图 2 为自贡市 2015 ~ 2018 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度和各季节平均浓度的变化, 根据全国空气质量环境监测平台发布的数据, 自贡市 2015 ~ 2018 年 $PM_{2.5}$ 浓度年均值分别为 72.85、73.07、67.69 和 56.63 $\mu g \cdot m^{-3}$, 呈现下降的趋势。2015 ~ 2018 年自贡市 $PM_{2.5}$ 浓度超标日数 (486 d) 明显大于成都市 (333 d), 平均浓度和超标日的平均浓度均高于成都市, 这与自贡市燃煤燃烧和生物质燃烧有关^[30]。自贡市春、夏、秋和冬季 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 的比值分别为 66.45%、65.58%、70.49% 和 76.56%, 说明自贡市大气细颗粒物浓度比较高, 颗粒物污染主要以 $PM_{2.5}$ 为主。因此, 本研究将主要研究细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 对自贡大气污染的影响及其潜在源区。

对 2015 ~ 2018 年自贡市 $PM_{2.5}$ 逐时浓度数据进行日平均后计算月平均变化特征分析。如图 3 所示, $PM_{2.5}$ 月均浓度整体呈现出“U 型”分布。冬季平均 $PM_{2.5}$ 浓度最高, 为 $(99.47 \pm 7.51) \mu g \cdot m^{-3}$, 其中 1 月平均浓度最高, 可达 $(108.50 \pm 18.05) \mu g \cdot m^{-3}$,

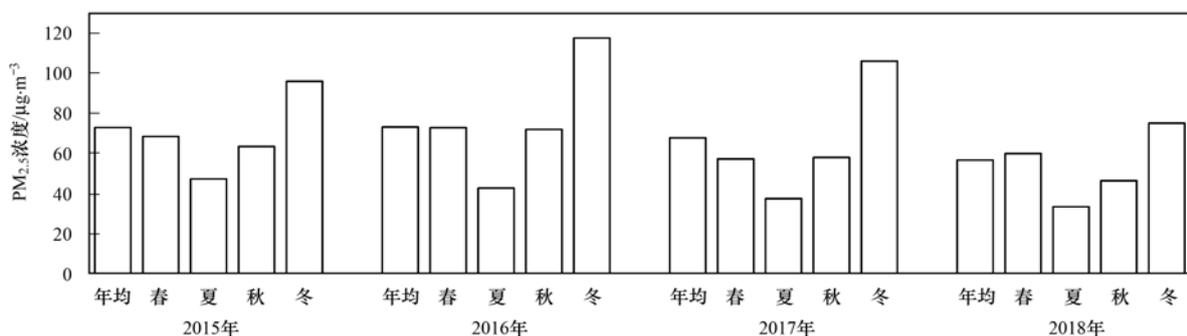


图 2 2015 ~ 2018 年自贡市 $PM_{2.5}$ 浓度的年均和季节变化

Fig. 2 Annual average and seasonal changes in $PM_{2.5}$ concentration in Zigong City from 2015 to 2018

其次是春季 $[(64.67 \pm 6.87) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ 和秋季 $[(59.95 \pm 16.48) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$, 春秋浓度约为冬季的 0.65 倍和 0.60 倍, 夏季平均浓度为 $(39.82 \pm 2.04) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 最低值在 7 月, 仅为 $(37.22 \pm 6.00) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

按照我国《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)(HJ 633-2012)》^[31] 定义的 24 h $\text{PM}_{2.5}$ 污染浓度等级标准, 统计得出 2015 ~ 2018 年自贡市 $\text{PM}_{2.5}$ 每月各污染等级天数及其频率, 结果如图 4 所示. 自贡市 2015 ~ 2018 年 4 年内 $\text{PM}_{2.5}$ 等级达优的频率最高出现在 7 月 (48%), 7 ~ 9 月优良天数占比高达 90% 以上, 并且 6、7 月没有出现中度以上等级的污染天气. 冬季空气质量较差, 1、2 和 12 月轻度污染等级以上的天数频率均超过 50%, 达到中度污染等级以上天数频率均超过 30%, 其中 1 月和 2 月更加严重, 出现严重污染的占比分别为 0.81% 和 0.88%. 受沙尘天气的影响, 春季 5 月出现了 1 次严重污染天气, 可知自贡 $\text{PM}_{2.5}$ 空气质量等级的月/季节变化主要受气象条件(降水、风速混合层高度等大气扩散能力和湿清除作用^[32, 33])以及人类活动排

放的影响.

从日均变化来看(图 3), $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的日变化呈现“双峰双谷”型, 峰值分别在 11:00 和 23:00 左右, 谷值分别在 07:00 和 17:00 左右, 夜间高于昼间, 傍晚低于清晨. 主要是由于早上 07:00 出现上班高峰期, 汽车尾气排放增多, 加上日出以后地面气温逐渐上升, 大气光化学反应增强, 人为排放源的增加和大气混合层高度未充分发展, 使得颗粒物浓度增加, 在 11:00 左右到达第一个峰值; 午后, 日气温到达最高, 地面温度升高, 气流上升, 有利于颗粒物扩散, 导致近地面颗粒物浓度逐渐降低, 下午 17:00 降至最低, 出现第二个波谷; 17:00 开始, 迎来下班高峰期, 地面气温开始下降, 产生逆温层, 不利于颗粒物扩散, 并且由于夜间混合层高度迅速降低造成污染物在低层堆积, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在夜间 23:00 出现第二个峰值; 午夜后, 人类活动明显减少, 颗粒物浓度逐渐降低至早上 07:00 到达波谷. 因此人为排放的日变化特征与混合层高度日变化特征叠加在一起形成的日周期性循环现象使 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度曲线呈“锯齿状”变化^[34, 35].

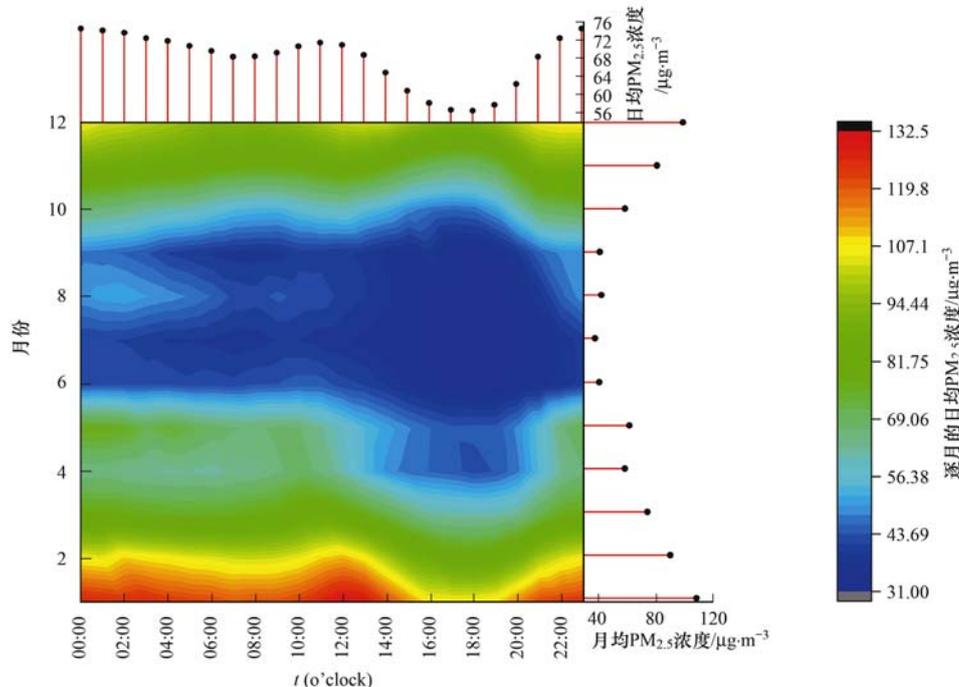


图 3 2015 ~ 2018 年自贡市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的月均和日均变化特征

Fig. 3 Monthly and daily variation characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ concentration in Zigong City from 2015 to 2018

利用 2015 ~ 2018 年自贡市气象站逐时气象资料分析风频和 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征的关系(如图 5), 不同风向风速下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的分布有很大的季节差异. 自贡市春季盛行风向为东南风(占比为 9.9%), 但 $\text{PM}_{2.5}$ 高值区大多集中在东东北风向风速为 $0 \sim 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的区间; 夏季盛行风向为西风(11.6%)且夏

季 $\text{PM}_{2.5}$ 污染物浓度普遍较低; 秋季盛行风为西风(9.8%), 而秋季东北风和东南风易造成 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高值; 冬季盛行风为东东南风(10.1%), $\text{PM}_{2.5}$ 高值区主要位于 $0 \sim 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的低风速区间. 综上所述, 自贡市近地面四季多受东南风、偏西风和西北风控制, 污染物气团随着气流运动方向到达自贡, 颗粒物

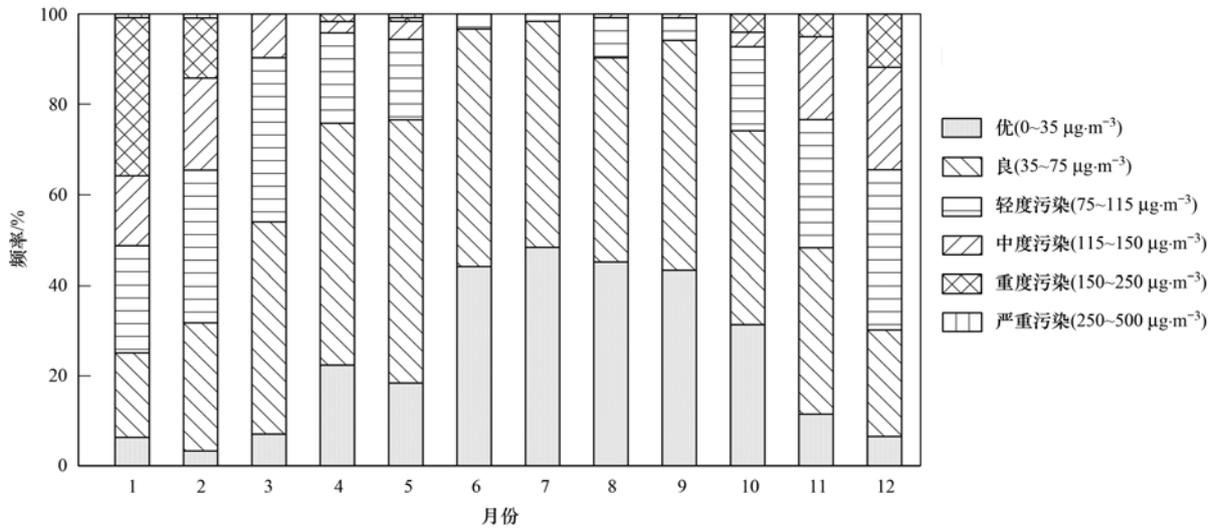


图 4 2015 ~ 2018 年自贡市各月 PM_{2.5} 浓度不同污染等级频率分布

Fig. 4 Distribution of PM_{2.5} pollution levels in Zigong City from 2015 to 2018

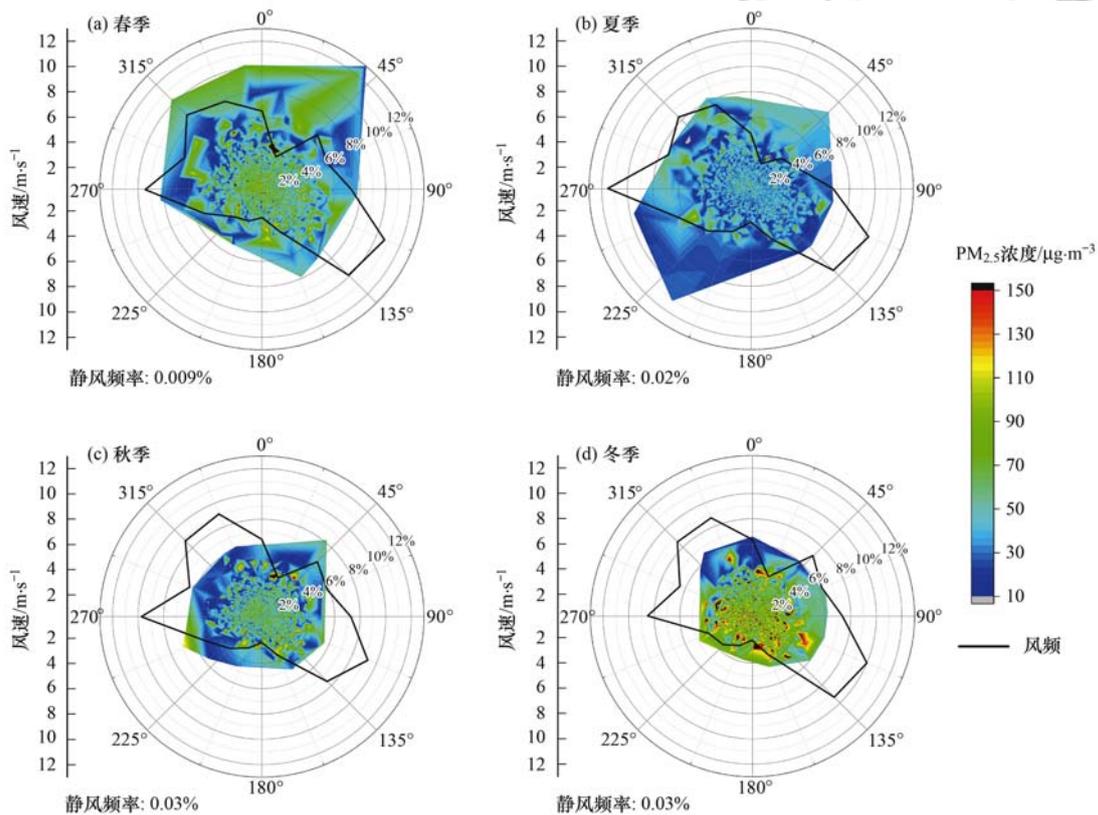


图 5 自贡市 2015 年 3 月至 2019 年 2 月四季 PM_{2.5} 浓度风玫瑰图

Fig. 5 Wind rose chart of PM_{2.5} concentration in Zigong City in the four seasons from March 2015 to February 2019

易在山前积聚、不易扩散, 导致市区污染物浓度升高, 形成污染天气。

2.2 后向轨迹聚类及 PM_{2.5} 浓度特征分析

对 2015 年 3 月至 2019 年 2 月逐日的到达自贡市气流 72 h 后向轨迹计算, 并进行聚类分析. 采用总空间方差 (TSV) 方法选取最佳聚类数目^[36], 将 2015 ~ 2018 年自贡市春、夏、秋和冬季的后向轨迹聚类数分别为 5、5、3 和 2 (图 6). 进一步研究各类

气流轨迹的污染物特征和空间特征, 即各类轨迹对应的 PM_{2.5} 浓度平均值、主要途经区域、出现概率以及污染轨迹特征, 如表 1 所示. 根据聚类结果, 对各季节各类轨迹的 PM_{2.5} 浓度做出对应的箱线图 (图 7), 上下两根短线分别代表各类轨迹中污染轨迹的最高值与最低值, 矩形代表主要浓度范围 (上下四分位的轨迹浓度), 矩形中的短横线代表 PM_{2.5} 浓度的平均值。

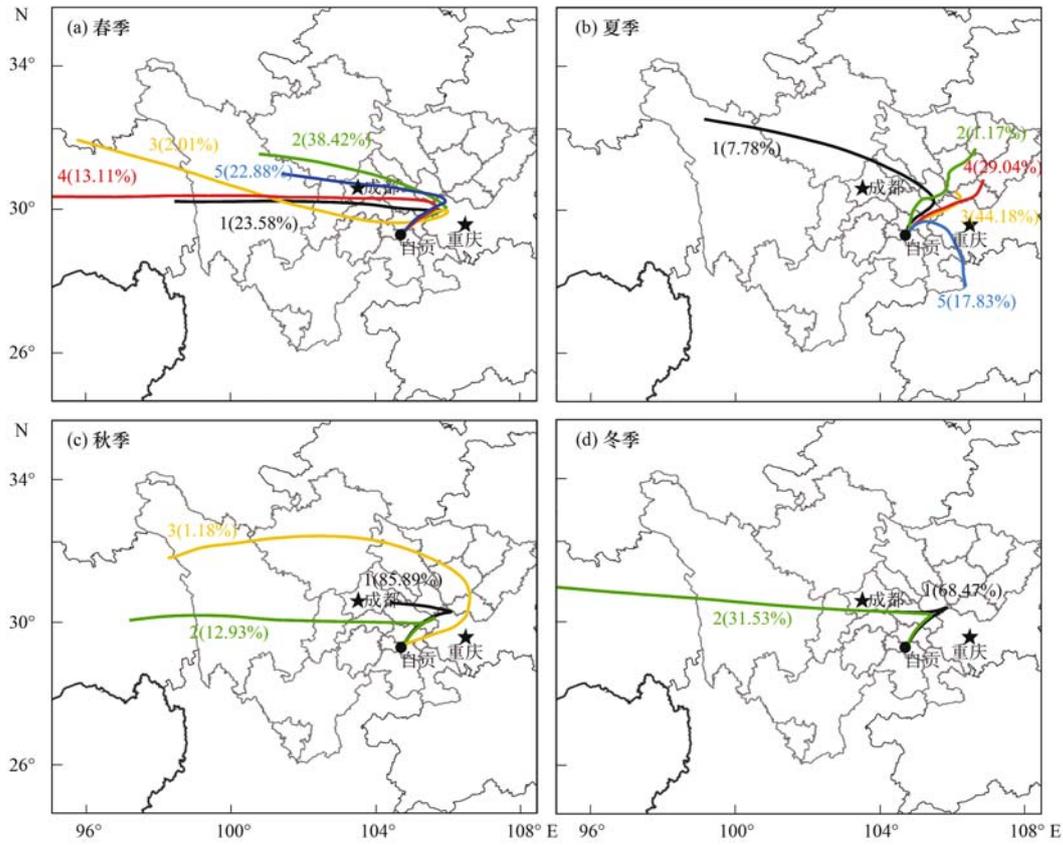


图 6 2015 年 3 月至 2019 年 2 月自贡市四季逐日 72 h 后向轨迹聚类分析

Fig. 6 Clustering analysis of 72 h backward track in Zigong City in the four seasons from March 2015 to February 2019

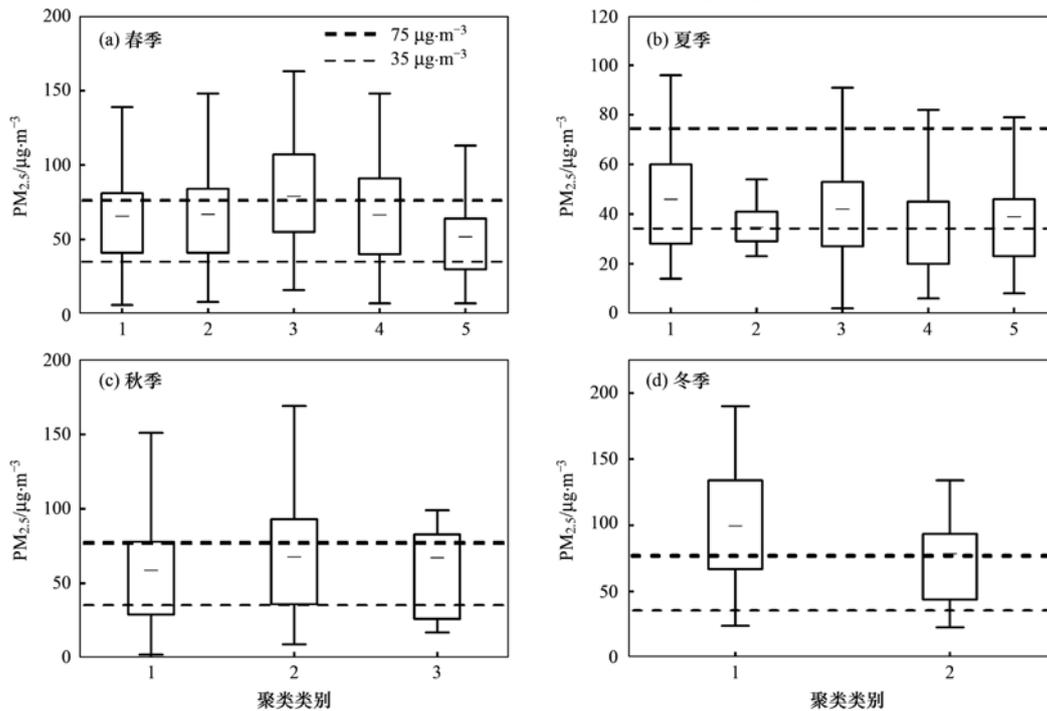


图 7 2015 年 3 月至 2019 年 2 月自贡市四季各类轨迹 $PM_{2.5}$ 平均浓度

Fig. 7 Average $PM_{2.5}$ concentration of all tracks in Zigong City in the four seasons from March 2015 to February 2019

2015 ~ 2018 年四季后向聚类轨迹及其所对应的 $PM_{2.5}$ 浓度特征存在明显的季节性差异. 春季、秋季、冬季到达自贡的气流轨迹主要来自偏西和偏北

方向,呈“半 Z 型”,且春、冬两季输送距离最远、移速最快,这与东亚冬季风向南输送有关^[37].

结合图 6 和表 1 分析可知,春季来自四川甘孜

表 1 2015 年 3 月至 2019 年 2 月四季各类轨迹路径及出现概率和对应的 $PM_{2.5}$ 浓度统计分析结果
Table 1 Statistical analysis results of all kinds of trajectory paths, occurrence probability and $PM_{2.5}$ concentration in all tracks in the four seasons from March 2015 to February 2019

季节	类型	途经区域	所有轨迹		污染轨迹	
			出现概率 /%	$\rho(PM_{2.5})$ / $\mu g \cdot m^{-3}$	季节占比 ¹⁾ /%	$\rho(PM_{2.5})$ / $\mu g \cdot m^{-3}$
春	1	西藏东部、甘孜、眉山、资阳	23.58	65.69 ± 38.79	23.95	105.23 ± 40.56
	2	甘孜、阿坝、成都、遂宁、内江	38.42	66.94 ± 38.65	43.72	107.34 ± 40.27
	3	青海南部、甘孜、雅安、乐山	2.01	79.24 ± 40.03	3.26	113.57 ± 42.75
	4	西藏中部、甘孜、雅安、成都、资阳	13.11	66.60 ± 38.86	16.74	101.17 ± 40.34
	5	甘孜、成都、遂宁、内江	22.88	51.86 ± 38.79	12.33	112.30 ± 41.37
夏	1	甘孜、阿坝、德阳、遂宁、内江	7.78	46.01 ± 21.77	12.20	91.70 ± 15.96
	2	南充、遂宁、资阳、内江	1.17	35.24 ± 21.53		
	3	广安、重庆、资阳、内江	44.18	42.00 ± 21.32	42.68	97.46 ± 22.25
	4	达州、遂宁、重庆、内江	29.04	34.54 ± 21.32	19.51	91.63 ± 22.79
	5	贵州北部、重庆、内江	17.83	39.03 ± 21.19	26.51	96.29 ± 22.22
秋	1	资阳、遂宁、重庆、内江	85.89	58.71 ± 40.10	82.81	114.84 ± 31.59
	2	西藏西部、甘孜、雅安、眉山、内江	12.93	67.70 ± 40.48	15.89	111.85 ± 32.24
	3	甘孜、阿坝、绵阳、南充、重庆	1.18	67.12 ± 42.58	1.30	135.60 ± 33.20
冬	1	资阳、遂宁、内江	68.47	99.25 ± 41.44	59.74	119.20 ± 33.66
	2	西藏中部、甘孜、雅安、资阳、内江	31.53	100.08 ± 38.83	40.26	103.23 ± 31.02

1) 黑体字为主要污染轨迹(同时期占比 > 20%)

经阿坝、成都、遂宁、内江到达自贡的轨迹 2 占比最大,为 38.42%,轨迹 3 的平均浓度和污染轨迹浓度最高,分别为 $(79.24 \pm 40.03) \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $(113.57 \pm 42.75) \mu g \cdot m^{-3}$,但其占比最少,仅 2.01%。与其他季节不同,夏季大气颗粒物来向主要为偏东方向,这可能与夏季盛行东南风、气象条件有利于大气颗粒物向自贡扩散、沉降有关,其中来自广安,经重庆、资阳、内江到达自贡的短距离东北输送轨迹 3 占比最高,可达 44.18%,污染轨迹浓度为 $(97.46 \pm 22.25) \mu g \cdot m^{-3}$,平均 $PM_{2.5}$ 浓度最高的轨迹是来自甘孜,经过阿坝、德阳、遂宁、内江到达自贡的轨迹 1,浓度可达 $(46.01 \pm 21.77) \mu g \cdot m^{-3}$ 。秋季来自资阳,经遂宁、重庆、内江的偏北路径轨迹 1 为主要聚类,占比超过一半,达到 85.89%,且污染轨迹占比为 82.81%; 轨迹浓度最高的是来自西藏西部,经甘孜、雅安、眉山、内江到达自贡的轨迹 2,达到 $(67.70 \pm 40.48) \mu g \cdot m^{-3}$; 而污染轨迹浓度最大的为轨迹 3。冬季来自资阳,经遂宁、内江到达自贡的轨迹 1 占比最大,为 68.47%,轨迹 2 的平均浓度最高,达到 $(100.08 \pm 38.83) \mu g \cdot m^{-3}$ 。

2.3 潜在源区分析

图 8 为自贡市四季污染轨迹网格的 WPSCF 值计算结果,自贡市潜在源区的四季变化存在显著差异。当 WPSCF 值大于 0.6 时,表明该区域对自贡市颗粒物污染的贡献较大,定义为最主要的潜在源区。由于夏季 $PM_{2.5}$ 浓度普遍较低加上 $PM_{2.5}$ 浓度经过 $75 \mu g \cdot m^{-3}$ 阈值筛选后,并无污染气流的存在,因此

定义夏季的污染阈值为 $35 \mu g \cdot m^{-3}$ 。

春季, $PM_{2.5}$ 的 WPSCF 高值区主要分布在重庆西部与川南交界地区,其次,在自贡以南的宜宾市中部分布着零星高值区。夏季,经过 $35 \mu g \cdot m^{-3}$ 污染阈值筛选后, WPSCF 的高值区主要出现在重庆西部与川南交界地区、自贡市周边城市也零散分布着高值区。秋季出现 0.6 以上的 WPSCF 值,较春季略微增大,主要集中在重庆西部与川南交界区域,在自贡西北部的广安西部、自贡也零散分布着高值区,这些区域是自贡市 $PM_{2.5}$ 的主要潜在源区。冬季, WPSCF 大于 0.6 的区域明显扩大,并出现 WPSCF 值为 0.8 的高值区。自贡市 $PM_{2.5}$ 的潜在区域主要集中在重庆西部与川南交界区域、资阳至内江一带地区以及绵阳、乐山和宜宾等零星地区也对自贡市 $PM_{2.5}$ 有着显著的影响。

2.4 浓度权重轨迹分析

图 9 为 2015 ~ 2018 年自贡市四季 $PM_{2.5}$ 浓度权重轨迹 (CWT), 相对于 WPSCF, WCWT 可以更加直观地看到不同潜在源区的浓度贡献程度。其中 WCWT 值越大, 表示该网格区域对受点自贡市 $PM_{2.5}$ 浓度贡献程度越大, 并将 WCWT 大于 $75 \mu g \cdot m^{-3}$ 的潜在源区定义为主要贡献区。结果表明, 冬季主要贡献源区范围最大、贡献程度最显著且部分区域 WCWT 值明显增大, 超过 $100 \mu g \cdot m^{-3}$, 其次是秋季贡献较大, 春季再次, 夏季 WCWT 值均在 $75 \mu g \cdot m^{-3}$ 以下, 贡献最小。

春季, WCWT 值超过 $75 \mu g \cdot m^{-3}$ 的区域主要在

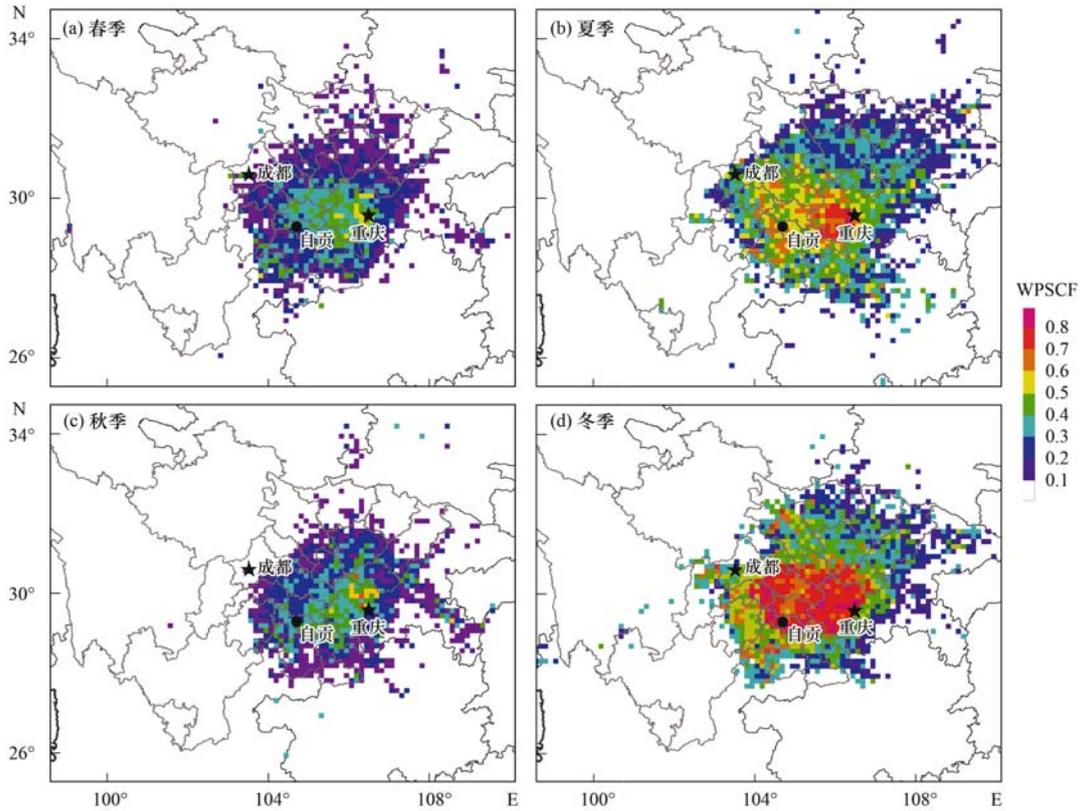


图 8 2015 年 3 月至 2019 年 2 月自贡市四季 WPSCF 分布

Fig. 8 Distribution of WPSCF in Zigong City in the four seasons from March 2015 to February 2019

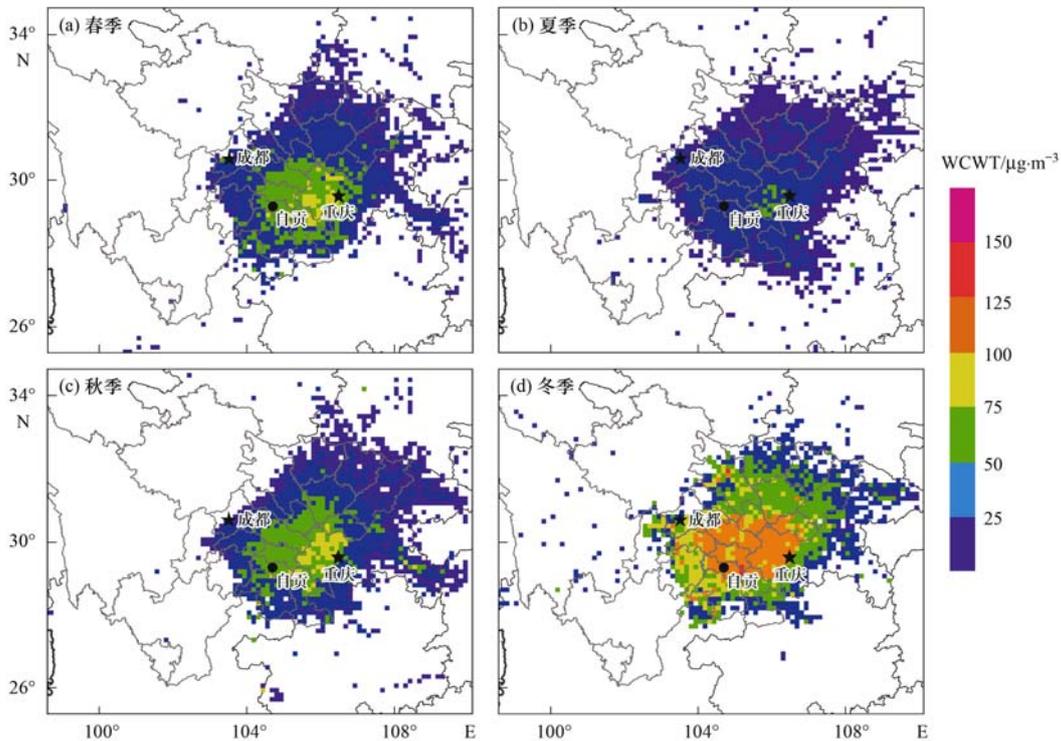


图 9 2015 年 3 月至 2019 年 2 月自贡市四季 WCWT 分布

Fig. 9 Distribution of WCWT in Zigong City in the four seasons from March 2015 to February 2019

重庆西部与川南交界地区,其次,在泸州北部、内江东南部和自贡本地分布着零星高值区.夏季,WCWT 数值总体较小,其 WCWT 值超过 $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的区域

零散分布在重庆西部.秋季,主要贡献区域的范围沿东北-西南走向朝西北方向扩大,在重庆西部与川南地区交界的区域、泸州北部地区对自贡日均贡献超

过 $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。冬季, WCWT 值超过 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的区域主要集中在重庆西部与川南交界区域、资阳至内江一带。

3 结论

(1) 自贡市 2015~2018 年 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度年均值呈现降低的趋势, 分别由 $106.83 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降至 $81.37 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $72.85 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降至 $56.63 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 各季节 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 的比值均大于 65%, 颗粒物污染以 $\text{PM}_{2.5}$ 为主。受气象扩散清除条件和人为污染排放影响, $\text{PM}_{2.5}$ 月均浓度整体呈现出“U 型”分布, 冬高夏低, 冬季浓度是夏季的 2.50 倍; 日变化呈现“双峰双谷”型, 这主要与自贡市人为排放的日变化特征与混合层高度日变化特征有关; 空气质量优良频率呈现“倒 U 型”, 高浓度 $\text{PM}_{2.5}$ 多位于 $0\sim 2 \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的低风速区。

(2) 2015~2018 年自贡市后向聚类污染轨迹 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季, 除夏季外, 春、秋和冬季多为偏西和偏北气流, 且春、冬两季输送距离最长、移动速度最快。来自甘孜、阿坝和成都等地区的气流是造成自贡春季 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的主要轨迹; 夏季受东南方向气流的影响, 来自广安、重庆、资阳和内江等地区的短距离气流为主要路径; 秋季主要受来自内江、重庆等地区轨迹的影响; 冬季主要受来自北部资阳、遂宁和内江气流的影响。

(3) 2015~2018 年自贡 $\text{PM}_{2.5}$ 污染主要的潜在源区及主要贡献区域结果表明, 冬季范围最大、贡献最显著, 秋季较春季潜在源区范围增大。自贡市四季的 WPSCF 和 WCWT 高值区主要位于重庆西部与川南交界地区, 冬季的高值区还出现在资阳至内江一带, 即自贡市以及成都平原南部和中东部、重庆西部地区是影响自贡市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的主要源区。

(4) 由于到达自贡市的气流轨迹和潜在源区特征存在季节性差异, 对自贡及川南地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的区域防控应采取不同的措施。秋季, 自贡的颗粒物污染防控要注意重庆西部、泸州北部以及内江南部等周边地区的短距离污染物的输送; 除考虑短距离输送外, 春冬两季还需要防控来自西藏中部远距离输送的影响; 夏季的防控重点应是短距离输送的东南气流。

参考文献:

- [1] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, *et al.* High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China[J]. *Nature*, 2014, **514**(7521): 218-222.
- [2] Che H Z, Xia X G, Zhu J, *et al.* Column aerosol optical properties and aerosol radiative forcing during a serious haze-fog month over North China Plain in 2013 based on ground-based sunphotometer measurements [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(4): 2125-2138.
- [3] Cheng J, Su J P, Cui T, *et al.* Dominant role of emission reduction in $\text{PM}_{2.5}$ air quality improvement in Beijing during 2013-2017: a model-based decomposition analysis [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(6): 6125-6146.
- [4] Zhai S X, Jacob D J, Wang X, *et al.* Fine particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$) trends in China, 2013-2018: separating contributions from anthropogenic emissions and meteorology [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(16): 11031-11041.
- [5] 薛文博, 付飞, 王金南, 等. 中国 $\text{PM}_{2.5}$ 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.
- [6] 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.
- [7] Hao T Y, Cai Z Y, Chen S C, *et al.* Transport pathways and potential source regions of $\text{PM}_{2.5}$ on the west coast of Bohai Bay during 2009-2018 [J]. *Atmosphere*, 2019, **10**(6): 345.
- [8] 段时光, 姜楠, 杨留明, 等. 郑州市冬季大气 $\text{PM}_{2.5}$ 传输路径和潜在源分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 86-93.
- [9] An Z S, Huang R J, Zhang R Y, *et al.* Severe haze in northern China: a synergy of anthropogenic emissions and atmospheric processes [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(18): 8657-8666.
- [10] 肖丹华, 王式功, 张莹, 等. 四川盆地城市群 6 种大气污染物的时空分布[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2018, **54**(5): 662-669.
- [11] 郭倩, 汪嘉杨, 周子航, 等. 成都市一次典型空气重污染过程特征及成因分析[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(2): 629-639.
- [12] Liao T T, Wang S, Ai J, *et al.* Heavy pollution episodes, transport pathways and potential sources of $\text{PM}_{2.5}$ during the winter of 2013 in Chengdu (China) [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **584-585**: 1056-1065.
- [13] 龙启超, 陈军辉, 廖婷婷. 乐山市 2016 年冬季颗粒物重污染过程与输送路径及潜在源区 [J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(2): 263-272.
- [14] 方选进, 何军. 自贡市大气颗粒物污染特征及来源解析 [J]. *环境科学与管理*, 2017, **42**(2): 157-160.
- [15] Fang X J, He J. Pollution characteristics and source of atmospheric particles in Zigong City [J]. *Environmental Science and Management*, 2017, **42**(2): 157-160.

- [15] 范正轩, 何军, 刘桂丹, 等. 自贡市环境空气污染动态监测[J]. 环境卫生学杂志, 2019, **9**(5): 477-481.
Fan Z X, He J, Liu G D, *et al.* Dynamic monitoring and evaluation of environmental air pollution in Zigong[J]. Journal of Environmental Hygiene, 2019, **9**(5): 477-481.
- [16] 肖丹华. 四川盆地城市群6种大气污染物质量浓度的时空分布及污染气象参数研究[D]. 成都: 成都信息工程大学, 2018.
- [17] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [18] Draxler R R, Hess G D. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories, dispersion, and deposition[J]. Australian Meteorological Magazine, 1998, **47**(4): 295-308.
- [19] 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.
- [20] Dorling S R, Davies T D, Pierce C E. Cluster analysis: a technique for estimating the synoptic meteorological controls on air and precipitation chemistry—Method and applications[J]. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 1992, **26**(14): 2575-2581.
- [21] Stohl A. Trajectory statistics-A new method to establish source-receptor relationships of air pollutants and its application to the transport of particulate sulfate in Europe[J]. Atmospheric Environment, 1996, **30**(4): 579-587.
- [22] 符传博, 丹利, 唐家翔, 等. 基于轨迹模式分析海口市大气污染的输送及潜在源区[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(1): 36-42.
Fu C B, Dan L, Tang J X, *et al.* Analysis of air polluted transportation and potential source in Haikou City based on trajectory model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(1): 36-42.
- [23] 任浦慧, 解静芳, 姜洪进, 等. 太原市大气PM_{2.5}季节传输路径和潜在源分析[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(8): 3144-3151.
Ren P H, Xie J F, Jiang H J, *et al.* Transport pathways and potential sources of PM_{2.5} in different seasons in Taiyuan City[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(8): 3144-3151.
- [24] 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.
- [25] Hopke P K, Gao N, Cheng M D. Combining chemical and meteorological data to infer source areas of airborne pollutants[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 1993, **19**(2): 187-199.
- [26] Zeng Y, Hopke P K. A study of the sources of acid precipitation in Ontario, Canada[J]. Atmospheric Environment (1967), 1989, **23**(7): 1499-1509.
- [27] 刘童, 王晓军, 陈倩, 等. 烟台市环境受体PM_{2.5}四季污染特征与来源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1082-1090.
Liu T, Wang X J, Chen Q, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of ambient PM_{2.5} during four seasons in Yantai City[J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1082-1090.
- [28] Seibert P, Kromp-Kolb H, Balterpenger U, *et al.* Trajectory analysis of aerosol measurements at high alpine sites[A]. In: Borrel P M, Borrell P, Cvitas T, *et al.* (Eds.). Transport and Transformation of Pollutants in the Troposphere[M]. Den Haag: Academic Publishing, 1994. 689-693.
- [29] 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.
- [30] 饶芝菡, 罗彬, 张巍. 利用单颗粒气溶胶质谱(SPAMS)研究四川盆地城市的细颗粒物来源[J]. 四川环境, 2018, **37**(6): 55-64.
Rao Z H, Luo B, Zhang W. Source apportionment of particulate matter in cities of Sichuan Basin by using single particle aerosol mass Spectrometer[J]. Sichuan Environment, 2018, **37**(6): 55-64.
- [31] HJ 633-2012, 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)[S].
- [32] 周景博, 王鑫, 杜婉君, 等. 北京市空气污染指数及其影响因素分析[J]. 中国环境监测, 2015, **31**(2): 53-56.
Zhou J B, Wang X, Du W J, *et al.* Analysis of air pollution index and its influence factors in Beijing[J]. Environmental Monitoring in China, 2015, **31**(2): 53-56.
- [33] 徐冉, 张恒德, 杨孝文, 等. 北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3405-3414.
Xu R, Zhang H D, Yang X W, *et al.* Concentration characteristics of PM_{2.5} and the causes of heavy air pollution events in Beijing during autumn and winter[J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3405-3414.
- [34] Kang H Q, Zhu B, Su J F, *et al.* Analysis of a long-lasting haze episode in Nanjing, China[J]. Atmospheric Research, 2013, **120-121**: 78-87.
- [35] 刘忠鹏, 何水晶. 自贡市冬季城区环境空气细颗粒物特征分析[A]. 见: 第十届环境与发展论坛论文集[C]. 北京: 中华环保联合会, 联合国环境规划署, 2014. 407-411.
- [36] 周沙, 刘宁, 刘朝顺. 2013—2015年上海市霾污染事件潜在源区贡献分析[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(5): 1835-1842.
Zhou S, Liu N, Liu C S. Identification for potential sources for haze events in Shanghai from 2013 to 2015[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(5): 1835-1842.
- [37] Jeong J I, Park R J. Winter monsoon variability and its impact on aerosol concentrations in East Asia[J]. Environmental Pollution, 2017, **221**: 285-292.

CONTENTS

Contribution of Emissions from the Iron and Steel Industry to Air Quality in China	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (2981)
Interannual Characteristics of Fine Particulate Matter in North China and Its Relationship with Land Use and Land Cover Change	YANG Wei, JIANG Xiao-li (2995)
Evaluation of the Reduction in PM _{2.5} Concentration During the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou	WANG Shen-bo, LOU Ya-min, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (3004)
Pollution Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Chengdu in Summer and Winter	FENG Yan-peng, ZHANG Jun-ke, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (3012)
Analysis of Transport Pathways and Potential Sources of Atmospheric Particulate Matter in Zigong, in South of Sichuan Province	LEI Yu, ZHANG Xiao-ling, KANG Ping, <i>et al.</i> (3021)
Source Composition Spectrum of Volatile Organic Compounds in Typical Industries in Sichuan	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3031)
Source Profiles of Industrial Emission-Based VOCs in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, ZHOU Xiao-ling, <i>et al.</i> (3042)
Emission Characteristics and Risk Assessment of Volatile Organic Compounds from Typical Factories in Zhengzhou	QI Yi-jin, NI Jing-wei, ZHAO Dong-xu, <i>et al.</i> (3056)
Characteristics, Source Apportionment, and Environmental Impact of Volatile Organic Compounds in Summer in Yangquan	NIU Yue-yuan, LIU Zhuo-cheng, LI Ru-mei, <i>et al.</i> (3066)
Characteristics and Reactivity of VOCs in Hangzhou During a Typical Photochemical Pollution Episode	JING Sheng-ao, YE Xu-hong, GAO Ya-qin, <i>et al.</i> (3076)
Pollution Characteristics and Sensitivity of Surface Ozone in a Typical Heavy-Industry City of the North China Plain in Summer	OU Sheng-ju, WEI Wei, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (3085)
Source Apportionment of Atmospheric Ammonia; Sensitivity Test Based on Stable Isotope Analysis in R Language	GU Meng-na, PAN Yue-peng, HE Yue-xin, <i>et al.</i> (3095)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Mercury Speciation in Suzhou	LU Ren-jie, WU Ye-zheng, ZHANG Xiao-jie, <i>et al.</i> (3102)
Emission Characteristics of Light-Duty Gasoline Vehicle Exhaust Based on Acceleration Simulation Mode	XIE Yan, LIAO Song-di, ZHU Man-ni, <i>et al.</i> (3112)
Comparative Analysis of NO _x Emission Characteristics of Non-Ultra-Low- and Ultra-Low-Emission Coal-Fired Power Units During the Start-Up Process	LI Hui, ZHU Fa-hua, SUN Xue-li, <i>et al.</i> (3121)
Source Identification and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particles of Urban Road Dust from Xingtai City	SONG Yi, LU Xin-wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (3130)
Impacts of Leaf Surface Micromorphology Variation on the Ability to Capture Particulate Matter	WEI Wen-jun, WANG Bing, NIU Xiang (3136)
Analysis of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Characteristics and Vapor Sources of Precipitation in the Guanzhong Plain	ZHAO Ming-hua, LU Yan-wei, Rachana Heng, <i>et al.</i> (3148)
Analysis of Nitrate Sources in Different Waters of a Karst Basin	TIAN Yong-zhu, HAN Zhi-wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (3157)
Analysis of Nitrogen Pollution and Its Pollution Sources in the Muli River Basin	QI Ran, XU Fei-fei, YANG Fan, <i>et al.</i> (3165)
Temporal and Spatial Variation Patterns of the Environmental Elements in the Sediments of the Liaohu Estuary and the Related Influencing Factors	QI Yue, SUN Yong-guang, MA Gong-bo, <i>et al.</i> (3175)
Transport Characteristics of Phosphorus Sources at the Multi-scale Watershed and the Associated Ecological Effects on Poyang Lake	WANG Shuo-yue, GAO Yang, LU Yao, <i>et al.</i> (3186)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the River of a Typical Bay Watershed	WANG Lei, WANG Wen-dong, LIU Dong, <i>et al.</i> (3194)
Concentrations of Typical Perfluoroalkyl Acids and Contributions of Their Precursors in the Water of the Le'an River in China	ZHANG Hui, WANG Shi-liang, YU Yang (3204)
Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Water and Sediments of Haizhou Bay, Lianyungang	LI Zheng, GAO Chun-mei, YANG Jin-long, <i>et al.</i> (3212)
Profiles and Risk of Antibiotic Resistance Genes in Domestic Wells in the Maozhou River Basin	WU Dai-ling, ZOU Hai-yan, HE Lu-xi, <i>et al.</i> (3222)
Release Mechanisms of Iron and Manganese from Sediments in Jinpen Reservoir	LU Lin-chao, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (3231)
Characterization of Microplastic Pollution of Sediments from Urban Lakes	WANG Xuan, NIU Si-ping, SONG Xiao-long, <i>et al.</i> (3240)
Structural Characteristics of Microbial Communities in the Sediments of the Niyang River in Tibet	LIU Xiao-dan, HUANG Yi, WANG Yong-hua, <i>et al.</i> (3249)
Combined Effects of Erythromycin and Nutrients on Microalgae in Seawater	WANG Na, ZHAO Wei-hong, MIAO Hui (3257)
Longitudinal Distribution of Benthic Macroinvertebrates Affected by a Hydropower Plant Cascade in the Mudan River	WEN Jia-qi, WANG Hao-ran, CHEN Yong-can, <i>et al.</i> (3266)
Analysis of Rainwater Runoff Pollution Characteristics of Various Typical Underlying Surfaces in Ningbo	XU Yu-jie, GONG Yue-min, BI Jun-peng, <i>et al.</i> (3275)
Water Quality and Bacterial Population Driving Mechanism of Algae Vertical Succession in Stratified Reservoir	YAN Miao-miao, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3285)
Distribution Characteristics of Disinfection By-Products and the Effects of Booster Chlorination in Long-Distance Water Supply Systems	BI Wei-wei, YE Sheng, YU Jian-quan, <i>et al.</i> (3297)
Occurrence and Prediction Model of Disinfection By-Products in Tap Water	LIU Jun-ping, CHEN Jing-ji, SONG Ya-li, <i>et al.</i> (3307)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cadmium in Water by Alkali and Magnetic Composite Modified Wheat Straw Biochar	CUI Zhi-wen, REN Yan-fang, WANG Wei, <i>et al.</i> (3315)
Enhanced Chromate (VI) Removal Characteristics and Mechanism Using Graphene Oxide Immobilized Nanoscale Zero-Valent Iron Coupled with a Weak Magnetic Field (GO-nFe ⁰ /WMF)	JI Meng, BAO Jian-guo, ZHU Xiao-wei, <i>et al.</i> (3326)
Characteristics and Influencing Factors of Monothioarsenate Adsorption on Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, ZHANG Jin-xian, <i>et al.</i> (3337)
Fast Start-Up ANAMMOX Operation Strategy and Flora Characteristics of a Biofilter	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (3345)
Effects of Aeration Strategy on Denitrifying Performance of Activated Sludge Processes in Treating Low-Carbon-Source Municipal Wastewater	ZHANG Xin-ni, CHI Yu-lei, WANG Qian, <i>et al.</i> (3356)
Effect of Hydroxylamine on Community of ANAMMOX Sludge	XING Chong-yang, FAN Yu-chen, CHEN Xuan, <i>et al.</i> (3365)
Microbial Diversity of Filamentous Sludge Bulking at Low Temperature	GAO Chun-di, ZHANG Na, HAN Hui, <i>et al.</i> (3373)
Main Influencing Factors and Strengthening of Anaerobic Transformation of Excess Sludge in China	DONG Bin, GAO Jun, CHEN Si-si, <i>et al.</i> (3384)
Relationship Between CO ₂ and CH ₄ Emissions in Urban Rivers and Sewage Discharging from a Municipal Drainage Network	LI Lei, CHEN Hao, ZHU Yi, <i>et al.</i> (3392)
Effects of Controlled-Release Urea Application on N ₂ O Emission in Maize-Cultivated Sandy Loam Soil	JIANG You-jin, YUAN Jun-ji, DING Wei-xin, <i>et al.</i> (3402)
Greenhouse Gas Emissions for Typical Open-Field Vegetable Production in China	ZHANG Fen, CHENG Tai-hong, CHEN Xin-ping, <i>et al.</i> (3410)
Effects of Water Management on Soil Properties and Cd Behavior of Typical Paddy Soils	HUANG Jing, LI Xin-yang, WEN Sha, <i>et al.</i> (3418)
Effect of Mn-Modified Biochar on the Characteristics of Aggregate Structure and the Content of Cd in Weakly Alkaline Cd-Contaminated Soil	SUN Tong, FU Yu-tong, LI Ke, <i>et al.</i> (3426)
Effects of the Immobilization of Cadmium in Soil Alone or Combined with Foliar Application of Selenium on Cadmium Accumulation in the Plants of Different Genotypes of Tsai-tai	CAO Kun-kun, LI Cheng-cheng, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (3434)
Effects of Foliar Spraying of 2,3-dimercaptosuccinic Acid on Cadmium Uptake, Transport, and Antioxidant System in Rice Seedlings	YANG Xiao-rong, HUANG Yong-chun, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (3441)