

目次

气候变化对中国夏季臭氧影响 ..... 胡安琪, 谢晓栋, 龚康佳, 侯宇晖, 胡建林 (1801)  
基于 EOF 分解和 KZ 滤波的 2019 ~ 2021 年中国臭氧时空变化及驱动因素分析 ..... 王浩琪, 张裕芬, 罗忠伟, 王艳阳, 戴启立, 毕晓辉, 吴建会, 冯银厂 (1811)  
华北工业城市夏季大气臭氧生成机制及减排策略 ..... 郑镇森, 窦建平, 张国涛, 李丽明, 徐勃, 杨文, 白志鹏 (1821)  
2015 ~ 2020 年中国城市 PM<sub>2.5</sub>-O<sub>3</sub> 复合污染时空演变特征 ..... 牛笑笑, 钟艳梅, 杨璐, 易嘉慧, 慕航, 吴倩, 洪松, 何超 (1830)  
2015 ~ 2021 年京津冀及周边地区 PM<sub>2.5</sub> 和臭氧复合污染时空特征分析 ..... 宋小涵, 燕丽, 刘伟, 贺晋瑜, 王亚晨, 黄同林, 李园园, 陈敏, 孟静静, 侯战方 (1841)  
2000 ~ 2020 年中国典型经济区 PM<sub>2.5</sub> 时空变化及其与植被景观格局的关系 ..... 徐勇, 李欣怡, 黄雯婷, 郭振东, 盘钰春, 郑志威, 戴强玉 (1852)  
北京市核心区冬春季大气离子沉降量特征及来源解析 ..... 赵宇, 李贝贝, 黄玉虎, 梁静, 杨洪玲, 秦建平, 朱玲 (1865)  
南京近郊农田大气颗粒物及金属干沉降输入特征 ..... 刘翠英, 靳浩, 樊建凌 (1873)  
西安冬季 PM<sub>2.5</sub> 中不同极性水溶性有机物的污染特征及氧化潜势 ..... 罗玉, 黄沙沙, 张甜, 孙健, 沈振兴 (1882)  
机动车源和民用燃料源颗粒物中有机碳和元素碳的排放特征 ..... 王红磊, 刘思晗, 孙杰娟, 刘焕武, 赵天良, 裴宇僊, 可玥, 武自豪, 刘诗云 (1890)  
伊犁河谷核心区春季 PM<sub>2.5</sub> 组分特征及来源解析 ..... 谷超, 徐涛, 马超, 伊布提哈尔·加帕尔, 郭丽瑶, 李新琪, 杨文 (1899)  
基于高空间分辨率网格的郑州市城镇居民 PM<sub>2.5</sub> 暴露浓度与健康风险变化评估 ..... 李媛, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 王申博, 王克, 张瑞芹 (1911)  
基于多源数据融合的河南省建材行业排放清单 ..... 刘晓, 胡京南, 王红梅, 杨丽, 张皓 (1924)  
开封市城区冬季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 ..... 施雨其, 郑凯允, 丁玮婷, 刘金平, 陈洪光, 高光, 王玲玲, 王楠, 马双良, 郑瑶, 谢绍东 (1933)  
2020 年和 2021 年南京城区臭氧生成敏感性和 VOCs 来源变化分析 ..... 陆晓波, 王鸣, 丁峰, 喻义勇, 张哲海, 胡崑 (1943)  
北京市城区夏季大气 VOCs 变化特征及臭氧生成潜势 ..... 张蕊, 孙雪松, 王裕, 王飞, 罗志云 (1954)  
青岛市臭氧污染与非污染期间 VOCs 化学特征及来源解析 ..... 贾智海, 顾瑶, 孔翠丽, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 吴建会, 刘保双 (1962)  
基于总过氧自由基观测研究合肥市西郊夏季 O<sub>3</sub> 生成特征 ..... 俞辉, 韦娜娜, 徐学哲, 刘芊芊, 姚易辰, 赵卫雄, 张为俊 (1974)  
“大气十条”政策的节能降碳效果评估与创新中介效应 ..... 李少林, 王齐齐 (1985)  
北京市减排协同控制情景模拟和效应评估 ..... 俞珊, 张双, 张增杰, 翟培芝, 刘桐珊 (1998)  
基于不同排放清单的长三角人为 CO<sub>2</sub> 排放模拟 ..... 马心怡, 黄文晶, 胡凝, 肖薇, 胡诚, 张弥, 曹畅, 赵佳玉 (2009)  
武汉汉江水源地水质变化趋势及风险分析 ..... 卓海华, 姜保锋, 徐杰, 陈洁, 陈杰, 兰秀薇, 范文重, 欧阳雪姣, 兰静 (2022)  
长江武汉段水源地典型抗生素及抗性基因污染特征与生态风险评价 ..... 李柏林, 张贺, 王俊, 沙雪妮, 陈晓飞, 卓海华 (2032)  
陕北矿区典型河流多环芳烃的赋存特征、来源及毒性风险分析 ..... 吴喜军, 董颖, 赵健, 刘辉, 张亚宁 (2040)  
典型湖泊有机聚集体时空特征及驱动因子 ..... 谢贵娟, 龚伊, 朱富成, 刘昌利, 卢宝伟, 邓辉, 汤祥明 (2052)  
桂林市不同功能型公园水体微塑料的分布特征及风险评估 ..... 李沛钊, 吴莉, 黄菲菲, 林才霞, 舒小华, 张倩 (2062)  
长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价 ..... 张静, 胡愈忻, 胡圣, 黄杰 (2072)  
环境异质性对三峡库区支流香溪河附石硅藻群落的影响及驱动作用 ..... 纪璐璐, 赵璐, 欧阳添, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李玉鑫, 李佳欣, 施军琼, 吴忠兴 (2083)  
武汉市 3 种类型湖泊浮游植物群落特点及关键影响因素 ..... 张浩坤, 闵奋力, 崔慧荣, 彭雪, 张心怡, 张淑娟, 李竹栖, 葛芳杰, 张璐, 吴振斌, 刘碧云 (2093)  
重金属污染对不同生境中微生物群落结构的影响 ..... 何一凡, 肖新宗, 王佳文 (2103)  
亳清河水体细菌群落的结构和分布特征 ..... 王森, 陈建文, 张红, 李君剑 (2113)  
微塑料暴露对小棒指软珊瑚 (*Sinularia microclavata*) 共附生细菌群落结构和功能的影响 ..... 刘敏, 车文学, 曾映旭, 边伟杰, 吕淑果, 穆军 (2122)  
上海市从源头到龙头的饮用水新型污染物分布特征及健康风险评价 ..... 严棋 (2136)  
铝改性生物炭对水体低浓度氟的吸附特性 ..... 刘艳芳, 高玮, 刘蕊, 尹思婕, 张妙雨, 刘晓帅, 李再兴 (2147)  
典型雌激素在微塑料上的吸附特征及位点能量分布 ..... 刘姜艳, 郑密密, 胡嘉梧, 柳玉荣, 贺德春, 潘杰 (2158)  
面向工业园区废水臭氧氧化深度处理性能评价的模型污染物选择与评估 ..... 辛勃, 单超, 吕路 (2168)  
基于地理探测器和多源数据的耕地土壤重金属来源驱动因子及其交互作用识别 ..... 张宏泽, 崔文刚, 刘绥华, 崔瀚文, 黄月美 (2177)  
基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的煤矸山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析 ..... 马杰, 沈智杰, 张萍萍, 刘萍, 刘今朝, 孙静, 王玲灵 (2192)  
基于蒙特卡罗模拟的铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属健康风险评估 ..... 黄剑波, 姜登登, 温冰, 王磊, 石佳奇, 周艳 (2204)  
基于 BP 神经网络预测北京市加油站周边土壤多环芳烃含量 ..... 马赛炎, 魏海英, 马瑾, 刘奇缘, 吴颐杭, 屈雅静, 田雨欣, 赵文浩 (2215)  
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素时空分布及其风险评估 ..... 赵鑫宇, 陈慧, 赵波, 宋圆梦, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐, 李双江 (2223)  
典型黑色岩系地质高背景区土壤和农产品重金属富集特征与污染风险 ..... 邓帅, 段佳辉, 宁墨兔, 谭林, 蒲刚, 陈际行, 齐小兵, 蒋尚智, 谢桃园, 刘意章 (2234)  
岩溶区不同母质土壤 Cd 地球化学特征及玉米籽实 Cd 含量预测 ..... 戴亮亮, 徐宏根, 巩浩, 彭志刚, 肖凯琦, 吴欢欢, 许青阳, 郭军, 汤媛媛, 张俊 (2243)  
龙岩市不同利用类型土壤及农作物 Pb、Cd 和 As 污染风险与贡献分析 ..... 王蕊, 陈楠, 张二喜 (2252)  
小麦籽粒镉含量影响因素 Meta 分析和决策树分析 ..... 刘娜, 张少斌, 郭欣宇, 宁瑞艳 (2265)  
黄土高原次生林演替过程土壤有机碳库及其化学组成响应特征 ..... 刘涵宇, 刘颖异, 张琦, 封伦, 高起乾, 任成杰, 韩新辉 (2275)  
短期氮磷添加对祁连山亚高山草地土壤呼吸组分的影响 ..... 江原, 甘小玲, 曹丰丰, 赵传燕, 李伟斌 (2283)  
黄河源区斑块退化高寒旱甸土壤微生物多样性对长期封育的响应 ..... 杨鹏年, 李希来, 李成一, 段成伟 (2293)  
不同海拔鳧箭锦鸡儿根际和非根际土壤细菌群落多样性及 PICRUSt 功能预测 ..... 李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏卢璐, 马飞 (2304)  
模拟酸雨及氮沉降对马尾松林土壤细菌群落结构及其多样性的影响 ..... 王楠, 钱少郁, 潘小承, 陈一磊, 白尚斌, 徐飞 (2315)  
磷石膏和碱蓬对盐渍化土壤水盐及细菌群落结构的影响 ..... 刘月, 杨树青, 张万锋, 姜帅 (2325)  
磷渣与化肥配施对稻田土壤微生物群落组成及多样性的影响 ..... 耿和田, 王旭东, 石思博, 叶正钱, 周文晶 (2338)  
增氧对不同秸秆还田稻田田面水养分动态及温室气体排放的影响 ..... 胡锦涛, 薛利红, 钱聪, 薛利祥, 曹国帅 (2348)  
外源褪黑素对梯胁迫下水稻幼苗生长和抗氧化系统的影响 ..... 储玉檀, 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 孙红羽, 黄永春 (2356)  
面向 2035 的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价 ..... 付佩, 兰利波, 陈颖, 郝卓, 邢云翔, 蔡旭, 张春梅, 陈轶嵩 (2365)  
农田土壤微塑料分布、来源和行为特征 ..... 薄录吉, 李冰, 张凯, 马荣辉, 李彦, 王艳芹, 孙斌, 刘月岩 (2375)  
农田土壤除草剂污染的修复技术研究进展 ..... 胡芳雨, 安婧, 王宝玉, 徐明恺, 张惠文, 魏树和 (2384)  
我国黑土地农田土壤除草剂残留特征研究及展望 ..... 李睿, 吴秋梅, 赵归梅, 胡文友, 田康, 黄标, 吴祥为, 刘峰, 赵玉国, 赵永存 (2395)  
《环境科学》征订启事(1910) 《环境科学》征稿简则(1984) 信息(2167, 2191, 2324)

# 伊犁河谷核心区春季 PM<sub>2.5</sub> 组分特征及来源解析

谷超<sup>1,2</sup>, 徐涛<sup>2</sup>, 马超<sup>2</sup>, 伊布提哈尔·加帕尔<sup>3</sup>, 郭丽瑶<sup>1\*</sup>, 李新琪<sup>1,2\*</sup>, 杨文<sup>1</sup>

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 新疆维吾尔自治区生态环境监测总站, 乌鲁木齐 830011; 3. 伊犁哈萨克自治州环境监测站, 伊宁 839300)

**摘要:** 为研究伊犁河谷核心区春季大气细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)中无机元素、水溶性离子和碳组分特征和来源,于2021年4月20~29日在伊犁河谷核心区布设6个环境采样点,对PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子、无机元素和碳组分等51种化学组分进行分析,并使用化学质量平衡(CMB)模型对其来源进行解析。结果表明,采样期间 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化范围介于9~35  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。Si、Ca、Al、Na、Mg、Fe和K等地壳元素占比较高,占PM<sub>2.5</sub>的12%,表明春季PM<sub>2.5</sub>受到明显的扬尘源的影响。富集因子结果表明,Zn、Ni、Cr、Pb、Cu和As元素主要来源于化石燃料燃烧和机动车排放。元素组分的空间分布特征受采样点周边环境的影响,新政府片区受燃煤源的影响较大,故As浓度较高,伊宁市局和第二水厂受机动车影响较大,Sb和Sn浓度较高。PM<sub>2.5</sub>中9种水溶性离子(WSIIs)的浓度占PM<sub>2.5</sub>的33.2%,其中 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 、 $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 和 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 分别为(2.48±0.57)、(1.22±0.75)、(1.18±0.49)和(0.98±0.45)  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,Ca<sup>2+</sup>高同样反映了扬尘源的影响。各采样点 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{SO}_4^{2-})$ 介于0.63~0.85之间,说明伊犁河谷核心区受固定源影响高于移动源,伊宁市局和第二水厂临路受机动车排放尾气影响较大,导致其 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{SO}_4^{2-})$ 较高,伊宁县位于居民区,受散煤燃烧影响较大,故 $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{SO}_4^{2-})$ 值较低。PM<sub>2.5</sub>中 $\rho$ [有机碳(OC)]和 $\rho$ [元素碳(EC)]平均值(范围)分别为5.12  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (4.67~6.25  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )和0.75  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (0.51~0.97  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),伊宁市局两侧临路受机动车尾气影响较大,故该站点OC和EC浓度略高于其他采样点。采用最小比值法计算得到的SOC(二次有机碳)结果显示,新政府片区、第二水厂和伊宁市局SOC浓度高于其他站点。CMB源解析结果显示该区域PM<sub>2.5</sub>主要贡献源为二次颗粒物(33.3%)和扬尘源(17.5%),且二次颗粒物以二次有机碳(16.2%)为主。

**关键词:** 无机元素; 水溶性离子; 碳组分; PM<sub>2.5</sub>; 源解析; 伊犁河谷

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)04-1899-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202202026

## Characteristics and Source Apportionment of PM<sub>2.5</sub> in the Core Area of Ili River Valley in Spring

GU Chao<sup>1,2</sup>, XU Tao<sup>2</sup>, MA Chao<sup>2</sup>, Eptihar·Jappar<sup>3</sup>, GUO Li-yao<sup>1\*</sup>, LI Xin-qi<sup>1,2\*</sup>, YANG Wen<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Ecological Environment Monitoring Centre of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China; 3. Environmental Monitor Station of Ili Kazak Autonomous Prefecture, Yining 839300, China)

**Abstract:** To explore the characteristics and sources of PM<sub>2.5</sub> in the core area of Ili River Valley in spring, a total of 140 PM<sub>2.5</sub> samples were collected at six sampling sites during April 20-29, 2021, and 51 chemical components including inorganic elements, water-soluble ions, and carbon components were analyzed. The results showed that  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  was at a low level during sampling, ranging from 9  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  to 35  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Si, Ca, Al, Na, Mg, Fe, and K were the most abundant elements, accounting for 12% of PM<sub>2.5</sub>, indicating that PM<sub>2.5</sub> was affected by the dust sources in spring. The spatial distribution characteristics of elements depended on the surrounding environments of the sampling sites. The new government area was affected by coal-fired sources, so the value of As concentration was high. Yining Municipal Bureau and the Second Water Plant were greatly affected by motor vehicle sources, so the values of Sb and Sn concentration were higher. The enrichment factor results showed that Zn, Ni, Cr, Pb, Cu, and As were mainly emitted from fossil fuel combustion and motor vehicles. The concentration of water-soluble ions accounted for 33.2% of PM<sub>2.5</sub>. Among them,  $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ ,  $\rho(\text{NO}_3^-)$ ,  $\rho(\text{Ca}^{2+})$ , and  $\rho(\text{NH}_4^+)$  were (2.48±0.57), (1.22±0.75), (1.18±0.49), and (0.98±0.45)  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , respectively. The higher Ca<sup>2+</sup> concentration also reflected the contribution of dust sources. The ratio of  $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{SO}_4^{2-})$  was between 0.63 and 0.85, which indicated that the influence of stationary sources was more important than that of mobile sources. Both Yining Municipal Bureau and the Second Water Plant were affected by motor vehicle exhaust; therefore, their  $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{SO}_4^{2-})$  ratios were high. Yining County was in a residential area, and therefore its  $n(\text{NO}_3^-)/n(\text{SO}_4^{2-})$  ratio was lower. The average  $\rho(\text{OC})$  and  $\rho(\text{EC})$  in PM<sub>2.5</sub> were 5.12  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (4.67-6.25  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) and 0.75  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (0.51-0.97  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), respectively. Yining Municipal Bureau was significantly affected by motor vehicle exhaust from both sides, so the values of OC and EC concentration were slightly higher than those in other sampling sites. The SOC concentration was calculated by the minimum ratio method, and the results showed that the values of SOC concentration in the New Government Area, the Second Water Plant, and Yining Ecological Environment Bureau were higher than those in other sampling sites. The results of the CMB model showed that PM<sub>2.5</sub> in this area mainly came from the contribution of secondary particulate matter and dust sources, which accounted for 33.3% and 17.5%, respectively. Secondary organic carbon (16.2%) was the main contribution source of secondary particulate matter.

**Key words:** inorganic elements; water-soluble ions; carbon components; PM<sub>2.5</sub>; source apportionment; Ili River Valley

收稿日期: 2022-02-08; 修订日期: 2022-07-15

基金项目: 伊犁河谷核心区城市大气污染深度源解析及污染防治对策研究项目

作者简介: 谷超(1981~),男,高级工程师,主要研究方向为大气环境质量监测与评价,E-mail:57901436@qq.com

\* 通信作者,E-mail:guo.liyao@caes.org.cn; 45707398@qq.com

随着社会发展,环境问题日益突出,以 $PM_{2.5}$ (空气动力学当量直径 $\leq 2.5 \mu m$ 的颗粒物)为主的空气污染物受到广泛的关注<sup>[1]</sup>。 $PM_{2.5}$ 由多种复杂的化学成分组成,且 $PM_{2.5}$ 直接或间接吸收太阳辐射,从而影响生态系统并导致气候变化<sup>[2]</sup>。目前关于 $PM_{2.5}$ 的研究主要包括颗粒物测量<sup>[3]</sup>、颗粒物成分特征<sup>[4,5]</sup>、来源解析<sup>[6]</sup>、环境暴露与健康影响<sup>[7-10]</sup>、模型评估及预测<sup>[11]</sup>、排放清单<sup>[12]</sup>和颗粒物减排<sup>[13]</sup>等方面。近年来,京津冀、珠三角、成渝和汾渭平原地区秋冬季 $PM_{2.5}$ 和化学组分如 $SO_4^{2-}$ 和有机物(OM)的浓度平均值均呈下降趋势<sup>[14]</sup>。其中,王彤等<sup>[15]</sup>的研究表明京津冀郊区污染已从燃煤主导的煤烟型污染发展为燃煤和机动车复合型污染,二次颗粒物和交通源是京津冀郊区站点秋冬季 $PM_{2.5}$ 的主要贡献源。江家豪等<sup>[16]</sup>的研究表明有机物(42.3%)和 $SO_4^{2-}$ (17.6%)是深圳 $PM_{2.5}$ 的主要组分,2009~2019年期间 $PM_{2.5}$ 浓度、OM、 $SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$ 和元素碳(EC)浓度呈下降趋势,扬尘源的影响则呈增加趋势。吴明等<sup>[17]</sup>的研究表明 $SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$ 和 $NH_4^+$ 是成都冬季 $PM_{2.5}$ 中最主要的离子,占水溶性离子的85.6%,近年来 $SO_4^{2-}$ 浓度降低显著, $NO_3^-$ 浓度变化不大,OC占 $PM_{2.5}$ 的质量分数为26.8%, $PM_{2.5}$ 主要来源于燃煤源、二次无机污染和扬尘源的贡献。徐丹妮等<sup>[18]</sup>的研究表明受复杂地形及以煤炭为主的能源结构影响,汾渭平原颗粒物超标率居高不下,直到2019年冬季 $PM_{2.5}$ 超标率仍为58.2%,汾渭平原内部地形特征差异对污染物分布有重要影响。目前对于我国西部地区的空气污染研究主要集中在乌昌石区域<sup>[19,20]</sup>和沙尘污染严重的南疆地区<sup>[21]</sup>。针对伊犁河谷核心区开展的大气颗粒物方面研究较少,仅在伊宁市开展过少量研究<sup>[22~24]</sup>。

伊犁河谷位于新疆维吾尔自治区天山山脉西段,三面环山,地理位置 $80^{\circ}09' \sim 84^{\circ}56'E$ , $42^{\circ}14' \sim 44^{\circ}50'N$ 。属于温带大陆性半湿润荒漠气候<sup>[25]</sup>,该地区春季升温快但不稳定,日照充足,蒸发量大,相对湿度较低,容易受扬尘源影响。近年来,伊犁州生产总值呈上升趋势<sup>[26,27]</sup>,但是伊犁州规模以上工业能源消耗以原煤和电力为主<sup>[28]</sup>,高能耗行业煤炭使用量和机动车保有量呈增长趋势<sup>[28,29]</sup>,伊宁市及周边伊宁县、霍城县和察布查尔县组成的伊犁河谷核心区空气质量则呈波动下降趋势<sup>[30]</sup>,因此亟需摸清当地污染来源。本研究于2021年春季在伊犁河谷核心区4个城市同步开展 $PM_{2.5}$ 采样,深入分析了 $PM_{2.5}$ 的浓度水平和化学组分空间分布特征,并基于CMB模型定量解析出伊犁河谷

核心区 $PM_{2.5}$ 的来源,以期为伊犁河谷核心区大气污染防治提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样和分析

伊犁河谷核心区地形整体地势东高西低,本研究共布设6个环境采样点(图1),其中在伊宁市布设3个采样点位,伊宁县、察县和霍城县各布设1个采样点位(表1)。伊宁市局站点东侧和北侧临路,南侧和西侧为居民楼。第二水厂站点北侧为学校,东侧700 m处和南侧500 m处为道路,东北方向1.5 km处有多处施工工地,易受道路移动源和施工扬尘的影响。新政府片区南侧50 m处为分布大量平房区,北侧300 m为双向六车道道路。伊宁县采样点西侧为学校,东、南侧均为居民区。霍城采样点北侧和南侧分别为有裸露土壤的公园和道路,易受到土壤扬尘影响和道路移动源的影响。察县采样点东、北和南侧为居民区,西侧为气象站。6个点位均位于居民区附近,有密集的人类活动和交通流量,是典型的城市点位。

本研究选用康姆德润达公司生产的环境空气颗粒物采样器(LVS,采样流量为 $16.7 L \cdot min^{-1}$ ),按照环境空气颗粒物( $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ )采样器技术要求<sup>[31]</sup>进行 $PM_{2.5}$ 样品采样,采样时间为2021年4月20~29日每日12:00~次日11:00,每次采样23 h。在各采样点位放置2台采样器同步采样,分别用于采集Teflon膜和石英滤膜样品。采样滤膜前后将滤膜放置于百万分之一自动天平系统(德国康姆德润达AWS-1型)在恒温 $[(20 \pm 1) ^\circ C]$ 、恒湿 $[(50 \pm 5) %]$ 条件下平衡24 h后进行称重<sup>[19]</sup>,每片滤膜称量2次取均值,结果精确至 $1 \mu g$ ,并保证二次称量之差不大于 $40 \mu g$ 。根据Teflon膜和石英膜的特性,本研究采用Teflon膜分析元素,石英滤膜分别分析OC、EC和水溶性离子<sup>[32]</sup>。元素分析采用7500a型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,美国Agilent公司)和电感耦合等离子光谱仪(ICP-OES,美国Agilent公司),碳组分采用热光碳分析仪(美国沙漠所DRI Model 2001 A),水溶性离子采用DIONEX ICS-1100型离子色谱仪(美国Thermo公司),具体分析方法见文献<sup>[19,33]</sup>。每测定10个样品至少设置一个平行样,平行样的相对标准偏差 $\leq 20%$ ,每个点位至少设置一组现场空白,每15个样品测定一次实验空白。

### 1.2 源解析模型

受体模型是用源和受体上测量的大气颗粒物的物理化学性质来定量分析污染来源及其贡献值的模

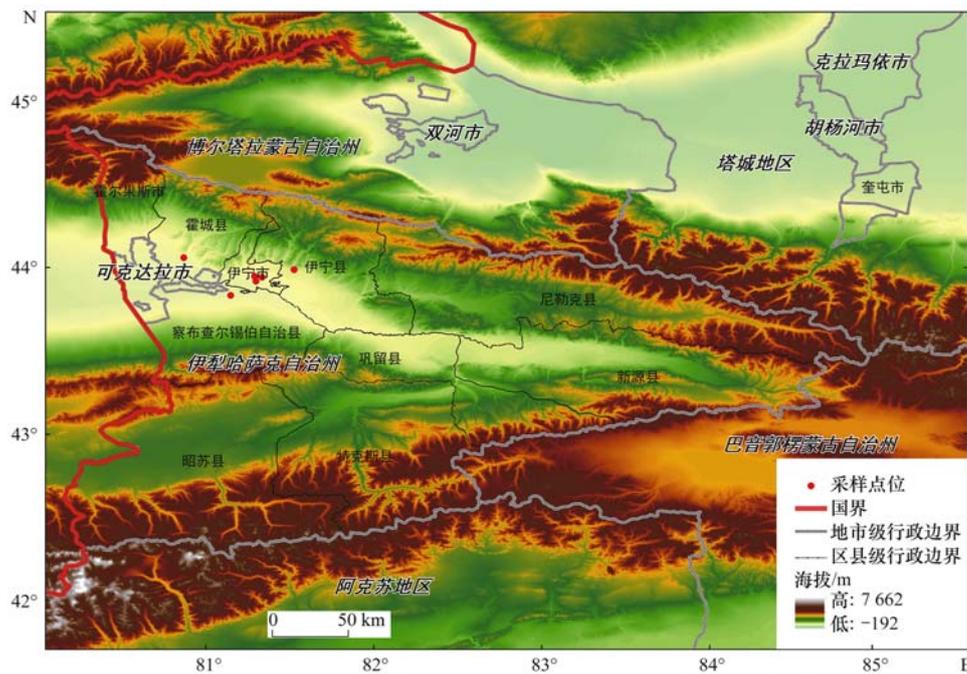


图1 伊犁河谷核心区区域地形示意

Fig. 1 Topographic map of the core area of Ili River Valley

表1 伊犁河谷核心区环境样品采样点

Table 1 Sampling sites of PM<sub>2.5</sub> in the core area of Ili River Valley

区域	点位位置	简称	经度/(°)	纬度/(°)	海拔/m
伊宁市	伊宁市生态环境局	伊宁市局	81.29	43.94	632
伊宁市	第二水厂	第二水厂	81.34	43.94	616
伊宁市	新政府片区	新政府片区	81.30	43.92	593
伊宁县	伊宁县生态环境局	伊宁县	81.52	43.98	740
霍城县	霍城县生态环境局	霍城县	80.87	44.06	601
察布查尔锡伯自治县	察布查尔电视台	察县	81.15	43.83	556

型. 常用的受体模型有正定矩阵因子分解模型 (PMF)、化学质量平衡受体模型 (CMB) 等, 其中 CMB 是由一组线性方程构成的, 每种化学组分的受体浓度等于各种排放源类的成分谱中该化学组分的含量值和各种排放源类对受体的贡献浓度值乘积的线性和<sup>[34]</sup>. 本研究基于 CMB 模型对春季 PM<sub>2.5</sub> 进行来源解析.

## 2 结果与分析

### 2.1 PM<sub>2.5</sub> 浓度的空间分布及成因分析

2021 年春季各采样点 PM<sub>2.5</sub>、气态污染物浓度和气象条件见图 2. 2021 年春季采样期间伊宁市 3 个点位 (伊宁市局、第二水厂和新政府片区)  $\rho(\text{NO}_2)$  平均值 (分别为 25、19 和 20  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 明显高于霍城县 (10  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、察县 (10  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 和伊宁县 (8  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 主要是伊宁市机动车保有量远高于其他 3 县所致. 各点位 SO<sub>2</sub> 浓度平均值差异较小, 受工业锅炉等的影响, 伊宁市点位  $\rho(\text{SO}_2)$  平均值 (6 ~ 7  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 稍高于周边三县 (3 ~ 5  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). 伊犁

河谷核心区平均  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  为 20  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 浓度变化范围介于 9 ~ 35  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  之间, 采样期间 PM<sub>2.5</sub> 日均值均未超《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 日均一级限值 (35  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 部分采样天超出世界卫生组织《环境空气质量标准》<sup>[35]</sup> 中 24 h 限值 (15  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). 伊犁河谷核心城市春季  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  低于北京<sup>[36]</sup> (82  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、上海<sup>[36]</sup> (53  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、成都<sup>[36]</sup> (72  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、沈阳<sup>[36]</sup> (60  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、广州<sup>[36]</sup> (49  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、南京<sup>[37]</sup> (76  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、西安<sup>[38]</sup> (173  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 和杭州西湖景区<sup>[39]</sup> (41  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 春季的水平, 高于西部背景点瓦里关站的浓度水平<sup>[40]</sup> (19  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 表明伊犁河谷核心区 PM<sub>2.5</sub> 受到明显的人为源影响, 但污染较轻. 总体来看, 春季 6 个点位 PM<sub>2.5</sub> 浓度水平较为接近, 日变化规律大体一致, 呈现明显的区域性特征. 分站点来看: 察县和伊宁市局  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  最高 [(22 ± 9)  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和 (22 ± 8)  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ], 随后是新政府片区、第二水厂和霍城县, 伊宁县  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  最低 (18 ± 4)  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 伊宁市局点位浓度较高与该点位靠近主干

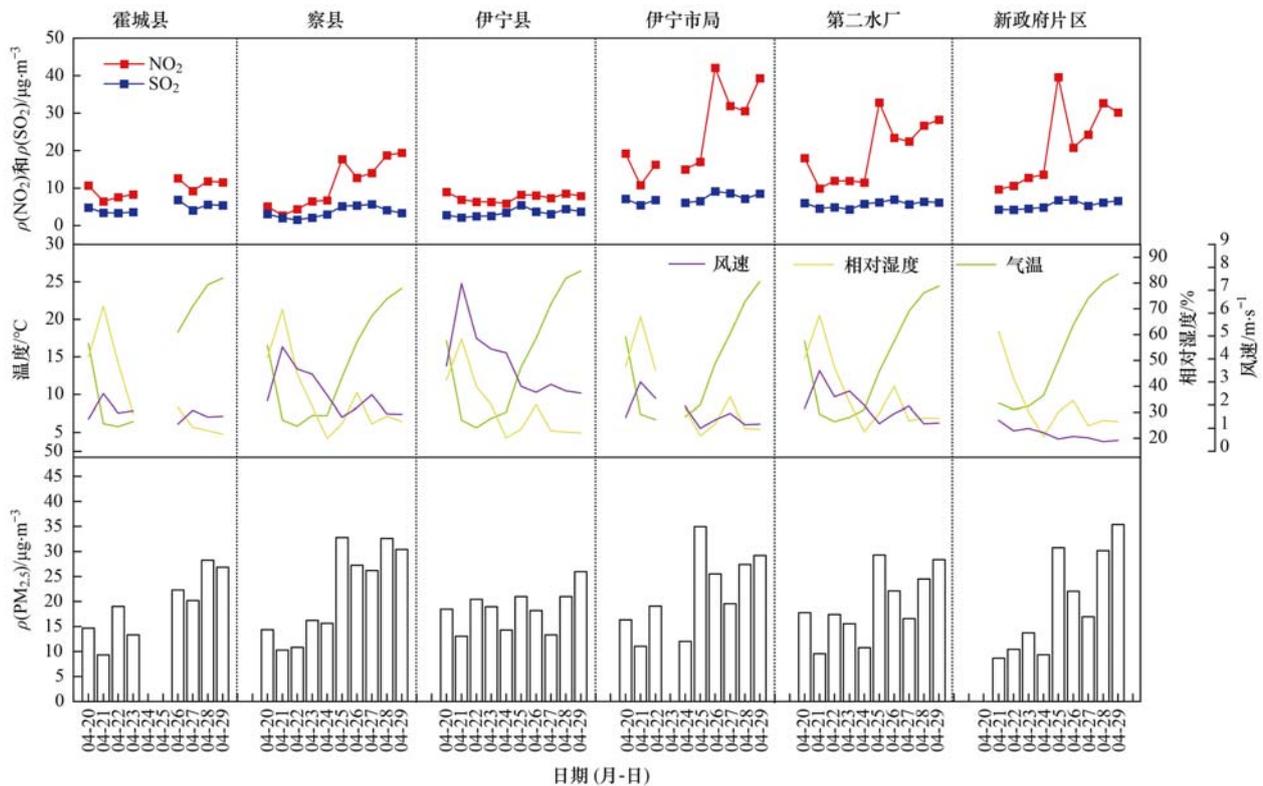


图2 2021年春季各采样点PM<sub>2.5</sub>、气态污染物浓度和气象条件时间序列

Fig. 2 Time series of concentrations of PM<sub>2.5</sub>, gaseous pollutants, and meteorological conditions at sampling sites in spring 2021

道,受机动车及道路扬尘影响较大有关;察县点位浓度较高则主要与该点位位于居民区内,受居民生活源影响较大有关;伊宁县采样期间较低的PM<sub>2.5</sub>浓度可能与该点位采样期间风速较大,利于污染物扩散有关。

## 2.2 颗粒物化学组成特征

### 2.2.1 无机元素

春季伊犁河谷核心区PM<sub>2.5</sub>中39种元素质量和占PM<sub>2.5</sub>的17%。如图3所示,浓度较高的元素为Si、Ca、Al、Na、Mg、Fe和K等地壳元素,这7种元素浓度平均值从大到小为:Si > Ca > Al > Na > Mg > Fe > K,浓度平均值范围介于0.17~0.85 µg·m<sup>-3</sup>之间,7种元素占PM<sub>2.5</sub>的12%,占有所有元素的70%。春季地壳元素浓度较高的特征和独山子(22%)<sup>[41]</sup>、兰州<sup>[42]</sup>(12%~13%)特征一致,反映出这些地区春季受到扬尘源的影响。P、Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、Pb和Ti元素在PM<sub>2.5</sub>中的浓度低于上述元素,平均值范围介于0.0086~0.11 µg·m<sup>-3</sup>之间。V、Co、As、Rb、Sr和Ba等其他微量元素浓度最低,占有所有元素的比重小于1%。

采样点周边环境不同,使得元素组分空间分布存在差异。霍城县、察县、伊宁县、伊宁市局、第二水厂和新政府片区的7种地壳元素在PM<sub>2.5</sub>中占比分别为:19%、13%、18%、15%、15%和18%,霍

城县较高的地壳元素浓度和该采样点附近公园较大面积的裸露土壤有关。La主要来源于道路扬尘再悬浮<sup>[43]</sup>,伊宁市局ρ(La)最高[(0.0068 ± 0.00041) µg·m<sup>-3</sup>],主要是伊宁市局临路所致。Sb和Sn元素主要来自机动车离合器、制动器和轮胎等<sup>[42]</sup>,通常被视为机动车源示踪组分,上述元素在伊宁市局和第二水厂质量浓度较高,主要原因是这两个点位临路,受机动车影响较大。As主要来源于燃煤源<sup>[44]</sup>,伊宁县ρ(As) [(0.0022 ± 0.00066) µg·m<sup>-3</sup>]较高,主要与该站点周围平房居民区燃烧散煤有关。

富集因子(EF)可以区分人为源和自然过程的贡献,计算公式如下<sup>[38]</sup>:

$$EF = (c_i/c_j)_{\text{样品}} / (c_i/c_j)_{\text{土壤}}$$

式中,(c<sub>i</sub>/c<sub>j</sub>)<sub>样品</sub>表示气溶胶中目标元素与参考元素浓度之比,(c<sub>i</sub>/c<sub>j</sub>)<sub>土壤</sub>表示大陆地壳中目标元素与参考元素浓度之比,本研究土壤中地壳元素的浓度参考文献<sup>[45]</sup>,其采用Al来作为参比元素。

本研究选取了前19种浓度较高的元素计算富集因子,图4为各采样点PM<sub>2.5</sub>中19种无机元素的富集因子结果,Zn、Ni、Cr、Pb、Cu和As在6个采样点的富集因子均大于10,表明上述元素受到明显的人为源的影响<sup>[46]</sup>,其中Cr和As富集因子较高和燃煤有关,Pb、Cu和Zn富集因子较高和机动车排

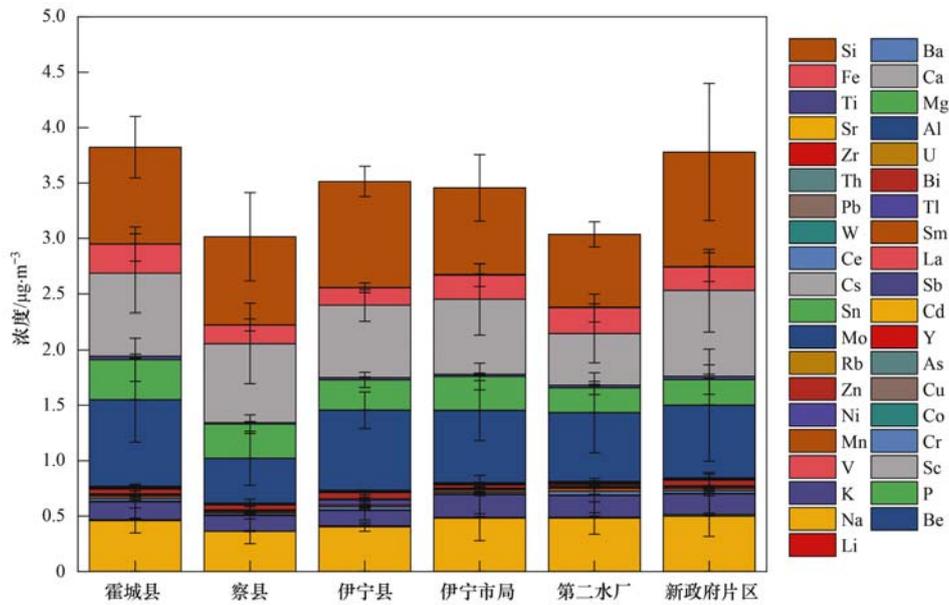


图3 采样期间伊犁河谷 PM<sub>2.5</sub> 中无机元素浓度

Fig. 3 Concentration of metal elements in PM<sub>2.5</sub> in the core area of Ili River Valley during sampling

放有关, Ni 元素富集因子较高和石油燃烧有关<sup>[44]</sup>. Na、Mg、Ca、Al、Fe 和 K 元素富集元素小于 10, 说明这些元素主要来源于自然源. 综上可知, EF 较高的 6 种元素主要来源于化石燃料燃烧和机动车排放. 从空间差异来看, 新政府片区 Cr 和 As 富集因子

均较高, 说明该点位受燃煤源影响较大. 第二水厂 Cu 和 Pb 的富集因子均较高, 说明受机动车源影响较大.

### 2.2.2 水溶性离子

图 5 为春季采样期间各采样点 PM<sub>2.5</sub> 中 9 种水

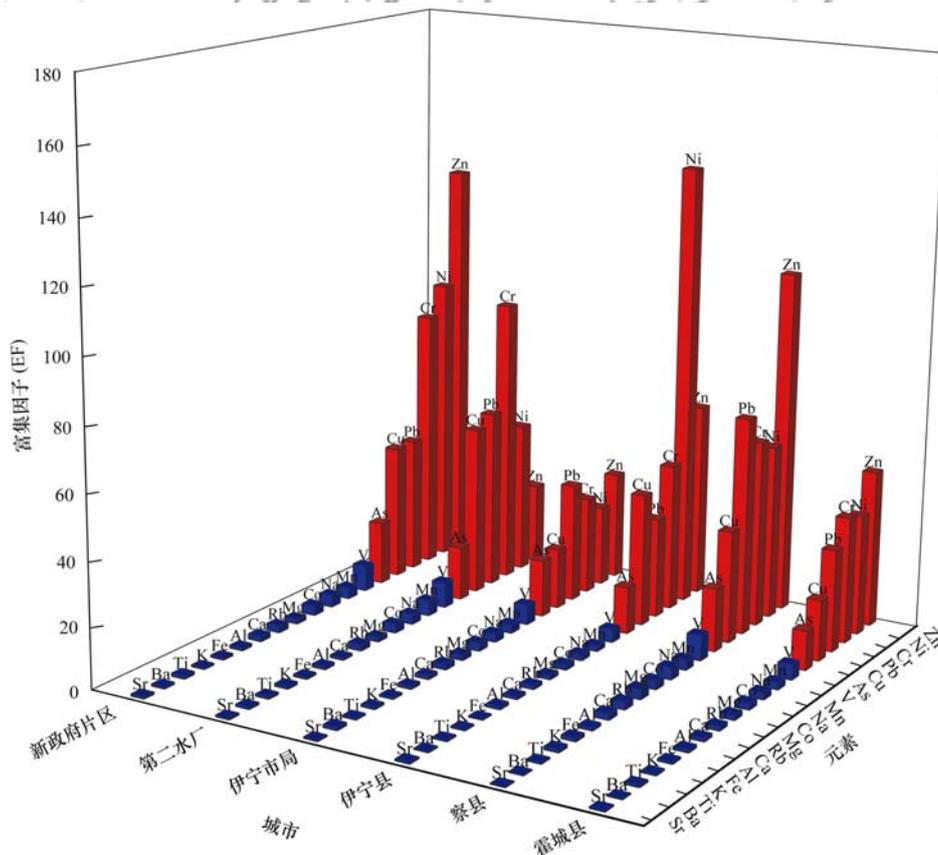


图4 采样期间各采样点 PM<sub>2.5</sub> 中元素富集因子

Fig. 4 Enrichment factor of elements in PM<sub>2.5</sub> at each sampling site

溶性离子(WSIIs)的浓度. WSIIs 占  $PM_{2.5}$  的 33.2%, 该比值低于郑州<sup>[47]</sup> (43.0%).  $SO_4^{2-}$  是浓度最高的离子,  $\rho(SO_4^{2-})$  为  $(2.48 \pm 0.57) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $\rho(NO_3^-)$ 、 $\rho(Ca^{2+})$  和  $\rho(NH_4^+)$  是另外 3 种主要的离子组分, 平均值分别为  $(1.22 \pm 0.75)$ 、 $(1.18 \pm 0.49)$  和  $(0.98 \pm 0.45) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 二次无机离子 SNA ( $NO_3^- + SO_4^{2-} + NH_4^+$ ) 为  $PM_{2.5}$  的主要组成, 占  $PM_{2.5}$  的 23.4%, 占 WSIIs 的 70.6%, 该比值明显低于北京春季<sup>[48]</sup> (86.0%) 和苏州春季<sup>[49]</sup> (89.7%).  $Ca^{2+}$  是扬尘源的典型标志物, 反映出春季  $PM_{2.5}$  受扬尘源的贡献较高<sup>[42]</sup>. 其他水溶性离子浓度 ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 排序为:  $Cl^- (0.35 \pm 0.27) > Na^+ (0.17 \pm 0.10) > K^+ (0.16 \pm 0.08) > Mg^{2+} (0.08 \pm 0.05) > F^- (0.011 \pm 0.0075)$ , 共占  $PM_{2.5}$  的 3.9%.

$n[NO_3^-]/n[SO_4^{2-}]$  常被用作衡量移动源和固定源相对重要性,  $n[NO_3^-]/n[SO_4^{2-}]$  较高说明研究区域为移动源优势区域, 反之则是固定源优势区域<sup>[50,51]</sup>. 本研究中各采样点  $n[NO_3^-]/n[SO_4^{2-}]$  介于 0.63 ~ 0.85 之间, 平均值为 0.76, 低于北京<sup>[52]</sup> (4.13)、成都<sup>[53]</sup> (1.19)、苏州<sup>[49]</sup> (1.88) 和南京<sup>[54]</sup> (1.73), 高于云南芒市<sup>[55]</sup> (0.30), 说明伊犁河谷地区受固定源的影响高于移动源. 其中, 伊宁市局和第二水厂临路受机动车排放尾气影响,  $n[NO_3^-]/n[SO_4^{2-}]$  (0.78 和 0.81) 较高, 伊宁县位于居民区, 受散煤燃烧影响较大, 故  $n[NO_3^-]/n[SO_4^{2-}]$  (0.68) 较低.

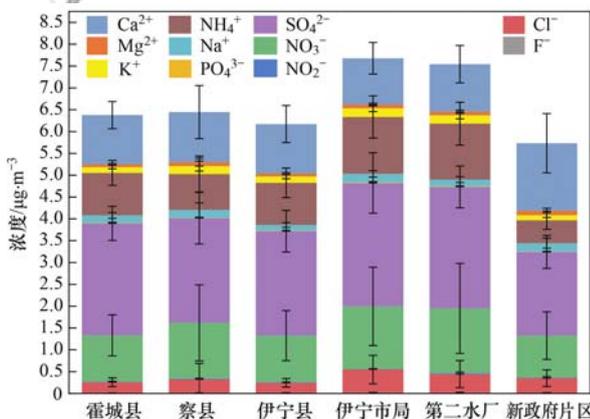


图5 春季伊犁河谷核心区  $PM_{2.5}$  中水溶性离子组分浓度

Fig. 5 Concentrations of water-soluble ions in  $PM_{2.5}$  in the core area of Ili River Valley during sampling

为研究颗粒物中二次颗粒物转化程度, 本研究使用硫酸化率(SOR)和氮氧化率(NOR)来研究  $SO_2$  和  $NO_2$  向硫酸盐和硝酸盐转化的程度, SOR 和 NOR 计算公式参考苏业旺<sup>[56]</sup> 的研究. 伊犁河谷核心区春季 SOR 平均值为  $0.25 \pm 0.08$ , 低于成都<sup>[53]</sup> (0.42) 和北京<sup>[52]</sup> (0.44); NOR 平均值为

$0.07 \pm 0.04$ , 该值低于成都<sup>[53]</sup> (0.16) 和北京<sup>[52]</sup> (0.28). SOR 和 NOR 的值越大, 表明大气中前体物质的二次转化程度越高. 有研究认为, SOR 和 NOR 值大于 0.1 时, 表明存在明显的  $SO_2$  和  $NO_2$  二次转化过程<sup>[56]</sup>, 取值越大, 大气中前体物质的二次转化程度越高, 本研究结果显示, 伊犁河谷核心区存在  $SO_2$  向  $SO_4^{2-}$  的二次转化, 但  $NO_3^-$  二次转化过程相对较弱.

### 2.2.3 碳组分

研究期间伊犁河谷  $PM_{2.5}$  中  $\rho(OC)$  平均值(范围)为  $5.12 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  ( $4.67 \sim 6.25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 低于南京郊区<sup>[54]</sup> [ $(11.66 \pm 3.80) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ], 高于青海瓦里关<sup>[40]</sup> [ $(1.67 \pm 0.47) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ], 在  $PM_{2.5}$  中占比为 25.9% ( $22.3\% \sim 28.7\%$ );  $PM_{2.5}$  中  $\rho(EC)$  为  $0.75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  ( $0.51 \sim 0.97 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 低于南京郊区<sup>[54]</sup> [ $(4.11 \pm 1.91) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ], 高于青海瓦里关春季  $\rho(EC)$  浓度<sup>[40]</sup> [ $(0.21 \pm 0.11) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ], 在  $PM_{2.5}$  中占比为 3.7% ( $2.8\% \sim 4.8\%$ ). 总体来看, 各采样点碳组分浓度差异较小, 伊宁市局 OC 和 EC 浓度略高于其他采样点, 主要与该点位两侧临路受机动车尾气影响较大有关.  $PM_{2.5}$  中 OC 与 EC 相关性较好 ( $n=56$ ,  $r=0.83$ ,  $P<0.01$ ), 表明 OC 和 EC 具有相同的来源<sup>[57]</sup>.

OC/EC 可以指示碳组分来源情况, 由于 EC 主要来自一次排放, 而 OC 除一次来源外, 还可来自大气中化学反应生成的二次有机碳(SOC), 故有研究认为当 OC/EC 大于 2 时, 表明存在 SOC<sup>[58]</sup>. 本研究 OC/EC 介于 3.3 ~ 36.9 之间, 6 采样点平均值为 6.8 (表 2), 说明 6 个采样点均存在二次有机碳的生成. 采用最小比法定量分析颗粒物中的 SOC, 经验公式如下<sup>[59]</sup>:

$$SOC = OC_{tot} - EC \times (OC/EC)_{min}$$

式中,  $OC_{tot}$  为总有机碳,  $(OC/EC)_{min}$  为所观测到的 OC/EC 最小值.

伊犁河谷城市春季  $PM_{2.5}$  中  $\rho(SOC)$  均值(范围)为  $1.81 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  ( $1.22 \sim 2.70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). 其中, 新政府片区  $\rho(SOC)$  最高 ( $2.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 随后为第二水厂、伊宁市局、霍城县和伊宁县, 察县  $\rho(SOC)$  最低 ( $1.22 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). 区域平均 SOC/OC 为 0.35, 新政府片区 SOC/OC 最大 (0.58), 察县比值最小 (0.24), 说明新政府片区二转化较强. 伊宁市局、第二水厂和新政府片区位于伊宁市, 工业企业相对稠密, 此外采样期间 3 个站点风速 ( $1.7$ 、 $1.9$  和  $0.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 较低, 不利于扩散, 导致 SOC 的生成和累积.

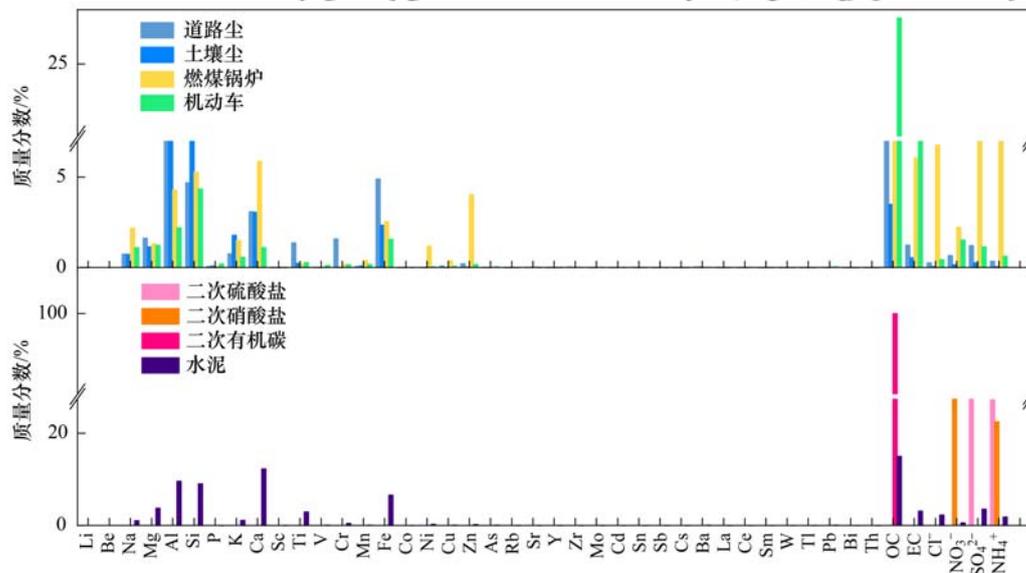
表 2 春季伊犁河谷核心区各采样点 PM<sub>2.5</sub> 中碳组分浓度及质量分数

项目	浓度平均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$				质量分数/%			
	TC	OC	EC	SOC	TC	OC	EC	OC/EC
霍城县	5.19 ± 1.25	4.68 ± 1.08	0.51 ± 0.24	1.48 ± 1.17	28.2	25.4	2.8	9.12
察县	5.73 ± 2.91	5.00 ± 2.48	0.72 ± 0.46	1.22 ± 0.76	25.4	22.3	3.0	6.93
伊宁县	5.53 ± 1.41	4.74 ± 1.25	0.79 ± 0.25	1.34 ± 1.01	29.8	25.5	4.3	6.03
伊宁市局	7.22 ± 2.89	6.25 ± 2.51	0.97 ± 0.41	1.61 ± 0.98	33.1	28.7	4.4	6.42
第二水厂	6.28 ± 2.38	5.36 ± 2.05	0.92 ± 0.39	2.55 ± 0.99	32.5	27.7	4.8	5.80
新政府片区	5.23 ± 2.07	4.67 ± 1.80	0.55 ± 0.33	2.70 ± 0.63	28.5	25.7	2.8	8.45
平均值	5.87 ± 2.28	5.12 ± 1.95	0.75 ± 0.38	1.81 ± 1.07	29.6	25.9	3.7	6.80

### 3 讨论

通过当地污染源普查数据、工业结构产业结构,并结合对组分的分析,确定出当地主要的污染源包括扬尘源、机动车、工业源、燃煤源和二次颗粒物.从伊犁河谷城市 PM<sub>2.5</sub> 污染源化学成分谱可以看出(图 6),道路尘和土壤尘均以 Si、Al、OC、Ca 和 Fe 为主,其中道路尘中 Al 质量分数最高(12.0%),其次

为 OC、Fe、Si 和 Ca; 土壤尘中 Si 质量分数最高(18.1%),随后为 Al、OC、Ca 和 Fe. 燃煤源中组分以 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (20.8%) 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (9.5%) 质量分数最高. 机动车尾气尘以 OC 质量分数最高(27.6%),其次为 EC (14.6%). 水泥尘中 OC(15.0%) 和 Ca(12.2%) 的质量分数较高,Al、Si 和 Fe 质量分数也相对较高. 二次颗粒物(硫酸盐、硝酸盐和有机碳)采用虚拟源谱,使用硫酸铵、硝酸铵和 OC 的成分来代替.

图 6 伊犁河谷核心区 PM<sub>2.5</sub> 污染源化学成分谱Fig. 6 Source profiles of PM<sub>2.5</sub> in the core area of Ili River Valley

污染源成分谱和环境样品成分谱纳入 CMB 模型计算获得伊犁河谷核心区区域和分站点 PM<sub>2.5</sub> 源解析结果(图 7 和图 8). 可以看出: PM<sub>2.5</sub> 主要来自二次颗粒物、扬尘源、燃煤源、机动车尾气源和工业源的贡献,对 PM<sub>2.5</sub> 的贡献率依次为 33.3%、17.5%、14.4%、13.7% 和 11.7%; 二次颗粒物中二次有机碳对 PM<sub>2.5</sub> 的贡献最高(16.2%),其次为二次硫酸盐(10.3%); 扬尘源中道路扬尘的贡献(10.4%)高于土壤尘(7.1%). 与国内其他城市春季源解析结果(表 3)的对比发现: 伊犁河谷核心区二次颗粒物的贡献率和新疆独山子相当,低于北京、

烟台和黄河三角洲国家级自然保护区; 扬尘源贡献率与独山子、黄河三角洲国家级自然保护区、烟台相当,高于北京和武汉,可见伊犁河谷核心区春季受扬尘影响较大. 工业源、机动车、燃煤源和生物质燃烧源的贡献越多,说明受人为影响越大,伊犁河谷核心区人为源一次排放的贡献(40%)和黄河三角洲国家级自然保护区(39%)相当,高于北京和烟台,低于武汉和独山子. 综上所述,伊犁河谷核心区城市受二次颗粒物的影响低于国内大型城市,而扬尘源、工业源、机动车和燃煤源等一次排放源排放的贡献高于国内其他城市.

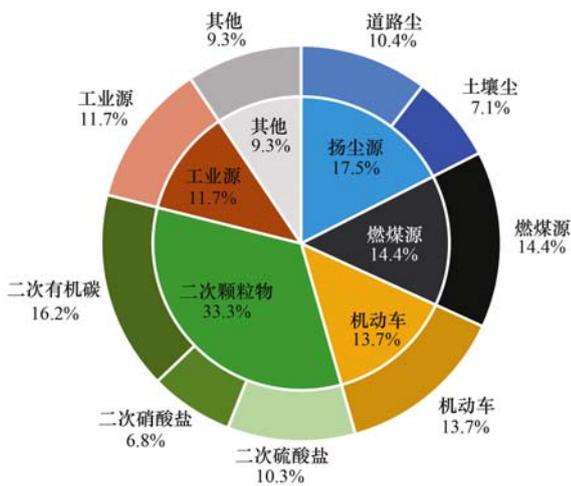


图 7 2021 年春季伊犁河谷核心区  $PM_{2.5}$  来源解析结果

Fig. 7 Source apportionment results of  $PM_{2.5}$  in the core area of Ili River Valley in spring 2021

伊犁河谷核心核心区 6 采样点源解析结果大体一致(图 8),反映出伊犁河谷核心区颗粒物污染呈现出区域污染的特征,而各点位周边环境差异又导致源解析结果出现些微空间差异.二次有机碳和

道路尘为各采样点  $PM_{2.5}$  的主要贡献源,第二水厂和伊宁市局二次有机碳贡献率(18.3%和17.4%)大于其他 4 个站点(13.9%~15.2%).伊宁市局东侧和北侧临路,该站点道路尘贡献率(20.9%)最高;察县采样点位于居民区,受道路尘贡献率(7.9%)最小.燃煤尘和机动车对整个区域  $PM_{2.5}$  的贡献率相当.燃煤源的贡献率在新政府片区最大(19.4%),在霍城县最小(12.7%),新政府片区较高的燃煤源贡献率主要和平房区居民生活燃煤有关.机动车的贡献率以第二水厂和伊宁市局最大(15.6%和15.5%),上述两个站点临路,受道路机动车源影响较大.伊宁县工业源的贡献明显高于其他采样点(17.4%),霍城和察县工业源贡献相对较低.二次硫酸盐的贡献率以伊宁县最高(12.6%),新政府片区最低(6.3%),其余 4 个点位贡献率大小相当(9.1%~11.1%).第二水厂和伊宁市局二次硝酸盐的贡献率(8.9%和7.2%)高于其他 4 个采样点(5.1%~6.9%).土壤尘贡献率(1.0%~7.6%)相对较低,其中,察县和伊宁县贡献率高于其他点位.

表 3 国内其他城市源解析结果

Table 3 Source apportionment in other cities in China

时间	研究区域	模型	来源(贡献率)/%	文献
2019 年,春季	北京	PMF	扬尘源(11) 燃煤源和生物质燃烧(4) 机动车(13) 工业源(6) 二次硝酸盐(45) 二次硫酸盐和二次有机物(19)	[60]
2020 年,春季	武汉	PCA 和随机森林	扬尘源(10) 机动车(22) 工业排放(14) 燃煤和二次源(46) 生物质燃烧(8)	[61]
2017 年,春季	烟台	CMB	城市扬尘源(19.9) 建筑水泥尘(6.3) 燃煤尘(12.5) 移动源(14.2) 二次有机气溶胶(6.1) 二次硫酸盐(9.7) 二次硝酸盐(22.7) 海盐(0.2)	[62]
2011 年,春季	黄河三角洲国家级自然保护区	PMF	扬尘源(16.4) 机动车(8.1) 工业源(11.4) 铜冶炼(5.6) 二次硫酸盐和硝酸盐(44.5) 生物质燃烧(13.8)	[63]
2016 年,春季	独山子	PMF	土壤尘(18.94) 燃煤源(21.35) 机动车(4.76) 工业源(15.43) 二次源(20.68) 生物质(18.85)	[38]

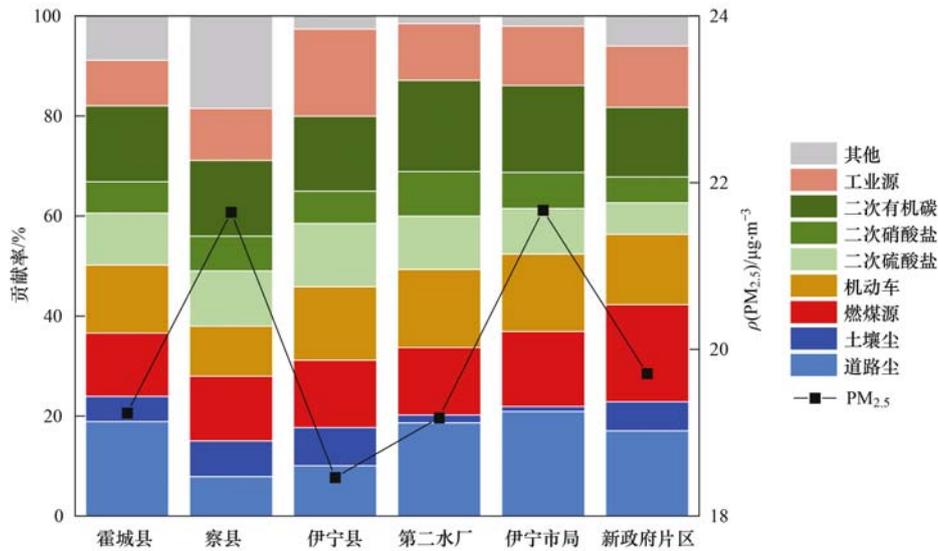


图 8 2021 年春季伊犁河谷核心区各采样点 PM<sub>2.5</sub> 来源解析结果

Fig. 8 Source apportionment results of PM<sub>2.5</sub> at each site in the core area of Ili River Valley in spring 2021

#### 4 结论

(1) 伊犁河谷核心区 PM<sub>2.5</sub> 受到人为源的影响, 但污染较轻, 春季采样期间伊犁河谷  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  变化范围介于  $9 \sim 35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  之间, 平均值为  $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

(2) 伊犁河谷春季受到扬尘源的影响较大, 地壳元素占 PM<sub>2.5</sub> 的 16%。富集因子结果表明 PM<sub>2.5</sub> 受到化石燃料燃烧和机动车排放影响, 新政府片区受燃煤源影响较大, 伊宁市局和第二水厂受机动车源影响较大。

(3)  $n[\text{NO}_3^-]/n[\text{SO}_4^{2-}]$  表明伊犁河谷受固定源的影响高于移动源, 伊宁市局和第二水厂临路受机动车排放尾气影响,  $n[\text{NO}_3^-]/n[\text{SO}_4^{2-}]$  较高, 伊宁县位于居民区, 受散煤燃烧影响较大, 故  $n[\text{NO}_3^-]/n[\text{SO}_4^{2-}]$  较低。SOR 和 NOR 结果表明该区域存在 SO<sub>2</sub> 向 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的二次转化, 但 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 二次转化过程相对较弱。

(4) 伊宁市局 OC 和 EC 浓度略高于其他采样点, 主要与该点位两侧临路受机动车尾气影响较大有关。伊宁市三个站点 SOC 浓度较高, 主要因为伊宁市工业企业相对稠密, 且采样期间三个站点风速较低, 不利于扩散, 导致 SOC 的生成和累积。

(5) 伊犁河谷核心区大气颗粒物污染呈现出区域污染的特征, PM<sub>2.5</sub> 主要来自二次颗粒物和扬尘源的贡献, 贡献率分别为 33.3% 和 17.5%, 燃煤源、机动车源和工业源也有一定的贡献, 贡献率分别为 14.4%、13.7% 和 11.7%。伊犁河谷核心区受二次颗粒物的影响低于国内大型城市, 扬尘源、工业源、机动车和燃煤源等一次排放源排放的贡献高于国内其他城市。

#### 参考文献:

- [1] Li L Y, Yan D Y, Xu S H, *et al.* Characteristics and source distribution of air pollution in winter in Qingdao, eastern China [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **224**: 44-53.
- [2] Mahowald N. Aerosol indirect effect on biogeochemical cycles and climate [J]. *Science*, 2011, **334**(6057): 794-796.
- [3] Hering S, Cass G. The Magnitude of bias in the measurement of PM<sub>2.5</sub> arising from volatilization of particulate nitrate from teflon filters [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1999, **49**(6): 725-733.
- [4] He K B, Yang F M, Ma Y L, *et al.* The characteristics of PM<sub>2.5</sub> in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(29): 4959-4970.
- [5] Sun Y L, Zhuang G S, Tang A H, *et al.* Chemical characteristics of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in haze-fog episodes in Beijing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(10): 3148-3155.
- [6] Viana M, Kuhlbusch T A J, Querol X, *et al.* Source apportionment of particulate matter in Europe: a review of methods and results [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2008, **39**(10): 827-849.
- [7] Maciejewska K. Short-term impact of PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, and PMc on mortality and morbidity in the agglomeration of Warsaw, Poland [J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2020, **13**(6): 659-672.
- [8] Monn C, Becker S. Cytotoxicity and induction of proinflammatory cytokines from human monocytes exposed to fine (PM<sub>2.5</sub>) and coarse particles (PM<sub>10-2.5</sub>) in outdoor and indoor air [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 1999, **155**(3): 245-252.
- [9] 薛凯兵, 李志刚, 魏永杰. 凝血级联活化与大气颗粒物引发心血管疾病关联的研究进展 [J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(8): 2001-2007.
- [10] 吴倩兰, 雷景铮, 王利军. 大学校园室内环境 PM<sub>2.5</sub> 中 PAEs 污染特征及暴露风险 [J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(10):

- 2525-2535.
- Wu Q L, Lei J Z, Wang L J. Pollution characteristics and exposure risks of PAEs in PM<sub>2.5</sub> of indoor environment on university campus [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(10): 2525-2535.
- [11] Chow J C, Watson J G. Review of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> apportionment for fossil fuel combustion and other sources by the chemical mass balance receptor model [J]. *Energy & Fuels*, 2002, **16**(2): 222-260.
- [12] Reff A, Bhave P V, Simon H, *et al.* Emissions inventory of PM<sub>2.5</sub> trace elements across the united states [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(15): 5790-5796.
- [13] Hämmnen O O, Palonen J, Tuomisto J T, *et al.* Reduction potential of urban PM<sub>2.5</sub> mortality risk using modern ventilation systems in buildings [J]. *Indoor Air*, 2005, **15**(4): 246-256.
- [14] 王跃思, 李文杰, 高文康, 等. 2013~2017年中国重点区域颗粒物质量浓度和化学成分变化趋势 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, **50**(4): 453-468.
- Wang Y S, Li W J, Gao W K, *et al.* Trends in particulate matter and its chemical compositions in China from 2013-2017 [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, **62**(12): 1857-1871.
- [15] 王彤, 华阳, 许庆成, 等. 京津冀郊区站点秋冬季大气PM<sub>2.5</sub>来源解析 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1035-1042.
- Wang T, Hua Y, Xu Q C, *et al.* Source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in suburban area of Beijing-Tianjin-Hebei Region in autumn and winter [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1035-1042.
- [16] 江家豪, 彭杏, 朱波, 等. 深圳大气PM<sub>2.5</sub>化学组成的长期变化特征 [J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(2): 574-579.
- Jiang J H, Peng X, Zhu B, *et al.* Long-term variational characteristics of the chemical composition of PM<sub>2.5</sub> in Shenzhen [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(2): 574-579.
- [17] 吴明, 吴丹, 夏俊荣, 等. 成都冬季PM<sub>2.5</sub>化学组分污染特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 76-85.
- Wu M, Wu D, Xia J R, *et al.* Analysis of Pollution characteristics and sources of PM<sub>2.5</sub> chemical components in Chengdu in winter [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 76-85.
- [18] 徐丹妮, 王瑾婷, 袁自冰, 等. 汾渭平原复杂地形影响下冬季PM<sub>2.5</sub>污染分布特征、来源及成因分析 [J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(4): 1184-1198.
- Xu D N, Wang J T, Yuan Z B, *et al.* Temporal-spatial variations, source apportionment, and formation mechanisms of PM<sub>2.5</sub> pollution over Fenwei Plain, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(4): 1184-1198.
- [19] 赵雪艳, 谷超, 杨焕明, 等. 新疆奎独乌区域冬季大气重污染过程PM<sub>2.5</sub>组成特征及来源解析 [J]. *环境科学研究*, 2017, **30**(10): 1515-1523.
- Zhao X Y, Gu C, Yang H M, *et al.* Chemical composition and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> during a winter air pollution episode in the KUI-DU-WU area of Xinjiang Uygur Autonomous region [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, **30**(10): 1515-1523.
- [20] 杨鹏月, 帕丽达·牙合甫. 乌鲁木齐市大气颗粒物中重金属的污染特征及风险水平评价 [J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(12): 2084-2090.
- Yang P Y, Parida Y. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in atmospheric particulates in Urumqi city [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(12): 2084-2090.
- [21] Yu H, Yang W, Wang X H, *et al.* A seriously sand storm mixed air-polluted area in the margin of Tarim Basin: Temporal-spatial distribution and potential sources [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **676**: 436-446.
- [22] 胡锋, 王兴磊, 刘云庆, 等. 伊宁市夏季大气PM<sub>2.5</sub>中多环芳烃污染特征及健康风险评估 [J]. *环境与健康杂志*, 2017, **34**(6): 533-535.
- [23] 胡锋, 王兴磊, 赵晶. 伊宁市夏季PM<sub>2.5</sub>载体多环芳烃污染特征及来源解析 [J]. *常熟理工学院学报*, 2018, **32**(2): 114-118.
- Hu F, Wang X L, Zhao J. An analysis of the pollution characteristics and source identification of the PM<sub>2.5</sub> carrying PAHs in the city of yining in summer [J]. *Journal of Changshu Institute of Technology*, 2018, **32**(2): 114-118.
- [24] 胡锋, 王兴磊, 刘云庆, 等. 伊宁市采暖期PM<sub>2.5</sub>载体主要水溶性无机离子特征分析 [J]. *邵阳学院学报(自然科学版)*, 2018, **15**(6): 71-76.
- Hu F, Wang X L, Liu Y Q, *et al.* Characteristic analysis of main water-soluble inorganic ions in PM<sub>2.5</sub> belt during Heating Period in Yining City [J]. *Journal of Shaoyang University (Natural Science Edition)*, 2018, **15**(6): 71-76.
- [25] 颜瑜严, 杨辽, 王伟胜, 等. 伊犁河谷景观生态风险时空变化及其地形梯度分析 [J]. *生态科学*, 2020, **39**(4): 125-136.
- Yan Y Y, Yang L, Wang W S, *et al.* Analysis of spatial-temporal variation of landscape ecological risk and its terrain gradient in Ili valley [J]. *Ecological Science*, 2020, **39**(4): 125-136.
- [26] 伊宁市人民政府. 伊犁州2019年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. <https://www.cnstats.org/tjgb/202004/ylzylz-2019-tui.html>, 2020-04-19.
- [27] 伊宁市人民政府. 伊犁州2018年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. <https://www.cnstats.org/tjgb/201905/ylzylz-2018-gxa.html>, 2019-05-21.
- [28] 伊犁哈萨克自治州统计局. 2017伊犁哈萨克自治州统计年鉴 [M]. 伊犁: 伊犁哈萨克自治州统计局, 2017.
- [29] 伊犁哈萨克自治州人民政府. 工业能源消费较快增长节能降耗任务依然繁重 [EB/OL]. <http://www.xjyl.gov.cn/xjyl/c112815/201907/c6c25499843a45bf780b36596ec51a9.shtml>, 2019-07-30.
- [30] 新疆维吾尔自治区生态环境厅. 全疆城市空气质量排名 [EB/OL]. [http://sthjt.xinjiang.gov.cn/xjepd/sth#jckpm/common\\_list\\_9.shtml](http://sthjt.xinjiang.gov.cn/xjepd/sth#jckpm/common_list_9.shtml), 2019-06-20.
- [31] HJ 93-2013, 环境空气颗粒物(PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>)采样器技术要求及检测方法[S].
- [32] 杨复沫, 段凤魁, 贺克斌. PM<sub>2.5</sub>的化学物种采样与分析方法 [J]. *中国环境监测*, 2004, **20**(5): 14-20.
- Yang F M, Duan F K, He K B. PM<sub>2.5</sub> speciation sampling and analysis methods [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2004, **20**(5): 14-20.
- [33] 田莎莎, 张显, 卞思思, 等. 沈阳市PM<sub>2.5</sub>污染组分特征及其来源解析 [J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(2): 487-496.
- Tian S S, Zhang X, Bian S S, *et al.* Characteristics of PM<sub>2.5</sub> pollution components and their sources in Shenyang [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(2): 487-496.
- [34] Lee S, Liu W, Wang Y H, *et al.* Source apportionment of PM<sub>2.5</sub>: comparing PMF and CMB results for four ambient monitoring sites in the southeastern United States [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(18): 4126-4137.
- [35] AQG 2021, 全球空气质量指导值(2021) [S].
- [36] Javed M, Bashir M, Zaineb S. Analysis of daily and seasonal variation of fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) for five cities of China [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2021,

- 23(8): 12095-12123.
- [37] 邱晨晨, 宫海星, 于兴娜, 等. 南京江北新区 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子的季节特征和来源解析[J]. 环境科学学报, 2021, 41(5): 1718-1726.  
Qiu C C, Gong H X, Yu X N, *et al.* Seasonal characteristics and source apportionment of water-soluble ions in PM<sub>2.5</sub> of Nanjing Jiangbei New Area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(5): 1718-1726.
- [38] Wang Z, Wang R, Wang J, *et al.* The seasonal variation, characteristics and secondary generation of PM<sub>2.5</sub> in Xi'an, China, especially during pollution events [J]. Environmental Research, 2022, 212, doi: 10.1016/j.envres.2022.113388.
- [39] 沈建东, 周玉强, 王蕴贇, 等. 杭州西湖景区 PM<sub>2.5</sub> 中重金属来源及健康风险评价[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(2): 199-203.  
Shen J D, Zhou Y Q, Wang Y Y, *et al.* Sources and health risk assessment of heavy metals in PM<sub>2.5</sub> of West Lake scenic area in Hangzhou[J]. Environmental Pollution & Control, 2020, 42(2): 199-203.
- [40] 杨毅红, 陶俊, 朱李华, 等. 中国西部背景地区 PM<sub>2.5</sub> 化学组分特征及其对大气散射系数的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(4): 1216-1226.  
Yang Y H, Tao J, Zhu L H, *et al.* Characterization of chemical compositions of PM<sub>2.5</sub> and its impact on scattering coefficients at a background site over Western China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(4): 1216-1226.
- [41] Turap Y, Talifu D, Wang X M, *et al.* Temporal distribution and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> chemical composition in Xinjiang, NW-China[J]. Atmospheric Research, 2019, 218: 257-268.
- [42] Wang Y N, Jia C H, Tao J, *et al.* Chemical characterization and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in a semi-arid and petrochemical-industrialized city, Northwest China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 573: 1031-1040.
- [43] Scotto F, Bacco D, Lasagni S, *et al.* A multi-year source apportionment of PM<sub>2.5</sub> at multiple sites in the southern Po Valley (Italy) [J]. Atmospheric Pollution Research, 2021, 12(11), doi: 10.1016/j.apr.2021.101192.
- [44] Zhai Y B, Liu X T, Chen H M, *et al.* Source identification and potential ecological risk assessment of heavy metals in PM<sub>2.5</sub> from Changsha[J]. Science of the Total Environment, 2014, 493: 109-115.
- [45] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [46] Hsu C Y, Chiang H C, Lin S L, *et al.* Elemental characterization and source apportionment of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in the western coastal area of central Taiwan [J]. Science of the Total Environment, 2015, 541: 1139-1150.
- [47] 杨留明, 王申博, 郝祺, 等. 郑州市 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子特征及来源分析[J]. 环境科学, 2019, 40(7): 2977-2984.  
Yang L M, Wang S B, Hao Q, *et al.* Characteristics and source analysis of water-soluble ions in PM<sub>2.5</sub> in Zhengzhou [J]. Environmental Science, 2019, 40(7): 2977-2984.
- [48] 李欢, 唐贵谦, 张军科, 等. 2017~2018年北京大气 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性无机离子特征[J]. 环境科学, 2020, 41(10): 4364-4373.  
Li H, Tang G Q, Zhang J K, *et al.* Characteristics of water-soluble inorganic ions in PM<sub>2.5</sub> in Beijing during 2017-2018 [J]. Environmental Science, 2020, 41(10): 4364-4373.
- [49] 王念飞, 陈阳, 郝庆菊, 等. 苏州市 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子的季节变化及来源分析[J]. 环境科学, 2016, 37(12): 4482-4489.  
Wang N F, Chen Y, Hao Q J, *et al.* Seasonal variation and source analysis of the water-soluble inorganic ions in fine particulate matter in Suzhou [J]. Environmental Science, 2016, 37(12): 4482-4489.
- [50] Xu H M, Cao J J, Chow J C, *et al.* Inter-annual variability of wintertime PM<sub>2.5</sub> chemical composition in Xi'an, China: evidences of changing source emissions [J]. Science of the Total Environment, 2016, 545-546: 546-555.
- [51] Feng Y L, Chen Y J, Guo H, *et al.* Characteristics of organic and elemental carbon in PM<sub>2.5</sub> samples in Shanghai, China [J]. Atmospheric Research, 2009, 92(4): 434-442.
- [52] 张娟, 王伟, 赵颖. 北京市延庆区 PM<sub>2.5</sub> 中主要水溶性无机离子特征及来源解析[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(2): 173-182.  
Zhang J, Wang W, Zhao Y. Characteristics and source analysis of water-soluble inorganic ions in PM<sub>2.5</sub> in Yanqing District, Beijing [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, 10(2): 173-182.
- [53] 林瑜, 叶芝祥, 杨怀金, 等. 成都市西南郊区春季大气 PM<sub>2.5</sub> 的污染水平及来源解析[J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1629-1638.  
Lin Y, Ye Z X, Yang H J, *et al.* Pollution level and source apportionment of atmospheric particles PM<sub>2.5</sub> in southwest suburb of Chengdu in spring [J]. Environmental Science, 2016, 37(5): 1629-1638.
- [54] 周一鸣, 韩珣, 王瑾瑾, 等. 南京春季北郊地区大气 PM<sub>2.5</sub> 中主要化学组分及碳同位素特征[J]. 环境科学, 2018, 39(10): 4439-4445.  
Zhou Y M, Han X, Wang J J, *et al.* Chemical constitution and carbon isotopic compositions of PM<sub>2.5</sub> in the northern suburb of Nanjing in spring [J]. Environmental Science, 2018, 39(10): 4439-4445.
- [55] 赵丽多, 任丽红, 李军, 等. 云南省昆明市春季 PM<sub>2.5</sub> 水溶性离子特征及来源分析[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(6): 1057-1064.  
Zhao L D, Ren L H, Li J, *et al.* Characteristics and source analysis of water-soluble ions of PM<sub>2.5</sub> during spring in Mang City, Yunnan Province [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(6): 1057-1064.
- [56] 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 等. 华中地区夏季 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子污染特征及来源分析[J]. 环境科学, 2022, 43(2): 619-628.  
Su Y W, Liu W J, Mao Y, *et al.* Characteristics and source analysis of water-soluble inorganic pollution in PM<sub>2.5</sub> during summer in central China [J]. Environmental Science, 2022, 43(2): 619-628.
- [57] Zhang F, Wang Z W, Cheng H R, *et al.* Seasonal variations and chemical characteristics of PM<sub>2.5</sub> in Wuhan, central China [J]. Science of the Total Environment, 2015, 518-519: 97-105.
- [58] Niu Z C, Zhang F W, Chen J S, *et al.* Carbonaceous species in PM<sub>2.5</sub> in the coastal urban agglomeration in the Western Taiwan Strait Region, China [J]. Atmospheric Research, 2013, 122: 102-110.
- [59] 康宝荣, 刘立忠, 刘焕武, 等. 关中地区秋冬季颗粒物二次有机碳的估算[J]. 中国环境科学, 2019, 39(9): 3663-3670.  
Kang B R, Liu L Z, Liu H W, *et al.* Estimation of secondary organic carbon in PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Guanzhong area in autumn and winter [J]. China Environmental Science, 2019, 39(9): 3663-3670.
- [60] 安欣欣, 曹阳, 王琴, 等. 北京城区 PM<sub>2.5</sub> 各组分污染特征及来源分析[J]. 环境科学, 2022, 43(5): 2251-2261.

- An X X, Cao Y, Wang Q, *et al.* Chemical characteristics and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in urban area of Beijing [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2251-2261.
- [61] 张志豪, 陈楠, 祝波, 等. 基于随机森林模型的武汉市城区大气 PM<sub>2.5</sub> 来源解析 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1151-1158.
- Zhang Z H, Chen N, Zhu B, *et al.* Source analysis of ambient PM<sub>2.5</sub> in Wuhan city based on random forest model [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1151-1158.
- [62] 刘童, 王晓军, 陈倩, 等. 烟台市环境受体 PM<sub>2.5</sub> 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<sub>2.5</sub> during four seasons in Yantai city [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1082-1090.
- [63] Yao L, Yang L X, Yuan Q, *et al.* Sources apportionment of PM<sub>2.5</sub> in a background site in the North China Plain [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **541**: 590-598.

## 欢迎订阅 2023 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如工程索引 Ei Compendex;医学索引 MEDLINE; Scopus; 化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA); Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA): Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS);Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;E-mail:hjkk@rcees.ac.cn;网址:www.hjkk.ac.cn

## CONTENTS

Impact of Climate Change on Summer Ozone in China .....	HU An-qi, XIE Xiao-dong, GONG Kang-jia, <i>et al.</i>	(1801)
Spatial-temporal Variation and Driving Factors of Ozone in China from 2019 to 2021 Based on EOF Technique and KZ Filter .....	WANG Hao-qi, ZHANG Yu-fen, LUO Zhong-wei, <i>et al.</i>	(1811)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in an Industrial City in the North China Plain .....	ZHENG Zhen-sen, DOU Jian-ping, ZHANG Guo-tao, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Evolution Characteristics of PM <sub>2.5</sub> -O <sub>3</sub> Compound Pollution in Chinese Cities from 2015 to 2020 .....	NIU Xiao-xiao, ZHONG Yan-mei, YANG Lu, <i>et al.</i>	(1830)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Co-pollution of PM <sub>2.5</sub> and Ozone over BTH with Surrounding Area from 2015 to 2021 .....	SONG Xiao-han, YAN Li, LIU Wei, <i>et al.</i>	(1841)
Spatio-temporal Variation in PM <sub>2.5</sub> Concentration and Its Relationship with Vegetation Landscape Patterns in Typical Economic Zones in China from 2000 to 2020 .....	XU Yong, LI Xin-yi, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i>	(1852)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Ion Deposition During Winter and Spring in the Core Area of Beijing .....	ZHAO Yu, LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1865)
Input Characteristics of Dry Deposition of Atmospheric Particulates and Metals in Farmland in the Suburb of Nanjing .....	LIU Cui-ying, JIN Hao, FAN Jian-ling	(1873)
Pollution Characterizations and Oxidative Potentials of Water-Soluble Organic Matters at Different Polarity Levels in Winter PM <sub>2.5</sub> Over Xi'an .....	LUO Yu, HUANG Sha-sha, ZHANG Tian, <i>et al.</i>	(1882)
Emission Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM <sub>10</sub> and PM <sub>2.5</sub> from Vehicle Exhaust and Civil Combustion Fuels .....	WANG Hong-lei, LIU Si-han, SUN Jie-juan, <i>et al.</i>	(1890)
Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in the Core Area of Ili River Valley in Spring .....	GU Chao, XU Tao, MA Chao, <i>et al.</i>	(1899)
Evaluation of Changes in PM <sub>2.5</sub> Exposure Concentration and Health Risk for Urban Resident in Zhengzhou Based on High Spatial Resolution Grids .....	LI Yuan, XU Yi-fei, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i>	(1911)
Emission Inventory of Building Material Industry in Henan Province Based on Multi-source Data Integration .....	LIU Xiao, HU Jing-nan, WANG Hong-mei, <i>et al.</i>	(1924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Winter in Kaifeng City .....	SHI Yu-qi, ZHENG Kai-yun, DING Wei-ling, <i>et al.</i>	(1933)
Changes in O <sub>3</sub> -VOCs-NO <sub>x</sub> Sensitivity and VOCs Sources at an Urban Site of Nanjing Between 2020 and 2021 .....	LU Xiao-bo, WANG Ming, DING Feng, <i>et al.</i>	(1943)
Variation Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Urban Beijing in Summer .....	ZHANG Rui, SUN Xue-song, WANG Yu, <i>et al.</i>	(1954)
Chemical Characteristics and Source Apportionment for VOCs During the Ozone Pollution Episodes and Non-ozone Pollution Periods in Qingdao .....	JIA Zhi-hai, GU Yao, KONG Cui-li, <i>et al.</i>	(1962)
Characteristics of O <sub>3</sub> Production in the Western Suburb of Hefei in Summer Based on the Observation of Total Peroxy Radical .....	YU Hui, WEI Na-na, XU Xue-zhe, <i>et al.</i>	(1974)
Evaluation of Energy Saving and Carbon Reduction Effect of Air Pollution Prevention and Control Action Plan and Innovation Intermediary Effect .....	LI Shao-lin, WANG Qi-qi	(1985)
Scenario Simulation and Effects Assessment of Co-control on Pollution and Carbon Emission Reduction in Beijing .....	YU Shan, ZHANG Shuang, ZHANG Zeng-jie, <i>et al.</i>	(1998)
Simulation of Anthropogenic CO <sub>2</sub> Emissions in the Yangtze River Delta Based on Different Emission Inventories .....	MA Xin-yi, HUANG Wen-jing, HU Ning, <i>et al.</i>	(2009)
Water Quality Change Trend and Risk Analysis of Wuhan Hanjiang River Water Source .....	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, XU Jie, <i>et al.</i>	(2022)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Resistance Genes in Different Water Sources in the Wuhan Section of the Yangtze River .....	LI Bo-lin, ZHANG He, WANG Jun, <i>et al.</i>	(2032)
Occurrence Characteristics, Sources, and Toxicity Risk Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Typical Rivers of Northern Shaanxi Mining Area, China .....	WU Xi-jun, DONG Ying, ZHAO Jian, <i>et al.</i>	(2040)
Spatio-temporal Characteristics of Organic Aggregates and the Driving Factors in Typical Lakes .....	XIE Gui-juan, GONG Yi, ZHU Fu-cheng, <i>et al.</i>	(2052)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water of Different Functional Parks in Guilin .....	LI Pei-zhao, WU Li, HUANG Fei-fei, <i>et al.</i>	(2062)
Environmental Driving Factors and Assessment on the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae of Six Inflow Rivers in Yangtze River Basin .....	ZHANG Jing, HU Yu-xin, HU Sheng, <i>et al.</i>	(2072)
Influence and Driving of Environmental Heterogeneity on the Epilithic Diatom Community in Xiangxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir Area .....	Ji Lu-lu, ZHAO Lu, OUYANG Tian, <i>et al.</i>	(2083)
Characteristics of Phytoplankton Communities and Key Impact Factors in Three Types of Lakes in Wuhan .....	ZHANG Hao-kun, MIN Fen-li, CUI Hui-rong, <i>et al.</i>	(2093)
Effects of Heavy Metal Pollution on the Structure of Microbial Communities in Different Habitats .....	HE Yi-fan, XIAO Xin-zong, WANG Jia-wen	(2103)
Structure and Distribution Characteristics of Bacterial Community in Boqing River Water .....	WANG Sen, CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, <i>et al.</i>	(2113)
Effects of Microplastic Exposure on the Community Structure and Function of Symbiotic Bacteria in <i>Sinularia microclavata</i> .....	LIU Min, CHE Wen-xue, ZENG Ying-xu, <i>et al.</i>	(2122)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Emerging Contaminants from Raw Water to Drinking Water in Shanghai .....	YAN Qi	(2136)
Adsorption Characteristics of Fluoride in Low-Concentration Water by Aluminum and Zirconium-Modified Biochar .....	LIU Yan-fang, GAO Wei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(2147)
Sorption Characteristics and Site Energy Distribution Theory of Typical Estrogens on Microplastics .....	LIU Jiang-yan, ZHENG Mi-mi, HU Jia-wu, <i>et al.</i>	(2158)
Selection and Evaluation of Model Pollutants for Performance Assessment of Advanced Treatment of Industrial Park Wastewater by Ozonation .....	XIN Bo, SHAN Chao, LÜ Lu	(2168)
Identifying Driving Factors and Their Interacting Effects on Sources of Heavy Metal in Farmland Soils with Geodetector and Multi-source Data .....	ZHANG Hong-ze, CUI Wen-gang, LIU Sui-hua, <i>et al.</i>	(2177)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of Coal Mine Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model .....	MA Jie, SHEN Zhi-jie, ZHANG Ping-ping, <i>et al.</i>	(2192)
Contamination and Probabilistic Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils Around a Lead-Zinc Smelter .....	HUANG Jian-bo, JIANG Deng-deng, WEN Bing, <i>et al.</i>	(2204)
Prediction of PAHs Content in Soil Around Gas Stations in Beijing Based on BP Neural Network .....	MA Sai-yan, WEI Hai-ying, MA Jin, <i>et al.</i>	(2215)
Spatial-temporal Distribution and Risk Assessment of Quinolones Antibiotics in Soil of Shijiazhuang City .....	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, ZHAO Bo, <i>et al.</i>	(2223)
Accumulation and Pollution Risks of Heavy Metals in Soils and Agricultural Products from a Typical Black Shale Region with High Geological Background .....	DENG Shuai, DUAN Jia-hui, NING Mo-huan, <i>et al.</i>	(2234)
Geochemical Characteristics of Cd in Different Parent Soils in Karst Area and Prediction of Cd Content in Maize .....	DAI Liang-liang, XU Hong-gen, GONG Hao, <i>et al.</i>	(2243)
Pollution Risk and Contribution Analysis of Pb, Cd, and As in Soils and Crops Under Different Land Use Types in Longyan City .....	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi	(2252)
Influencing Factors of Cadmium Content in Wheat Grain: A Meta-analysis and Decision Tree Analysis .....	LIU Na, ZHANG Shao-bin, GUO Xin-yu, <i>et al.</i>	(2265)
Response Characteristics of Soil Organic Carbon Pool and Its Chemical Composition During Secondary Forest Succession in the Loess Plateau .....	LIU Han-yu, LIU Ying-yi, ZHANG Qi, <i>et al.</i>	(2275)
Effects of Short-Term Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Respiration Components in a Subalpine Grassland of Qilian Mountains .....	JIANG Yuan, GAN Xiao-ling, CAO Feng-feng, <i>et al.</i>	(2283)
Response of Soil Microbial Diversity to Long-term Enclosure in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Zone of the Yellow River .....	YANG Peng-nian, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i>	(2293)
Diversity and Predictive Functional of <i>Caragana jubata</i> Bacterial Community in Rhizosphere and Non-rhizosphere Soil at Different Altitudes .....	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(2304)
Effects of Simulated Acid Rain and Nitrogen Deposition on Soil Bacterial Community Structure and Diversity in the Masson Pine Forest .....	WANG Nan, QIAN Shao-yu, PAN Xiao-cheng, <i>et al.</i>	(2315)
Effects of Phosphogypsum and <i>Suaeda salsa</i> on the Soil Moisture, Salt, and Bacterial Community Structure of Salinized Soil .....	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(2325)
Effects of Combined Application of Fungal Residue and Chemical Fertilizer on Soil Microbial Community Composition and Diversity in Paddy Soil .....	GENG He-tian, WANG Xu-dong, SHI Si-bo, <i>et al.</i>	(2338)
Effects of Aeration on Surface Water Nutrient Dynamics and Greenhouse Gas Emission in Different Straw Returning Paddy Fields .....	HU Jin-hui, XUE Li-hong, QIAN Cong, <i>et al.</i>	(2348)
Effects of Exogenous Melatonin Treatment on the Growth and Antioxidant System of Rice Seedlings Under Antimony Stress .....	CHU Yu-tan, LI Yan, HUANG Yi-zong, <i>et al.</i>	(2356)
Life Cycle Prediction Assessment of Energy Saving and New Energy Vehicles for 2035 .....	FU Pei, LAN Li-bo, CHEN Ying, <i>et al.</i>	(2365)
Distribution, Sources, and Behavioral Characteristics of Microplastics in Farmland Soil .....	BO Lu-ji, LI Bing, ZHANG Kai, <i>et al.</i>	(2375)
Research Progress on the Remediation Technology of Herbicide Contamination in Agricultural Soils .....	HU Fang-yu, AN Jing, WANG Bao-yu, <i>et al.</i>	(2384)
Research Progress and Prospect of Herbicide Residue Characteristics in Black Soil Region of China .....	LI Rui, WU Qiu-mei, ZHAO Gui-mei, <i>et al.</i>	(2395)