

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

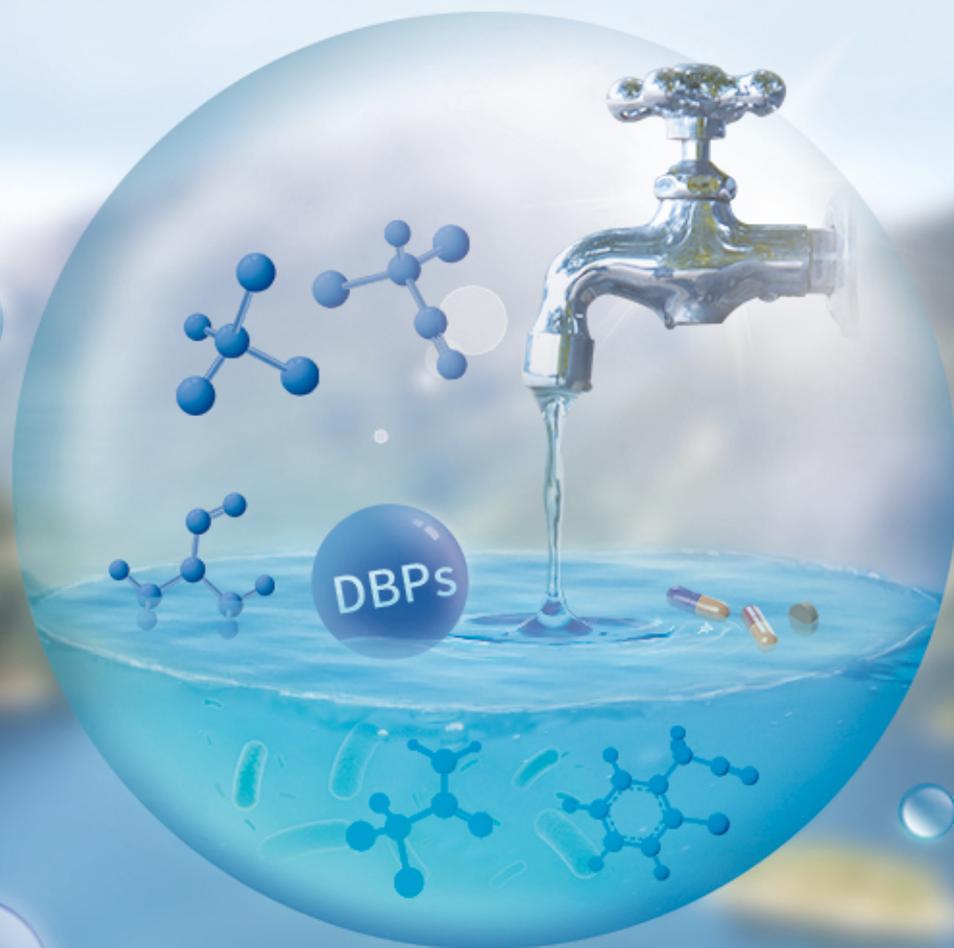
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

饮用水中的消毒副产物及其控制策略

楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年11月

第42卷 第11期

Vol.42 No.11

目次

综述与专论

饮用水中的消毒副产物及其控制策略 楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华(5059)

生物炭吸附硫化氢机制与影响因素研究进展 徐期勇, 梁铭坤, 许文君, 黄丹丹(5086)

研究报告

1998~2016 中国八大经济区植被覆盖对 PM_{2.5} 浓度时空分布的影响 杨玉莲, 杨昆, 罗毅, 喻臻钰, 孟超, 李岑(5100)

COVID-19 疫情期间北京市两次重霾污染过程大气污染物演变特征及潜在源区分析 赵德龙, 田平, 周崑, 肖伟, 盛久江, 王飞, 杜远谋, 黄梦宇, 何晖, 丁德平(5109)

汾渭平原临汾市 2019 年春节期间大气污染特征与来源解析 刘威杰, 胡天鹏, 毛瑶, 许安, 苏业旺, 李星谕, 程铖, 石明明, 梁莉莉, 邢新丽, 张家泉, 祁士华(5122)

石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 刘大喜, 陈静, 田亮, 贺博文, 沈梦宇(5131)

天津市冬季空气湿度对 PM_{2.5} 和能见度的影响 丁净, 唐颖潇, 郝天依, 姚青, 蔡子颖, 张裕芬, 韩素芹(5143)

承德市 PM_{2.5} 中碳质组分的季节分布特征及来源解析 贺博文, 聂赛赛, 王帅, 冯亚平, 姚波, 崔建升(5152)

中国生活源挥发性有机物排放清单 梁小明, 陈来国, 沈国锋, 卢清, 刘明, 陆海涛, 任璐, 孙西勃, 林奎, 梁明易, 叶代启, 陶澍(5162)

2011~2019 年中国工业源挥发性有机物排放特征 刘锐源, 钟美芳, 赵晓雅, 卢诗文, 田俊泰, 李银松, 侯墨, 梁小明, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启(5169)

基于 LHS-MC 青岛市工业源 VOCs 排放清单及不确定性 徐琬莹, 付飞, 吕建华, 李瑞凡, 邵蕊, 和慧, 李淑芬, 左华(5180)

典型橡胶制品业 VOCs 排放特征及对周边环境的影响 王海林, 辛国兴, 朱立敏, 薛松, 聂磊, 郝润(5193)

沈阳市不同功能区挥发性有机物分布特征及臭氧生成潜势 库盈盈, 任万辉, 苏枫棋, 于兴娜(5201)

天津城区夏冬季典型污染过程中 BTEX 变化特征及其健康风险评估 韩婷婷, 李颖若, 蒲维维, 姚青, 刘敬乐, 吴进, 张楠楠, 李梓铭, 马志强(5210)

郑州市大气氨排放清单及驱动力分析 计尧, 王琛, 卢轩, 张欢, 尹沙沙(5220)

基于 GAMs 模型分析成都市气象因子交互作用对 O₃ 浓度变化的影响 张莹, 倪长健, 冯鑫媛, 王式功, 张小玲, 张家熙, 李运超(5228)

长江干流表层水体悬浮物的空间变化特征及遥感反演 李建鸿, 黄昌春, 查勇, 王川, 尚娜娜, 郝维月(5239)

河北省夏季降雨溶解性有机物光谱特征的空间分布、来源解析及氮素响应 张紫薇, 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 董宛佳, 甄瑞哈, 张馨童, 姚波, 崔建升(5250)

城镇与城郊污染河道中 DOM 成分分布与影响因素 朱奔, 陈浩, 丁国平, 孙晓楠, 刘辉, 叶建锋(5264)

北京城市河流水和沉积物中微塑料的组成与分布 胡嘉敏, 左剑恶, 李頔, 谢珍雯, 陈磊(5275)

太湖西岸地表水中中性有机污染物非靶向筛查与生态风险评估 卢昕妍, 王菲, 张丽敏, 任晓鸣, 于南洋, 韦斯(5284)

河水-地下水交互带沉积物中抗生素和代谢产物提取方法优化及其分布特征 李玉琼, 童蕾, 严涵, 尤悦, 卢钰茜, 刘慧(5294)

白洋淀清淤示范区沉积物中抗生素和多环芳烃的分布特征与风险评估 王同飞, 张伟军, 李立青, 张美一, 廖桂英, 王东升(5303)

雄安新区唐河污水库残留污染物对地下水水化学动态的作用机制 张志雄, 王仕琴, 张依章, 冯文钊(5312)

基于时间序列模型的饮用水源地重金属健康风险分析与预测 姬超, 侯大伟, 谢丽, 孙华, 李发志, 周宇, 邓爱萍, 沈红军, 包广静, 王逸南(5322)

千河下游水体-沉积物重金属空间分布、风险及影响因素 高煜, 王国兰, 金梓函, 张军, 耿雅妮(5333)

巢湖流域丰水期可溶态重金属空间分布及污染评价 何苗, 刘桂建, 吴蕾, 齐翠翠(5346)

洪泽湖围栏养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评估 訾鑫源, 张鸣, 谷孝鸿, 阚可聪, 毛志刚, 陈辉辉, 曾庆飞(5355)

成都市地表水天然水化学变化特征及影响因素 许秋瑾, 赖承钺, 丁瑶, 王照丽, 程中华, 于涛(5364)

雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 黄长生, 师环环, 皮鹏程, 潘羽杰(5375)

粤港澳大湾区陆源氮污染源结构与空间分布 董斯齐, 黄翀(5384)

红壤丘陵区小流域典型土地利用的面源氮磷输出特征 房志达, 苏静君, 赵洪涛, 胡炼, 李叙勇(5394)

减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响 姜海斌, 张克强, 邹洪涛, 马璞骏, 渠清博, 谷艳茹, 沈仕洲(5405)

互花米草入侵对胶州湾湿地土壤磷赋存形态的影响 沙梦乔, 柴娜, 赵洪涛, 刘春井, 丁文超, 谢文霞(5414)

基于 16S rRNA 高通量测序的北运河水体及沉积物微生物群落组成对比分析 彭柯, 董志, 邸琰蓉, 郭道宇(5424)

硅改性花生壳生物炭对水中磷的吸附特性 赵敏, 张小平, 王梁嵘(5433)

高锰酸钾改性桉木生物炭对 Pb(II) 的吸附特性 莫贞林, 曾鸿鹤, 林华, Asfandiyar Shahab, 石清亮, 张华(5440)

混合金属氧化物/碳复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能 卢予沈, 宗莉, 于惠, 牟斌, 王爱勤(5450)

负载型钛凝胶的制备及其吸附去除三价砷的性能 孙晔洋, 周畅, 甘永海, 吴兵党, 张淑娟(5460)

一体式短程硝化-厌氧氨氧化工艺启动过程的亚硝酸盐调控 左富民, 郑蕊, 隋倩雯, 钟慧, 陈彦霖, 魏源送(5472)

生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响 邓华, 高明, 龙翼, 赖佳鑫, 王莹燕, 王子芳(5481)

紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组分含量对施肥管理的响应 徐曼, 余添, 王富华, 王丹, 王莹燕, 杨文娜, 高明, 王子芳(5491)

南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评估 赖书雅, 董秋瑶, 宋超, 杨振京(5500)

城郊农田土壤多环芳烃污染特征及风险评估 张秀秀, 卢晓丽, 魏宇宸, 朱昌达, 潘剑君(5510)

我国东部沿海地区蔬菜中重金属累积分布特征及居民膳食暴露评估 孙帅, 耿柠波, 郭崔崔, 张保琴, 卢宪波, 张海军, 陈吉平(5519)

典型矿区周边农业用地农产品安全风险及影响因素 霍彦慧, 王美娥, 谢天, 姜蓉, 陈卫平(5526)

稻田土壤 Cd 污染与安全种植分区, 以重庆市某区为例 曹淑珍, 母悦, 崔敬鑫, 刘安迪, 程先, 符远航, 魏世强, 张进忠(5535)

镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 陈小红, 耿杰, 李佳欣, 陈文清(5545)

纳米膜覆盖对畜禽粪便好氧堆肥进程及恶臭气体排放的影响 李永双, 孙波, 陈菊红, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮(5554)

《环境科学》征订启事(5108) 《环境科学》征稿简则(5151) 信息(5249, 5263, 5283)

汾渭平原临汾市 2019 年春节期间大气污染特征与来源解析

刘威杰^{1,2}, 胡天鹏¹, 毛瑶^{2,3}, 许安¹, 苏业旺¹, 李星谕¹, 程铖¹, 石明明¹, 梁莉莉^{1*}, 邢新丽¹, 张家泉², 祁士华^{1,3}

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074; 2. 湖北理工学院环境科学与工程学院, 矿区污染控制与修复湖北省重点实验室, 黄石 435003; 3. 中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 近年来汾渭平原冬季雾-霾事件频发, 节假日期间尤为明显, 除燃煤和工业排放外, 区域的地形和气候特征也是导致雾-霾的主要因素。2019年2月春节期间对汾渭平原临汾站点的空气质量进行观测。运用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)对PM_{2.5}中的13种元素(Li、Be、Ti、Rb、Sc、Y、La、Ce、Zr、V、Tl、U和Sn)进行分析测定, 并结合站点的气象数据, 运用聚类分析和后向轨迹等方法, 分析了污染物的时空分布与潜在源区贡献。结果表明, 观测期间SO₂的平均浓度为58.39 μg·m⁻³, 超过了国家环境空气质量标准(GB 3095-2012)24 h一级平均质量浓度限值(50 μg·m⁻³), O₃、NO₂和CO的均值浓度分别为52.15 μg·m⁻³、29.02 μg·m⁻³和2.29 mg·m⁻³。聚类分析结果表明, La、Ce、Ti、V、Li、Be、Rb、Y、U、Sc和Zr主要受地壳土壤源影响。气态污染物的空间分析结果表明SO₂是主要污染物, 主要受当地燃煤排放的影响, 而高浓度的NO₂和CO主要由城区向观测站点扩散造成。受汾渭平原盆地地形的影响, 沿汾渭平原传输的气团一直存在, 表明当地的地形可能会限制污染物扩散, 加剧雾-霾现象。土壤源的潜在源区分析(PSCF)表明: 受季风气候影响, 陕西北部、甘肃南部和宁夏南部对站点的土壤扬尘源有主要贡献。

关键词: PM_{2.5}; 大气污染; 元素; 汾渭平原; 后向轨迹

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)11-5122-09 DOI: 10.13227/j.hjlx.202101238

Characteristics and Origin Analysis of Air Pollution During the Spring Festival in Linfen, Fenwei Plain

LIU Wei-jie^{1,2}, HU Tian-peng¹, MAO Yao^{2,3}, XU An¹, SU Ye-wang¹, LI Xing-yu¹, CHENG Cheng¹, SHI Ming-ming¹, LIANG Li-li^{1*}, XING Xin-li¹, ZHANG Jia-quan², QI Shi-hua^{1,3}

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Hubei Key Laboratory of Mine Environmental Pollution Control and Remediation, School of Environmental Science and Engineering, Hubei Polytechnic University, Huangshi 435003, China; 3. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: In recent years, frequent haze episodes have resulted in the deterioration of air quality of the Fenwei Plain during winter and holidays. Besides coal combustion and industrial emissions, the topography and climate of the Fenwei Plain were also the main causes of the haze. The samples were collected in Linfen of Fenwei Plain during the Spring Festival from February 2 to February 13, 2019. The 13 elements(Li, Be, Ti, Rb, Sc, Y, La, Ce, Zr, V, Tl, U, and Sn)in PM_{2.5} were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry(ICP-MS). Combined with the meteorological data, the spatial and temporal distribution of pollutants and potential source analysis were evaluated by cluster analysis and backward trajectory. The average concentration of SO₂ was 58.39 μg·m⁻³ during the sampling period, which exceeded the 24 h average mass concentration limit(50.00 μg·m⁻³) of national ambient air quality standard(GB 3095-2012). The average concentrations of O₃, NO₂, and CO was 52.15 μg·m⁻³, 29.02 μg·m⁻³, and 2.29 mg·m⁻³, respectively. The results showed that SO₂ was the dominated pollutant. NO₂ and CO were mainly affected by diffusion from urban areas. The backward trajectory analysis indicated that the basin topography of the Fenwei Plain may be the main cause of the haze. The analysis of potential source contribution function(PSCF) of soil sources showed that the potential dominated areas included Northern Shaanxi, southern Gansu and Southern Ningxia., which were mainly affected by the monsoon climate.

Key words: PM_{2.5}; air pollution; elements; Fenwei Plain; backward trajectory

近年来,我国大气污染防治工作不断加强,防控措施推陈出新。2018年,我国338个地级城市全年空气质量优良天数比率为79.3%,其中重污染天数同比下降0.3%,PM_{2.5}浓度同比下降9.3%,重污染天气过程的峰值浓度、污染强度、持续时间和影响范围均明显降低(<http://www.mee.gov.cn/ywgz/zcghtjdd>)。由于受产业结构不合理等情况影响,大气污染治理边际递减效应逐步显现,因此继续大幅改

善空气质量的难度加大。其中,污染物的区域传输及恶劣气象条件导致的污染事件,重大节日期间强烈的人为干扰也会导致污染事件^[1]。因此,亟需更多

收稿日期: 2021-01-25; 修订日期: 2021-04-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0212603); 国家自然科学基金项目(41773124)

作者简介: 刘威杰(1996~),男,硕士研究生,主要研究方向为环境地球化学, E-mail: 15071211979@163.com

* 通信作者, E-mail: lianglily99@126.com

研究对突发霾事件进行分析认识。

2017 年,我国生态环保部将京津冀及周边重点区域的“2+26”城市划定为大气污染重点监测区域。2018 年开始对京津冀大气污染传输通道的“2+26”城市进行大气降尘监测。根据结果分析,自 2018 年 10~12 月,河北南部和山西中部的降尘量处于较高水平。如图 1(b)和 1(c)所示,2018 年 10 月至 2019 年 1 月,太原市的大气降尘量呈升高趋势(14.99~17.90 t·km⁻²),此外,晋城、长治和阳泉等地每月的大气降尘量均较高(<http://www.mee.gov.cn/xxgk2018>)。熊秋林等^[2]对北京市冬季的降尘研究表明,La、Li、Ce、Rb、V、Y 和 Zr 主要代表远程传输的尘埃和再悬浮降尘,是近地面降尘的主要组成部分。代杰瑞等^[3]对济宁市区近地面的大气降尘来源研究表明,降尘来源除工业活动外,主要受自然沉降与远程传输影响。汾渭平原位于京津冀“2+26”城市圈的西南方向,是黄河流域汾河平原、渭河平原及其台塬阶地的总称,包括陕西省的西安、咸阳和渭南,山西省的运城、临汾和吕梁等 11 个城市,如图 1(a)所示。汾渭平原地形多以盆地为主,分布的工矿业城市较多。2018 年冬季和春节期间,汾渭平原空气污染严重,其中受燃煤和烟花燃放等污染排放的影响,多个城市发生重度污染事件(<http://www.cnemc.cn/>)。但是,目前对于汾渭平原的大气污染研究报道较少,2018 年 Wu 等^[4]对西安春节雾-霾期间的 PM_{2.5}形成机制进行研究,表明霾的形成主要受烟花爆竹排放和燃煤排放的影响。Hu 等^[5]对湖北襄阳春节期间的空气质量进行监测,分析表明重雾-霾期间起始于汾渭平原的气团可能携带污染物向华中地区传输。因此,汾渭平原频发重污染事件的成因,以及汾渭平原和京津冀区域的“2+26”城市圈之间是否存在污染物传输,成为本研究关注的焦点。

临汾位于山西南部,汾渭平原的北部,京津冀“2+26”城市圈的西南方向,以煤工业和焦炭型企业为主,以丰富的煤资源著称。近些年,频繁的雾-霾事件发生在山西省的各个城市,包括太原市、临汾市和吕梁市等^[6,7]。Miao 等^[8]对太原市雾-霾期间的 PM_{2.5}来源进行研究,结果表明临汾地区是污染物的潜在源区之一,且污染物疑似受到盆地地形影响,从山西南部向中部传输。此外,Li 等^[9]对冬季雾-霾期间北京市的 PM_{2.5}进行源解析发现,山西中南部对北京地区存在污染物区域传送。因此,本研究选择对临汾站点春节期间的雾-霾时间进行观测,通过分析气态污染物和 PM_{2.5}中 13 种微量元素的特征,以期对汾渭平原的冬季大气防控提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 样品采集

研究选用武汉天虹中流量颗粒物采样器(TH-150F)进行采样,采样流量设定为 100 L·min⁻¹。滤膜选用石英纤维滤膜(Whatman, 英国),滤膜直径为 90 mm,配备 2.5 μm 切割头。观测站点位于山西省临汾市城郊区居民楼顶(35.83° N, 111.23° E),距地面高度 10 m,如图 1。观测时间介于 2019 年 2 月 2~14 日,其中 2 月 5 日是中国农历新年第 1 d,采样时间为 06:30~12:00、12:00~17:30、17:30~23:00 及 23:00~次日 06:30,每天收集 4 个样品。其中,2 月 5 日上午(大年初一)为烟花爆竹集中燃放时间,于该时间段增设一个样品,将上午采样时间分为 06:30~08:30 以及 08:30~11:30。本研究观测共采集 49 个样品。

1.2 样品前处理与分析

研究采用 HNO₃-HF 消解体系对样品进行高温密闭容器消解前处理,而后使用电感耦合等离子体质谱仪 ICP-MS(PerkinElmer 350D)对样品上机测定。共测定 Li、Be、Ti、Rb、Sc、Y、La、Ce、Zr、V、Tl、U 和 Sn 这 13 种元素。准确截取 1/4 PM_{2.5}滤膜剪碎后放入聚四氟乙烯消解罐中,加入 2 mL 浓硝酸于 80℃下预消解 6 h,后加入 1 mL 氢氟酸,盖上盖子,装入密闭反应釜(保证密闭环境),放入烘箱 180℃下恒温 48 h。而后取出消解罐,在电加热板上于 115℃加热至近干,然后加入 1 mL 浓硝酸,继续加热至消解罐中溶液仅剩 1 滴,从加热板上取下,室温稍冷却后,加入 2 mL 30%的稀硝酸放入密闭消解罐,继续放入烘箱内,180℃下恒温 12 h 后,取出消解罐,转移消解罐内的溶液至 10 mL 的离心管内,用 1%稀硝酸定容至 10 mL,摇匀。空白滤膜采取相同的方法进行处理与测定。

1.3 质量控制

滤膜采样前在 550℃的条件下马弗炉中焙烧 4 h 以上,在 25℃±2℃相对湿度 55%±3%条件下恒温恒湿 24 h,然后选用精度为十万分之一的分析天平(T-114 型, Sartorius, 德国)进行称量,采样完成后恒温恒湿 24 h,再次称量。每次称量保证连续 2 次的误差小于等于 0.000 05 g。样品采集过程中需对中流量采样器及 2.5 μm 切割头定时清洗,确保不会对样品造成交叉污染。滤膜消解过程中使用样品空白、过程空白和试剂空白进行质量控制,用土壤标准物质 BCR-2、BHVO-2、GSS-5 和 GSS-9 对各元素进行回收率校准实验,回收率均在 90%~110%之间。消解过程前后对消解罐进行硝酸浸泡,并用超纯

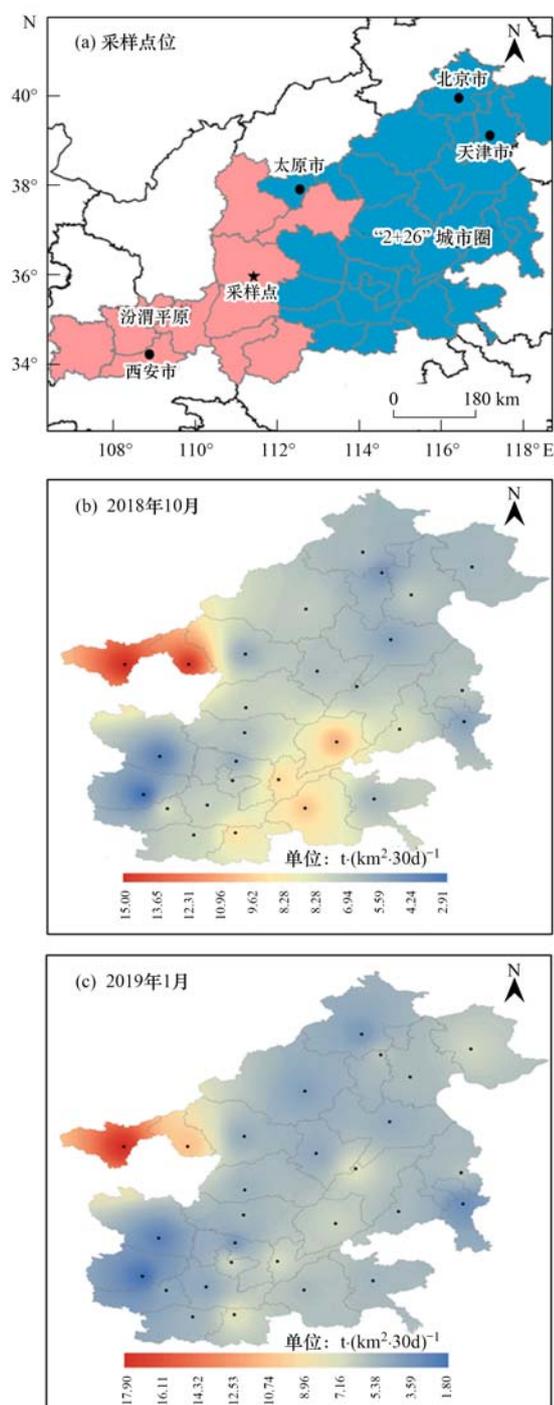


图1 采样点位及京津冀大气污染传输通道“2+26”城市大气降尘监测结果空间分布

Fig. 1 Sampling sites and spatial distribution of “2+26” urban atmospheric dust monitoring results of Beijing-Tianjin-Hebei air pollution transmission channel

水和去离子水清洗。测试过程中元素标准曲线的相关系数达到99.99%以上。

1.4 后向气团轨迹分析

本研究主要利用NOAA空气资源实验室研发的HYSPLIT轨迹模型及结合GIS技术开发的TrajStat软件,计算采样期间后向气团轨迹、潜在源区贡献分析(PSCF)^[10, 11]。运行TrajStat软件所需要

的数据来自美国国家环境预报中心提供的GDAS气象数据,数据可以从ftp://arlftp.arl.hq.noaa.gov/pub/archives/gdas1下载,后推模拟时间选为48 h。研究选取不同轨迹起始高度(100、300、600和1 000 m)计算气团运行轨迹。轨迹聚类分析是根据气团轨迹的空间相似度,将所有轨迹进行组合,采用逐个聚类法。

PSCF是根据气流轨迹从而达到分析大气污染物的潜在来源的一种方法,是一个条件概率函数^[12]。定义通过某网格的气团轨迹到达研究点所对应的值超过所设定的值,则认为这条轨迹已受到污染,值越大表示通过该网格污染轨迹的所占比例越高。在进行PSCF分析之前,首先应对覆盖的区域网格化,需创建PSCF网格,分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,计算公式如下:

$$PSCF_{ij} = m_{ij}/n_{ij} \quad (1)$$

当 n_{ij} 很小时,使得PSCF_{ij}值很大,这样就会使结果存在很大的不确定性,引入权重因子 $W(n_{ij})$,会减小这种不确定因素,计算公式如下:

$$WPSCF_{ij} = PSCF_{ij} \times W(n_{ij}) = \frac{m_{ij}}{n_{ij}} W(n_{ij}) \quad (2)$$

$$W(n_{ij}) = \begin{cases} 1.00, & n_{ij} > 3n_{ave} \\ 0.70, & 3n_{ave} \geq n_{ij} > 1.5n_{ave} \\ 0.40, & 1.5n_{ave} \geq n_{ij} > n_{ave} \\ 0.20, & n_{ij} \geq n_{ave} \end{cases} \quad (3)$$

式中, i 和 j 分别代表纬度和经度, m_{ij} 为研究区域内经过网格 (i, j) 的污染轨迹数, n_{ij} 为经过网格 (i, j) 的所有轨迹数, n_{ave} 每个网格 (i, j) 的平均端点轨迹数。WPSCF_{ij}值越大,表明污染来源于网格 (i, j) 的可能越大。

2 结果与讨论

2.1 污染物浓度特征分析

PM_{2.5}中13种痕量元素在春节前(2月2~4日)、春节期间(2月5~10日)和春节后(2月11~13日)这3个阶段的浓度变化如表1所示。其中,元素Ti、V、La和Li呈逐渐降低趋势,春节后期表现为最低。Ti是地壳中丰度较高的元素之一,V可对人体造成毒害作用。春节期间,观测站点当地的工厂逐渐停产可能使V元素浓度降低;农牧业等人为活动逐渐减弱可能使Ti含量降低。然而,Zr、Y、U和Tl等元素呈现先升高后降低趋势。春节当天,观测站点附近伴有烟花燃放和生物质燃烧等现象,Zr和U元素可能与烟花中的黏土有关。

大气中的气态污染物直接影响雾-霾的形成。本

表 1 观测期间春节前、中、后期这 3 个阶段 PM_{2.5} 中 13 种元素的浓度/ng·m⁻³Table 1 Concentrations of 13 elements in PM_{2.5} of three periods, including before, during, and after the Spring Festival/ng·m⁻³

元素	春节前期	春节中期	春节后期
Li	6.46 ± 3.19	6.41 ± 5.75	2.43 ± 1.00
Be	0.41 ± 0.10	0.44 ± 0.32	0.21 ± 0.05
Ti	308.25 ± 149.02	234.44 ± 151.03	119.74 ± 89.18
Rb	12.36 ± 5.12	15.09 ± 8.70	6.24 ± 2.03
Sc	17.30 ± 3.83	18.03 ± 7.06	14.79 ± 4.09
Y	49.87 ± 10.25	55.43 ± 19.86	45.26 ± 9.54
La	6.61 ± 1.54	6.54 ± 2.91	4.38 ± 0.88
Ce	11.32 ± 2.79	12.01 ± 5.27	7.91 ± 1.56
Zr	470.55 ± 220.86	658.29 ± 232.50	547.00 ± 143.71
V	9.15 ± 4.69	5.71 ± 3.95	2.69 ± 1.42
Tl	1.78 ± 1.71	2.77 ± 2.85	1.60 ± 0.37
U	6.91 ± 0.95	7.54 ± 3.06	6.45 ± 1.35
Sn	8.31 ± 2.29	9.07 ± 5.16	6.75 ± 1.78

研究中 SO₂、NO₂、O₃ 和 CO 等气象数据均来自中国气象数据网. 整个观测期间 SO₂ 的均值浓度为 58.39 μg·m⁻³, 超过了国家环境空气质量标准 (GB 3095-2012) 24 h 一级平均质量浓度限值 (50.00 μg·m⁻³), O₃ 的均值浓度为 52.15 μg·m⁻³. 其中春节前、中、后期, SO₂ 的均值浓度分别为 40.00、77.07 和 31.67

μg·m⁻³, 呈现先升高后降低的趋势; O₃ 的均值浓度分别为 64.80、45.29 和 57.00 μg·m⁻³, 呈先降低后升高趋势. 如图 2 所示, 当 SO₂ 浓度较高时, O₃ 浓度较低, 两者表现为负相关, 这可能与 SO₂ 转化为二次硫酸盐的主要途径有关, SO₂ 易被大气中的 O₃ 或自由基氧化成硫酸盐发生均相氧化反应^[13].

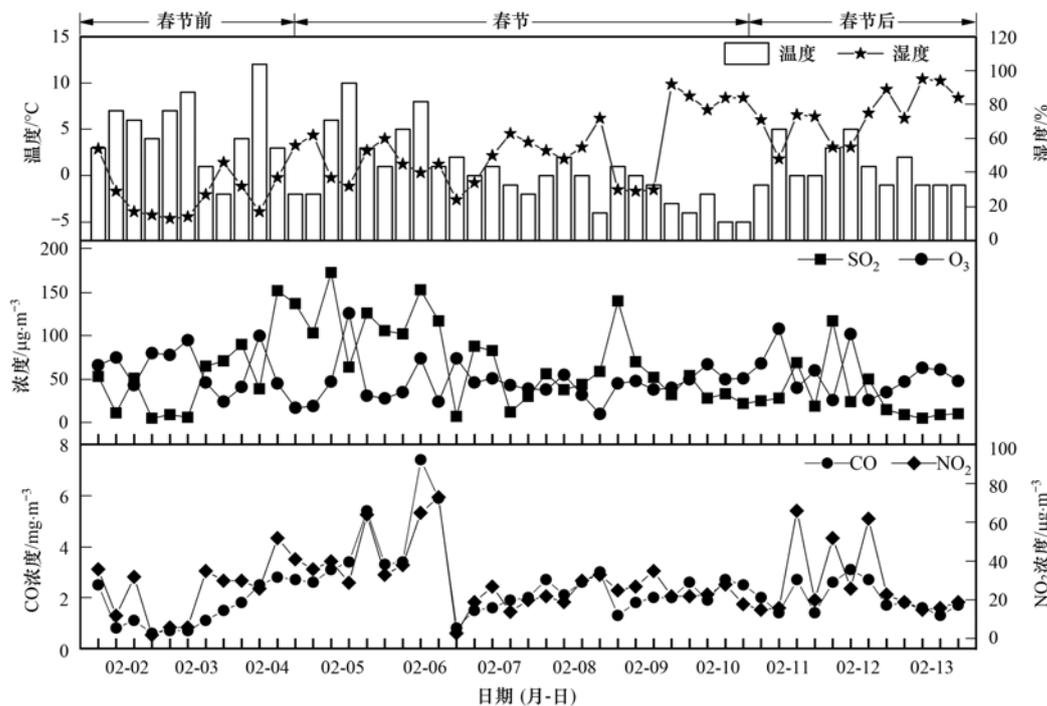


图 2 观测期间的气态污染物与气象参数的时间序列

Fig. 2 Time series of gaseous pollutants and meteorological parameters during the sampling period

观测期间, NO₂ 的平均浓度为 29.02 μg·m⁻³, CO 的均值浓度为 2.29 mg·m⁻³, 均未超过国家环境空气质量标准 (GB 3095-2012) 24 h 平均质量浓度限值, NO₂ 和 CO 的峰值均出现在 2 月 6 日的上午, 分别为 65 μg·m⁻³ 和 7.4 mg·m⁻³. 如图 2, NO₂ 和 CO 表现出相似的变化趋势, 这可能与两者的相同来源有关, NO₂ 主要受到机动车尾气排放影响, CO 与

城市化的人为干扰有关^[14], 观测站点为城郊区, 污染物可能从城区向郊区扩散. 此外, 温度和相对湿度呈明显负相关趋势.

2.2 污染物相关性分析与聚类分析

采用 Pearson 模型对 PM_{2.5} 中 13 种元素含量及气象参数 (大气压、温度、相对湿度和风速) 进行相关性分析, 相关系数如图 3(a) 所示. 值得注意的是,

Li、Be、Ti、La、Ce、Zr、V 和 U 呈正相关,相关系数介于 0.45~0.85 之间,其中 La 和 Ti 的相关系数为 0.85,Ti 与 Ce 和 V 的相关系数分别为 0.84 和 0.91,除此之外,La 和 V 的相关系数为 0.82,表明两者之间可能有相同来源. Ti 元素是地壳中含量较为丰富的常量元素之一,V 元素常被用于钢材制备的工艺中用来提高钢材强度,除此之外,V 元素被人体摄入,并不断累积可以影响眼鼻喉及呼吸道功能产生毒害作用^[15]. 因此,以上结果分析表明细颗粒物中的痕量元素可能受到工业降尘的影响,且提高了颗粒物的毒害作用. Tl 和 Sn 元素与其余参数未表现出很强的相关性,表明受其他元素影响较小,但二者的相关系数较高为 0.54,表明二者来源相同. 湿度与细颗粒物中的元素均呈负相关,温度与湿度的相关系数为 -0.7,观测期间为冬季,当温度升高,空气中水分子含量较低,

导致相对湿度降低;在相对湿度高的情况下,水分子可附着在颗粒物上,受重力作用直接降落至地面,降低颗粒物浓度.

对 PM_{2.5} 中 13 种元素进行聚类分析,揭示具有相似地球化学特征的元素集群^[16]. 同时,聚类分析也可以用来判别元素的来源,验证相关性分析结果. 本研究通过 SPSS 软件采用系统聚类中的 Ward 最小方差法和计算欧氏距离进行聚类分析,如图 3. 元素主要被分为两类,第一类元素包含: La、Ce、Ti、V、Li、Be、Rb、Y、U、Sc 和 Zr,主要受地壳土壤源影响,其中 Li 一般被认为来自地壳源,Ti 在地壳中的含量较高. 但值得注意的是,本研究中 PM_{2.5} 中 Ti 和 Zr 浓度较高,Zr 浓度变化在春节前后起伏较大,相关研究证明,烟花爆竹内部的黏土中 Zr 含量较高,因此第一类元素被认定为土壤源. 第二类元素主要包括 Tl 和 Sn,认定为其他来源.

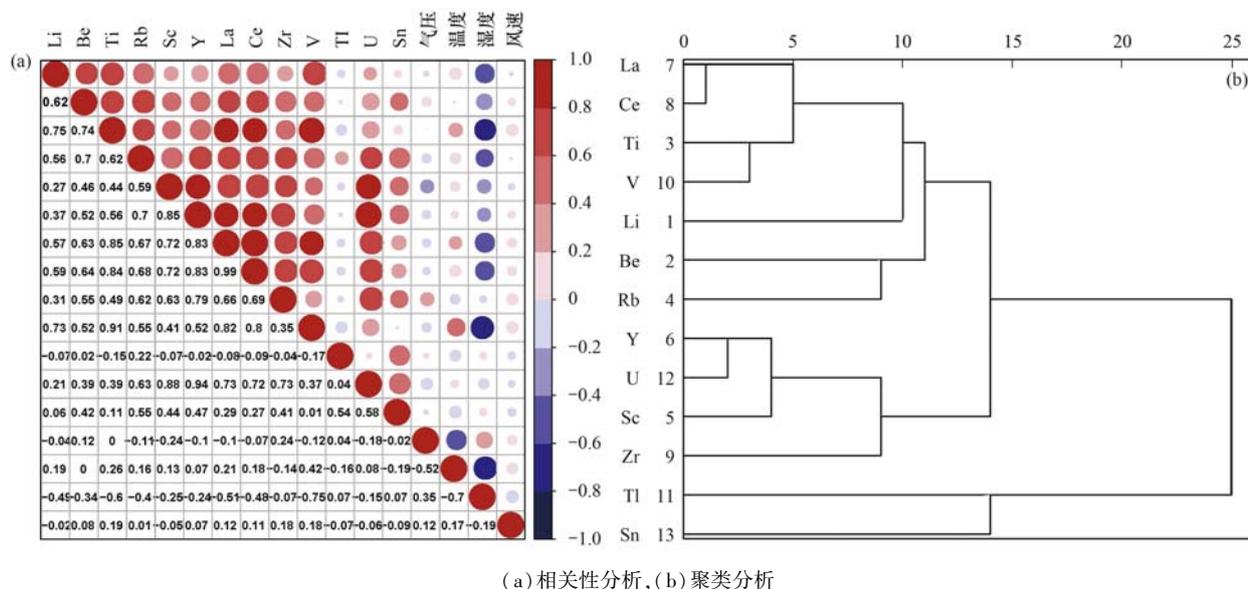


图 3 13 种元素与气象参数的相关性分析和元素的聚类分析

Fig. 3 Correlation analysis of the 13 elements and meteorological parameters and cluster analysis

2.3 污染物空间分布特征

如图 4(a)~4(c), SO₂ 和 NO₂ 与 CO 表现出不同的空间分布特征. 其中,在整个观测期间,监测站点主要以 1~3 m·s⁻¹ 风速为主,这可能与当地的盆地地形有关. 条件概率函数 (CPF) 被用来计算某一特定风向某一物种的浓度大于某一特定值的概率^[17, 18],一般特定值被认定为某一变量的 75% 分位浓度值. 因此, CPF 可以展示高浓度下的主导风速. 计算公式如下:

$$P_{\theta} = m_{\theta}/n_{\theta} \quad (c \geq x) \quad (4)$$

式中, P_{θ} 指污染物在 θ 风向上的概率, m_{θ} 为 θ 风向上浓度 (c) 高于某值 (x) 的样品数量, n_{θ} 为该风向上的样品总数量. 图 4(d)~4(e) 分别展示了监测站

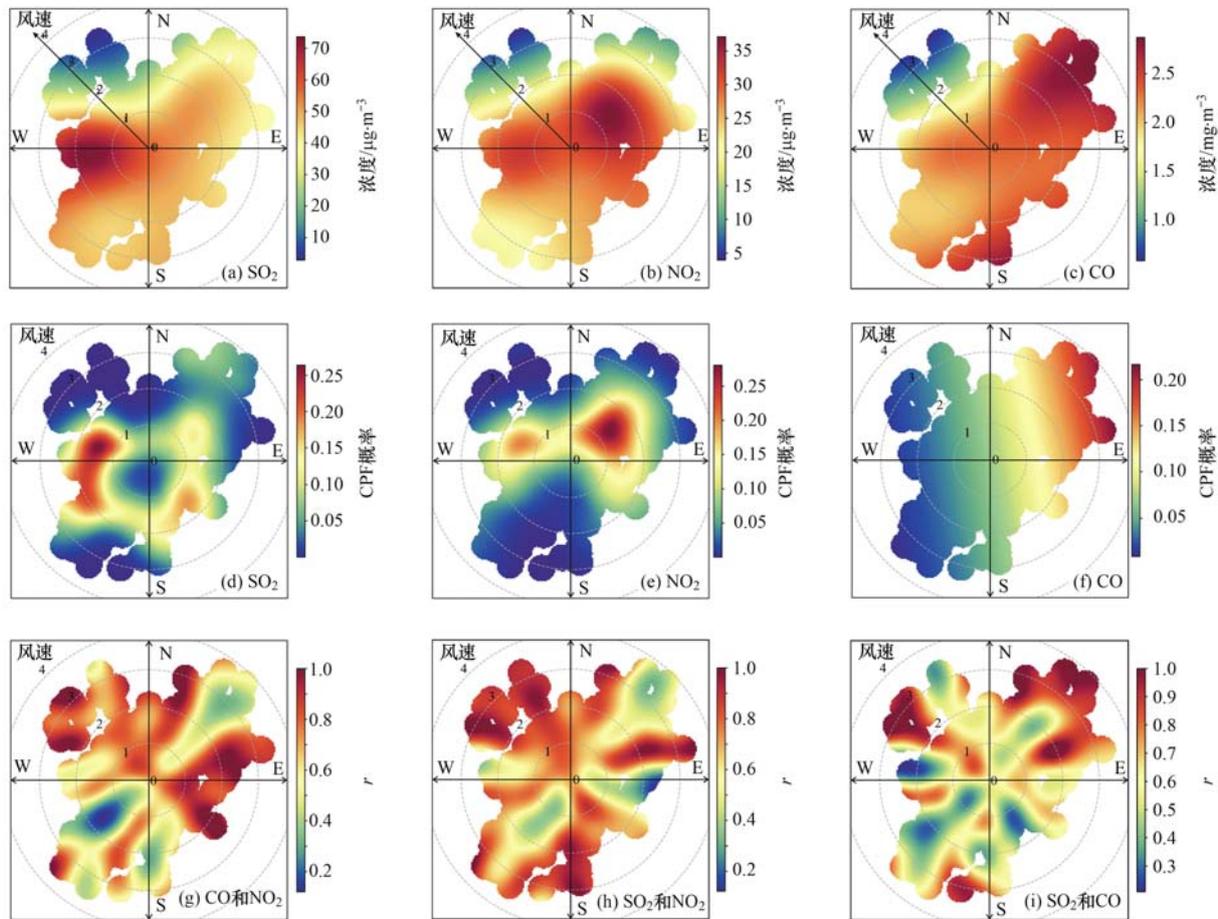
点 3 种污染物 75% 分位的浓度值. SO₂、NO₂ 和 CO 的 75% 分位浓度值分别为 86 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、38 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 2.9 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

观测期间,临汾站点的主导风向为东北风和西南风,高浓度的 SO₂ 多发生在西风向,且风速以 1~2 m·s⁻¹ 为主,表明监测站点附近的 SO₂ 多以静态传输为主. 监测站点位于城郊区,附近的西方向分布有焦化厂和煤炭加工厂. 高浓度的 NO₂ 多伴随东北风,以低风速为主,表明站点的东北方向有 NO₂ 排放源,可能与该方向公路的机动车尾气排放有关. 春节假期,大量的机动车流动,尾气排放可直接导致附近区域的大气污染. 较高浓度的 CO 多发生在东北方向,且风速较高 (3~4 m·s⁻¹). 监测站点的东北

方向为城区,白天的 06:00 ~ 10:00 城区活动慢慢开始,CO 逐渐累积,随后 10:00 ~ 12:00 太阳辐射增强,CO 浓度逐渐下降.因此,在高风速影响下,可能会导致城区的 CO 向城郊区扩散.

运用高斯核函数计算相关统计量的加权皮尔逊相关系数(r)^[19],计算结果体现在极坐标图中.本研究通过高斯核函数对风速和风向进行加权计算,包括 CO 与 NO₂、NO₂ 与 SO₂ 和 CO 与 SO₂ 的加权皮尔森相关系数(r),当相关系数值为 1 时,表明污染物具有

相同来源,如图 4(g) ~ 4(i) 所示. NO₂ 与 SO₂ 的高相关性多体现在西北方向和正南方向及正东方向,监测站点附近遍布以煤为主要输入能源的工厂,如汽车零件制造业、焦化厂和煤冶炼厂等,导致工业生产过程中产生硫氧化物及氮氧化物.同样地,SO₂ 与 CO 的高相关体现在东北方向和西北方向,这可能与城郊区和城中村的散煤取暖相关.因此,对比 3 种气态污染物的污染来源特征,当地工业燃煤与散煤燃烧造成的排放仍然是大气污染的主要来源之一.



(a) ~ (c) 气态污染物随风速和风向变化的玫瑰图; (d) ~ (f) 气态污染物的 75% 分位浓度概率分布; (g) ~ (i) 气态污染物的相关系数随风速和风向变化的玫瑰图; 半径为风速, 单位为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

图 4 观测期间临汾站点气态污染物的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of gaseous pollutants in Linfen during the sampling period

2.4 气团后向轨迹及潜在源区分析

相关研究表明,重雾-霾期间研究区域的行星边界层高度均低于 1 000 m^[20,21].为探究重污染期间,观测站点气团的来源及传输和污染受地形影响的程度,分别对观测期间不同高度的气团轨迹进行计算并聚类分析^[22],气团轨迹运行高度分别为 100、300、600 和 1 000 m,如图 5.在 100 m 高度时,第 1 簇气团来源于新疆地区,经过内蒙古,陕西北部到达观测站点,运行轨迹较长,占比 14.74%,第 2 簇气团起始于甘肃西北地区,经宁夏、陕西到达站

点,占轨迹总数的 25.00%.1、2 类气团运行轨迹较长,有研究表明气团轨迹运行较长时,传输速度较慢^[23,24].此外,前两类气团均受到季风气候影响,山西省属于温带大陆性季风气候,冬季气流由陆地吹向海面^[25],新疆、甘肃及气团经过地等地气候较为干燥,气团可能会携带土壤尘向观测站点传输.第 3 簇气团起始于陕西中部,经过西安,沿着汾渭平原传入站点,占总气团轨迹的 27.24%,第 4 簇气团始于河北南部,属于“2+26”城市圈,经河南北部,从东方向传入监测站点,占

比 33.01% . 第 3、4 类气团属于短距离传输, 相关研究表明: 气团进行短距离传输, 传输速度较快, 且气团传输不仅会携带颗粒物, 可能会携带大量的气态污染物^[23,26].

不同高度(100、300、600 和 1 000 m)气团轨迹计算、聚类结果大致相似. 不同的是, 在不同气团起始高度, 每类气团轨迹的占比不同. 随着起始高度的增加, 起始于新疆的气团数增加, 从 14.74% 增至

35.90%, 但起始于河北南部和河南北部的气团数逐渐降低, 从 33.01% 降至 12.82%. 除此之外, 第 3 类起始于陕西中部沿着汾渭平原传输的气团轨迹数变化不明显, 如图 5 所示.

综上所述, 随着气团起始高度增加, 气团逐渐受到季风气候的影响, 第 1 簇气团和第 2 簇气团逐渐占据主导. 但对比第 3 类气团的轨迹占比变化, 随着高度增加, 沿着汾渭平原的盆地地形进行传输的气团不

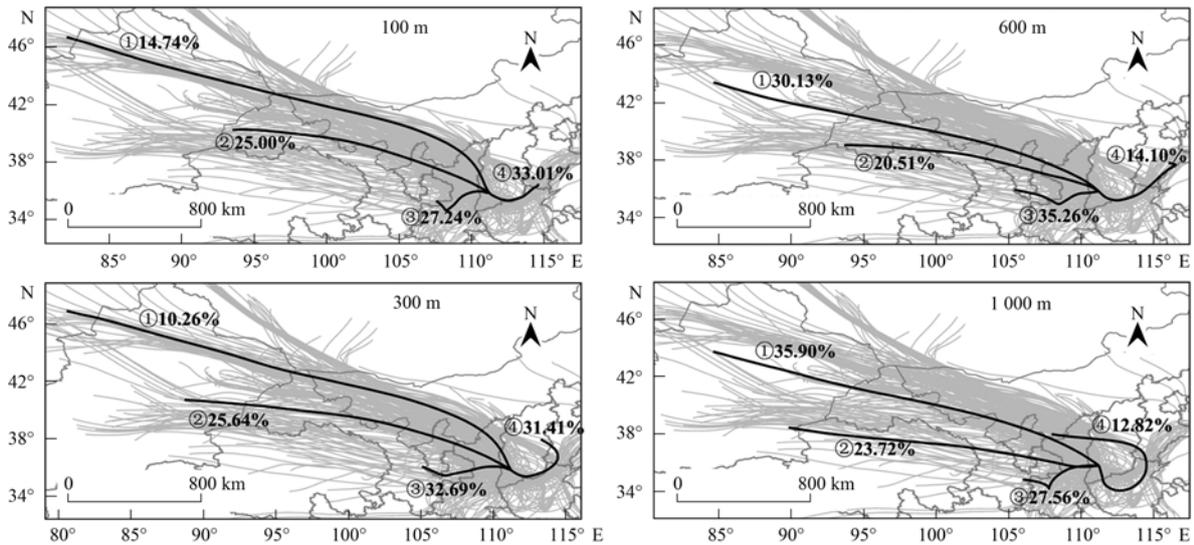


图 5 不同起始高度临汾站点后向气团轨迹聚类分析结果

Fig. 5 Cluster analysis results of backward air mass trajectories at Linfen sites with different starting heights

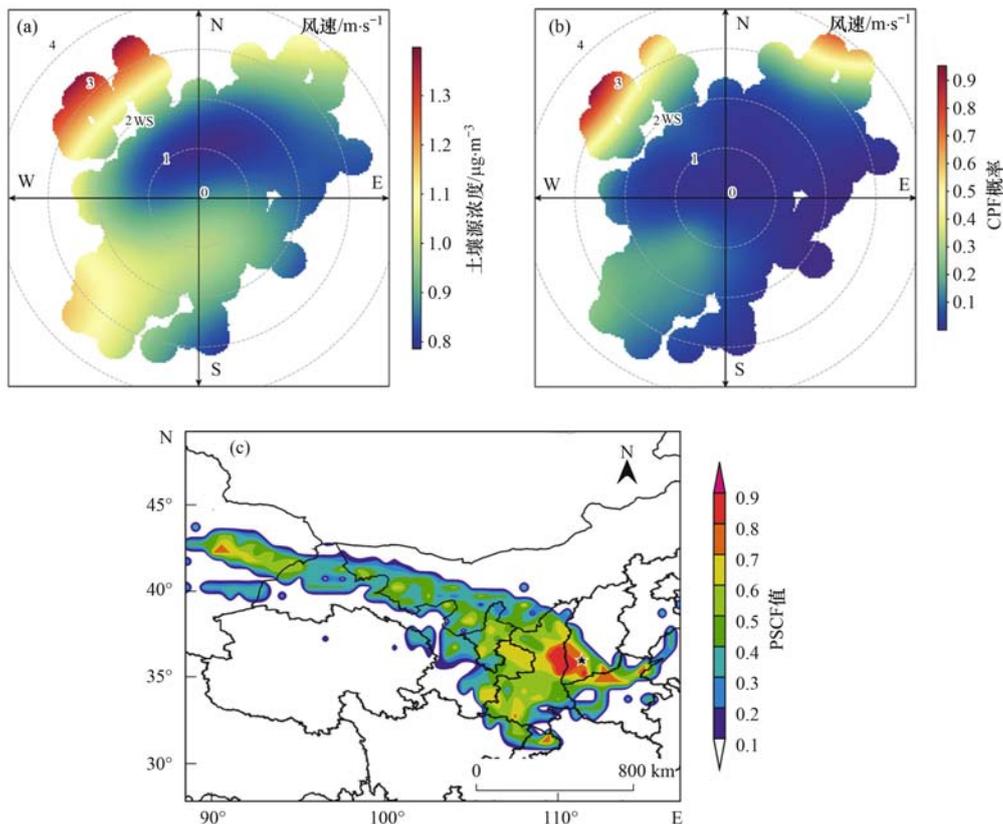


图 6 临汾 PM_{2.5} 中土壤源的潜在源区分析

Fig. 6 Potential source contribution function of soil sources to PM_{2.5} in Linfen

受季风气候影响,第 3 簇气团可能会携带污染物沿着汾渭平原盆地进行扩散,Zhan 等^[27,28]的研究也表明盆地地形会影响气团携带污染物的扩散.第 4 类气团起始于“2+26”城市圈,在重霾期间,气团可能会携带污染物从“2+26”城市圈传入汾渭平原.

根据 13 种元素的聚类分析结果,13 种元素(Li、Be、Ti、Rb、Sc、Y、La、Ce、Zr、V、Tl、U 和 Sn)主要代表土壤扬尘源.土壤源(13 种元素浓度)随监测站点的风向风速的分布如图 6(a)所示,利用条件概率函数(CPF)对监测站点土壤源大于 75%分位浓度值($1.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)的概率如图 6(b).结果表明,监测站点的土壤源主要发生在西北方向,且多伴随较高风速($3\sim 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).根据气团轨迹分析结果,起始于新疆、甘肃等地的气团可能会携带土壤尘向观测站点传输,因此,本研究利用 MeteorInfo 软件对土壤源(13 种元素)潜在源区 PSCF 进行分析,气团选择起始高度为 100 m 的气团轨迹.如图 6(c)所示,本次观测期间站点的土壤扬尘源主要受第 1 类和第 2 类气团轨迹影响,观测站点土壤源的强潜在源区主要分布在站点的西北方向,表现为陕西北部($\text{WPSCF}\geq 0.8$),此外甘肃东部,宁夏东部和新疆东部也表现出较高可能($\text{WPSCF}\geq 0.6$).结合气团轨迹分析,结果表明:观测站点受季风气候影响,始于新疆、甘肃、宁夏及陕西北部的气团可能会携带土壤扬尘到达观测站点.然而,对于观测站点的土壤扬尘受“2+26”城市圈的影响较小.

3 结论

(1)2019 年春节期间,临汾站点污染严重.整个观测期间 SO_2 的均值浓度为 $58.39 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,超过了空气质量标准(GB 3095-2012)24 h 一级平均质量浓度限值($50.00 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),超标率为 53.06%;观测期间 O_3 的均值浓度为 $52.15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, NO_2 的均值浓度为 $29.02 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,CO 的均值浓度为 $2.29 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,气态污染物以 SO_2 为主.此外, SO_2 与 O_3 呈负相关,可能 SO_2 易被大气中的 O_3 或自由基氧化成硫酸盐而发生均相氧化反应; NO_2 与 CO 呈正相关,表明两者具有相同来源,污染物可能从城区向观测站点附近扩散. $\text{PM}_{2.5}$ 中 13 种微量元素以 Ti($232.32 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$)和 Zr($597.97 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$)的均值浓度较高.

(2) $\text{PM}_{2.5}$ 中 13 种元素呈现较高的相关性,相关系数介于 0.45~0.85 之间,湿度与 13 种元素均呈现负相关.聚类分析结果表明 La、Ce、Ti、V、Li、Be、Rb、Y、U、Sc 和 Zr 可能均受到土壤源影响.

(3)污染物空间分布表明:较高浓度的 SO_2 分

布在监测站点的西方向,以静态传输为主,高浓度的 NO_2 和 CO 均发生于监测站点的东北方向,前者扩散速度较低,后者扩散较快. NO_2 与 SO_2 的高相关性表明:站点附近均受到散煤和工业燃煤排放污染物的影响.

(4)后向轨迹分析结果表明:在不同起始高度(100、300、600 和 1 000 m)进行气团轨迹分析,结果表明随着起始高度增加,起始于新疆和甘肃等地的气团轨迹占比升高,从 14.74% 增至 35.90%,起始于河北河南等地的气团轨迹占比下降,从 33.01% 降至 12.82%,但沿着汾渭平原传输的气团轨迹占比不变,表明随着高度增加,沿着汾渭平原的盆地地形进行传输的气团不受季风气候影响.观测站点的土壤扬尘易受季风气候影响,从甘肃、宁夏和陕西北部向观测站点传输,但受“2+26”城市圈的影响较小.

参考文献:

- [1] Jiang Q, Sun Y L, Wang Z, et al. Aerosol composition and sources during the Chinese Spring Festival: Fireworks, secondary aerosol, and holiday effects [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(11): 6023-6034.
- [2] 熊秋林, 赵文吉, 郭道宇, 等. 北京城区冬季降水微量元素分布特征及来源分析 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(8): 2735-2742.
- [3] Xiong Q L, Zhao W J, Guo X Y, et al. Distribution characteristics and source analysis of dustfall trace elements during winter in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(8): 2735-2742.
- [4] 代杰瑞, 祝德成, 庞绪贵, 等. 济宁市近地表大气降尘地球化学特征及污染来源解析 [J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(1): 40-48.
- [5] Dai J R, Zhu D C, Peng X G, et al. Geochemical characteristics and pollution sources identification of the near-surface atmosphere dust-fall in Jinan [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(1): 40-48.
- [6] Wu C, Wang G H, Wang J Y, et al. Chemical characteristics of haze particles in Xi'an during Chinese Spring Festival: Impact of fireworks burning [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **71**: 179-187.
- [7] Hu T P, Mao Y, Liu W J, et al. Fate of $\text{PM}_{2.5}$ -bound PAHs in Xiangyang, central China during 2018 Chinese spring festival: Influence of fireworks burning and air-mass transport [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **97**: 1-10.
- [8] Liu K K, Shang Q M, Wan C Y, et al. Characteristics and sources of heavy metals in $\text{PM}_{2.5}$ during a typical haze episode in rural and urban areas in Taiyuan, China [J]. *Atmosphere*, 2017, **9**(1), doi: 10.3390/atmos9010002.
- [9] Qi H Y, Chen X L, Du Y E, et al. Cancer risk assessment of soils contaminated by polycyclic aromatic hydrocarbons in Shanxi, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **182**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.109381.
- [10] Miao Y C, Liu S H, Guo J P, et al. Impacts of meteorological conditions on wintertime $\text{PM}_{2.5}$ pollution in Taiyuan, North China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(22): 21855-21866.

- [9] Li H, Duan F K, Ma Y L, *et al.* Case study of spring haze in Beijing: characteristics, formation processes, secondary transition, and regional transportation [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **242**: 544-554.
- [10] 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.
- [11] McGowan H, Clark A. Identification of dust transport pathways from Lake Eyre, Australia using Hysplit [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(29): 6915-6925.
- [12] Perrone M G, Vratolis S, Georgieva E, *et al.* Sources and geographic origin of particulate matter in urban areas of the Danube macro-region: the cases of Zagreb (Croatia), Budapest (Hungary) and Sofia (Bulgaria) [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **619-620**: 1515-1529.
- [13] Qiao B Q, Chen Y, Tian M, *et al.* Characterization of water soluble inorganic ions and their evolution processes during PM_{2.5} pollution episodes in a small city in southwest China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**: 2605-2613.
- [14] 薛亦峰, 周震, 聂滕, 等. 2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1593-1601.
- Xue Y F, Zhou Z, Nie T, *et al.* Exploring the severe haze in Beijing during December, 2015: pollution process and emissions variation [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1593-1601.
- [15] 李丽娟, 温彦平, 彭林, 等. 太原市采暖季PM_{2.5}中元素特征及重金属健康风险评价 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(12): 4431-4438.
- Li L J, Wen Y P, Peng L, *et al.* Characteristic of elements in PM_{2.5} and health risk assessment of heavy metals during heating season in Taiyuan [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4431-4438.
- [16] 张会涛, 田瑛泽, 刘保双, 等. 武汉市PM_{2.5}化学组分时空分布及聚类分析 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 4764-4773.
- Zhang H T, Tian Y Z, Liu B S, *et al.* Spatial temporal characteristics and cluster analysis of chemical components for ambient PM_{2.5} in Wuhan [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 4764-4773.
- [17] 刘晓咏, 王自发, 王大玮, 等. 京津冀典型工业城市沙河市大气污染特征及来源分析 [J]. *大气科学*, 2019, **43**(4): 861-874.
- Liu X Y, Wang Z F, Wang D W, *et al.* Characteristics and source identification of air pollution in Shahe, a typical industrial city in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2019, **43**(4): 861-874.
- [18] 刘晓咏, 王自发, 王大玮, 等. 邢台沙河市冬季大气污染特征与潜在源区分析 [J]. *气候与环境研究*, 2019, **24**(3): 313-323.
- Liu X Y, Wang Z F, Wang D W, *et al.* Analyses of air pollution characteristics and potential sources in Shahe City, Xingtai during the winter [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2019, **24**(3): 313-323.
- [19] Grange S K, Lewis A C, Carslaw D C. Source apportionment advances using polar plots of bivariate correlation and regression statistics [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **145**: 128-134.
- [20] Wang L L, Wang H, Liu J K, *et al.* Impacts of the near-surface urban boundary layer structure on PM_{2.5} concentrations in Beijing during winter [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **669**: 493-504.
- [21] Fan W Z, Qin K, Xu J, *et al.* Aerosol vertical distribution and sources estimation at a site of the Yangtze River Delta region of China [J]. *Atmospheric Research*, 2019, **217**: 128-136.
- [22] Xing X L, Chen Z L, Tian Q, *et al.* Characterization and source identification of PM_{2.5}-bound polycyclic aromatic hydrocarbons in urban, suburban, and rural ambient air, central China during summer harvest [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **191**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110219.
- [23] Hao T Y, Cai Z Y, Chen S C, *et al.* Transport pathways and potential source regions of PM_{2.5} on the west coast of Bohai Bay during 2009-2018 [J]. *Atmosphere*, 2019, **10**(6), doi: 10.3390/atmos10060345.
- [24] Zhu L L, Zhang Y H, Kan X, *et al.* Transport paths and identification for potential sources of haze pollution in the Yangtze River Delta urban agglomeration from 2014 to 2017 [J]. *Atmosphere*, 2018, **9**(12), doi: 10.3390/atmos9120502.
- [25] Zhang Y Y, Lang J L, Cheng S Y, *et al.* Chemical composition and sources of PM₁ and PM_{2.5} in Beijing in autumn [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **630**: 72-82.
- [26] Tu X P, Lu Y, Yao R S, *et al.* Air quality in Ningbo and transport trajectory characteristics of primary pollutants in autumn and winter [J]. *Atmosphere*, 2019, **10**(3), doi: 10.3390/atmos10030120.
- [27] Zhan C C, Xie M, Fang D X, *et al.* Synoptic weather patterns and their impacts on regional particle pollution in the city cluster of the Sichuan Basin, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **208**: 34-47.
- [28] Zhang L, Guo X M, Zhao T L, *et al.* A modelling study of the terrain effects on haze pollution in the Sichuan Basin [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **196**: 77-85.

CONTENTS

Disinfection By-products in Drinking Water and Their Control Strategies; A Review	CHU Wen-hai, XIAO Rong, DING Shun-ke, <i>et al.</i>	(5059)
Advances in Mechanism and Influencing Factors Affecting Hydrogen Sulfide Adsorption by Biochar	XU Qi-yong, LIANG Ming-shen, XU Wen-jun, <i>et al.</i>	(5086)
Effect of Vegetation Coverage on the Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentration in China's Eight Major Economic Regions from 1998 to 2016	YANG Yu-lian, YANG Kun, LUO Yi, <i>et al.</i>	(5100)
Evolution and Potential Source Apportionment of Atmospheric Pollutants of Two Heavy Haze Episodes During the COVID-19 Lockdown in Beijing, China	ZHAO De-long, TIAN Ping, ZHOU Wei, <i>et al.</i>	(5109)
Characteristics and Origin Analysis of Air Pollution During the Spring Festival in Linfen, Fenwei Plain	LIU Wei-jie, HU Tian-peng, MAO Yao, <i>et al.</i>	(5122)
Spatio-Temporal Characteristics and Potential Source Areas of Seasonal Atmospheric Pollution in Shijiazhuang	NIE Sai-sai, WANG Shuai, CUI Jian-sheng, <i>et al.</i>	(5131)
Impact of Air Humidity on PM _{2.5} Mass Concentration and Visibility During Winter in Tianjin	DING Jing, TANG Ying-xiao, HAO Tian-yi, <i>et al.</i>	(5143)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, WANG Shuai, <i>et al.</i>	(5152)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory from Domestic Sources in China	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SHEN Guo-feng, <i>et al.</i>	(5162)
Characteristics of Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China from 2011 to 2019	LIU Rui-yuan, ZHONG Mei-fang, ZHAO Xiao-ya, <i>et al.</i>	(5169)
VOCs Emission Inventory and Uncertainty Analysis of Industry in Qingdao Based on Latin Hypercube Sampling and Monte Carlo Method	XU Wan-ying, FU Fei, LÜ Jian-hua, <i>et al.</i>	(5180)
Emission Characteristics and Environment Impacts of VOCs from Typical Rubber Manufacture	WANG Hai-lin, XIN Guo-xing, ZHU Li-min, <i>et al.</i>	(5193)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Different Functional Zones of Shenyang, China	KU Ying-ying, REN Wan-hui, SU Cong-cong, <i>et al.</i>	(5201)
Characteristics of BTEX and Health Risk Assessment During Typical Pollution Episodes in Summer and Winter in Tianjin Urban Area	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, PU Wei-wei, <i>et al.</i>	(5210)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Analysis of the Driving Force in Zhengzhou City	JI Yao, WANG Chen, LU Xuan, <i>et al.</i>	(5220)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of O ₃ Concentrations Based on GAMs Model in Chengdu	ZHANG Ying, NI Chang-jian, FENG Xin-yuan, <i>et al.</i>	(5228)
Spatial Variation Characteristics and Remote Sensing Retrieval of Total Suspended Matter in Surface Water of the Yangtze River	LI Jian-hong, HUANG Chang-chun, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(5239)
Spatial Distribution Characteristics of the Spectrum, Source Analysis, and Nitrogen Response of Dissolved Organic Matter in Summer Rainfall in the Hebei Province	ZHANG Zi-wei, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i>	(5250)
Distribution and Influencing Factors of DOM Components in Urban and Suburban Polluted Rivers	ZHU Yi, CHEN Hao, DING Guo-ping, <i>et al.</i>	(5264)
Composition and Distribution of Microplastics in the Water and Sediments of Urban Rivers in Beijing	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Di, <i>et al.</i>	(5275)
Nontarget Screening and Ecological Risk Assessment of Polar Organic Pollutants in Surface Water on the West Bank of Taihu Lake	LU Xin-yan, WANG Fei, ZHANG Li-min, <i>et al.</i>	(5284)
Optimization of Extraction Methods and Distribution Characteristics of Antibiotics and Metabolites in Sediments of a River Water-Groundwater Interaction Zone	LI Yu-qiong, TONG Lei, YAN Han, <i>et al.</i>	(5294)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Desilting Demonstration Area in Baiyangdian Lake	WANG Tong-fei, ZHANG Wei-jun, LI Li-qing, <i>et al.</i>	(5303)
Dynamic Mechanisms of Groundwater Quality by Residual Contaminants of the Tanghe Wastewater Reservoir in Xiong'an New Area	ZHANG Zhi-xiong, WANG Shi-qin, ZHANG Yi-zhang, <i>et al.</i>	(5312)
Analysis and Prediction of Health Risk from Heavy Metals in Drinking Water Sources Based on Time Series Model	JI Chao, HOU Da-wei, XIE Li, <i>et al.</i>	(5322)
Spatial Distribution, Risk, and Influencing Factors of River Water-Sediment Heavy Metals in the Lower Reaches of the Qianhe River	GAO Yu, WANG Guo-lan, JIN Zi-han, <i>et al.</i>	(5333)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake Basin During the Wet Season	HE Miao, LIU Gui-jian, WU Lei, <i>et al.</i>	(5346)
Impact of Enclosure Culture on Heavy Metal Content in Surface Sediments of Hongze Lake and Ecological Risk Assessment	ZI Xin-yuan, ZHANG Ming, GU Xiao-hong, <i>et al.</i>	(5355)
Natural Water Chemistry Change in the Surface Water of Chengdu and Impact Factors	XU Qiu-jin, LAI Cheng-yue, DING Yao, <i>et al.</i>	(5364)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Groundwater in the Leizhou Peninsula	PENG Hong-xia, HOU Qing-qin, ZENG Min, <i>et al.</i>	(5375)
Land-based Nitrogen Pollution Source Structure and Spatial Distribution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DONG Si-qi, HUANG Chong, <i>et al.</i>	(5384)
Output Characteristics of Nitrogen and Phosphorus from Non-Point Source Pollution of Typical Land Use in a Micro-Watershed in Hilly Red Soil Region	FANG Zhi-da, SU Jing-jun, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i>	(5394)
Effects of Different Fertilization Patterns on Nitrogen Leaching Loss from Paddy Fields Under Reduced Nitrogen	JIANG Hai-bin, ZHANG Ke-qiang, ZOU Hong-tao, <i>et al.</i>	(5405)
Effects of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil Phosphorus Forms in the Jiaozhou Bay Wetland	SHA Meng-qiao, CHAI Na, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i>	(5414)
Contrasting Analysis of Microbial Community Composition in the Water and Sediments of the North Canal Based on 16S rRNA High-Throughput Sequencing	PENG Ke, DONG Zhi, DI Yan-ming, <i>et al.</i>	(5424)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution by Si-modified Peanut Shell Biochar	ZHAO Min, ZHANG Xiao-ping, WANG Liang-rong, <i>et al.</i>	(5433)
Adsorption Characteristics of Pb(II) on Eucalyptus Biochar Modified by Potassium Permanganate	MO Zhen-lin, ZENG Hong-hu, LIN Hua, <i>et al.</i>	(5440)
Preparation of Mixed Metal Oxide/Carbon Composites and Its Adsorption Performance for Pb(II)	LU Yu-shen, ZONG Li, YU Hui, <i>et al.</i>	(5450)
Fabrication of Supported Titanium Xerogel Adsorbent and Performance Evaluation for Arsenite Removal	SUN Ye-yang, ZHOU Chang, GAN Yong-hai, <i>et al.</i>	(5460)
Nitrite Regulation During Start-up of Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	ZUO Fu-min, ZHENG Rui, SUI Qian-wen, <i>et al.</i>	(5472)
Effects of Biochar and Straw Return on Soil Aggregate and Organic Carbon on Purple Soil Dry Slope Land	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i>	(5481)
Response of Soil Organic Carbon Content in Different Slope Positions to Fertilization Management in Purple Soil Sloping Fields	XU Man, YU Luo, WANG Fu-hua, <i>et al.</i>	(5491)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	LAI Shu-ya, DONG Qiu-yao, SONG Chao, <i>et al.</i>	(5500)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Suburban Farmland Soil	ZHANG Xiu-xiu, LU Xiao-li, WEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(5510)
Accumulation Characteristics and Dietary Exposure Estimation of Heavy Metals in Vegetables from the Eastern Coastal Region of China	SUN Shuai, GENG Ning-bo, GUO Cui-cui, <i>et al.</i>	(5519)
Security Risk and Influencing Factors of Agro-Products in Farmland Soil Around a Typical Mining Smelter	HUO Yan-hui, WANG Mei-e, XIE Tian, <i>et al.</i>	(5526)
Cd Pollution and Safe Planting Zoning in Paddy Soils: A Case Study in a District of Chongqing	CAO Shu-zhen, MU Yue, CUI Jing-xin, <i>et al.</i>	(5535)
Characteristics and Influencing Factors of Cadmium Accumulation in Different Rice Varieties Under Cadmium Contaminated Field Conditions	WANG Yu-hao, YANG Li, KANG Yu-chen, <i>et al.</i>	(5545)
Effects of Nano-membrane on Aerobic Composting Process and Odor Emission of Livestock Manure	LI Yong-shuang, SUN Bo, CHEN Ju-hong, <i>et al.</i>	(5554)