

目次(卷终)

|                                                 |                                                                    |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| 基于气象条件指数的我国重点区域 PM <sub>2.5</sub> 和臭氧复合污染气象影响评估 | 杨欣, 杨元琴, 李红, 高健, 牛军捷, 储王辉, 刘世杰, 陈义珍, 何友江, 赵好希 (6433)               |
| “2+26”城市 PM <sub>2.5</sub> 与气象因子的尺度依存关系及影响因素分析  | 吴舒祺, 金团团, 郑冬阳, 顾杨吻, 赵文吉 (6441)                                     |
| 武汉军运会前后大气 PM <sub>2.5</sub> 化学组分和来源             | 刘世豪, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 祁士华 (6452)                                   |
| 2016~2020 年邯郸市冬季 PM <sub>2.5</sub> 污染特征与来源解析    | 牛红亚, 高娜娜, 鲍晓磊, 胡伟, 胡偲豪, 吴春苗, 马心怡, 纪晓腾, 樊景森, 王金喜 (6463)             |
| 渭南市冬季 PM <sub>2.5</sub> 化学组成及来源解析               | 郭景宁, 李小飞, 余锋, 张蕊, 高月, 杨雯 (6474)                                    |
| 长三角城郊冬季 PM <sub>2.5</sub> 中铵盐的形成过程及来源解析         | 项妍琨, 曹芳, 张雯洪, 范美益, 章炎麟 (6486)                                      |
| 上海城区硝基芳香族化合物的化学组成及特征分析                          | 杨露, 马英歌, 郁建珍, 吴宇航, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 黄成, 童张法 (6495)                    |
| 吕梁市 PM <sub>2.5</sub> 中多环芳烃的来源解析及健康风险评估         | 牟玲, 刘紫叶, 李杨勇, 李雪梅, 李晓帆, 刘添, 冯传阳, 姜辛 (6508)                         |
| 广西背景大气中生物质燃烧对碳质气溶胶组成和吸光性的影响                     | 吴星麒, 曹芳, 洪一航, 邢佳莉 (6518)                                           |
| 南京北郊大气棕碳吸光特性、来源及其季节变化特征                         | 陈星州, 崔世杰, 张运江, 先久坤, 王镜雯, 汪俊峰, 盖鑫磊 (6529)                           |
| 京津冀地区“煤改电”对 PM <sub>2.5</sub> 污染的健康效益评估         | 张茹婷, 陈传敏, 刘松涛, 吴华成, 周卫青, 李朋 (6541)                                 |
| 基于化学损耗修正的青岛胶州市环境 VOCs 来源解析                      | 孔翠丽, 吴雨彤, 顾瑶, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 刘保双 (6551)                             |
| 聊城市城区夏季 VOCs 污染特征及来源解析                          | 李万勇, 黄浩瑜, 王艳振, 朱子博, 王一秋, 高艳珊, 彭娜娜, 伦小秀, 黄亮, 冯如帆, 菅月诚, 王强 (6564)    |
| 基于三维空气质量模型的淄博市臭氧及前体物来源解析                        | 张馨心, 赵秀颖, 黄凌, 薛金, 卞锦婷, 王杨君, 李莉 (6576)                              |
| 中国高温下臭氧抑制事件的时空特征及其影响因素                          | 欧林冲, 陈伟华, 伍永康, 吴乐敏, 王雪梅 (6586)                                     |
| 基于无人机的城市大气细颗粒物与臭氧污染探测与溯源研究进展                    | 曲雅微, 王体健, 袁成, 吴昊 (6598)                                            |
| 京津冀地区机动车细颗粒物污染的健康影响分析                           | 郝永佩, 宋晓伟, 宋晓东, 王京伟, 程鹏 (6610)                                      |
| 中国水泥行业通过 CCUS 技术的减排潜力评估                         | 魏宁, 刘胜男, 魏凤, 李小春 (6621)                                            |
| 钢铁行业生命周期碳排放核算及减排潜力评估                            | 宋晓璐, 杜帅, 邓陈宁, 谢明辉, 沈鹏, 赵慈, 陈忱, 刘晓宇 (6630)                          |
| 珠江三角洲二氧化碳源汇演变特征及驱动因素                            | 胡景心, 沙青娥, 刘慧琳, 张雪驰, 郑君瑜 (6643)                                     |
| 东莞市低碳路径下加速电气化对 CO <sub>2</sub> 和污染物协同减排影响       | 吴乐敏, 陈丙寅, 欧林冲, 白玉洁, 刘可旋, 王伟文, 彭勃, 王雪梅 (6653)                       |
| 县域尺度下长株潭地区城市化与碳排放的关系                            | 刘贤赵, 李阳 (6664)                                                     |
| 城市草坪温室气体排放特征及影响因素                               | 陈丽涵, 刘硕, 林溢, 郭娜, 臧昆鹏, 陈圆圆, 李嘉鑫, 邱珊珊, 卿雪梅, 洪海祥, 蒋凯, 熊浩宇, 方双喜 (6680) |
| 双视角下中国畜牧业甲烷排放的温室效应                              | 刘舒乐, 严薇, 高庆先, 马占云 (6692)                                           |
| 中国典型流域有机磷酸酯的污染特征与风险评估                           | 赵江陆, 路海健, 吕佳佩, 杨江涛, 罗莹, 曹渺, 孙善伟, 郭昌胜, 徐建 (6700)                    |
| 黄河下游悬河段饮用水源地土壤重金属污染、来源及健康风险                     | 彭超月, 任翀, 申浩欣, 王艳锋, 段海静, 王玉龙, 李旭辉, 刘德新, 马建华 (6710)                  |
| 黄河干流沉积物重金属的赋存形态特征及污染评价                          | 王依滴, 欧阳威, 刘连华, 陆中桂 (6720)                                          |
| 土地利用结构与空间格局对鄱阳湖流域中小河流水质的影响                      | 温嘉伟, 王鹏, 黄高翔, 张华, 聂明华, 丁明军, 折远洋 (6728)                             |
| 内蒙古典型湖泊水环境特征及水质评价                               | 王欣远, 潘保柱, 王立新, 刘铁军, 廖梓龙, 韩语, 杨子杰 (6744)                            |
| 锡林河上游雨季降水、河水和地下水转化关系                            | 孙金, 王怡璇, 杨璐, 段利民, 褚少杰, 张桂馨, 张波, 刘廷玺 (6754)                         |
| 西北盐湖流域地下水水化学特征及控制因素                             | 艳艳, 高瑞忠, 刘廷玺, 房丽晶, 王银龙 (6767)                                      |
| 巴里坤-伊吾盆地平原区地下水污染风险评价                            | 刘钰, 曾妍妍, 周金龙, 闫志云, 白凡 (6778)                                       |
| 亚硫酸氢盐强化微量 Fe <sup>2+</sup> 活化过二硫酸盐降解扑热息痛        | 莫茜婷, 聂淑华, 晏彩霞, 丁明军, 陈诗瑶, 聂明华 (6790)                                |
| 污泥生物炭活化过一硫酸盐降解环丙沙星                              | 郑大洋, 邹佳丽, 徐皓, 王滕, 石宇翔, 陈永健, 李彬阳, 王亚宜, 冯沁, 吴敏 (6801)                |
| NaHCO <sub>3</sub> 活化荞麦皮生物炭对碘酸钾的吸附              | 魏红, 赵江娟, 景立明, 钮金芬, 付冉, 董莹 (6811)                                   |
| 竹基 N、P 共掺杂活性炭的制备及其铜离子吸附性能                       | 王贵龙, 刘艳艳, 江荣源, 李思敏, 林冠峰, 卢贝丽, 黄彪, 陈燕丹 (6823)                       |
| 西南高山峡谷区植被变化及影响因素分析                              | 赖金林, 齐实, 崔冉冉, 廖瑞恩, 唐颖, 李鹏 (6833)                                   |
| 生物炭施用对农田土壤团聚体及有机碳影响的整合分析                        | 孟艳, 沈亚文, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (6847)                            |
| 农田土壤碳循环过程及其量化方法                                 | 孙昭安, 朱彪 (6857)                                                     |
| 生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机碳组分的影响                   | 牟芝熠, 沈育伊, 曹杨, 王紫卉, 陈运霜, 滕秋梅, 黄科朝, 毛馨月, 徐广平 (6869)                  |
| 喀斯特地区植被恢复下土壤活性有机碳与碳库管理指数的演变特征                   | 蔡华, 舒英格, 王昌敏, 廖远行, 罗秀龙, 龙慧, 李雪梅 (6880)                             |
| 中国典型抗生素在环境介质中的污染特征与生态风险评估                       | 陈丽红, 曹莹, 李强, 孟甜, 张森 (6894)                                         |
| 基于 MGWR 的土壤 pH 值空间建模及其影响因素分析                    | 赵明松, 陈宣强, 徐少杰, 邱士其, 王世航 (6909)                                     |
| 某燃煤电厂周边农田土壤重金属污染特征及源解析                          | 张军, 李旭, 刘磊玉, 李雨茹 (6921)                                            |
| 重庆典型在产石化场地土壤污染特征及来源解析                           | 张渝蓉, 罗帅, 陈媛, 曹军, 刘斌, 刘元元 (6933)                                    |
| 高垦殖丘陵区不同类型农用地土壤中抗生素抗性基因分布特征                     | 陈瑞, 程建华, 唐翔宇 (6947)                                                |
| 有机肥配施生物炭对果园土壤反硝化微生物和酶活性的影响                      | 邓正昕, 高明, 熊子怡, 王莹燕, 谢军, 王子芳 (6955)                                  |
| 有机肥处理对旱地红壤细菌群落及玉米生产力的影响                         | 林婷婷, 郑洁, 朱国繁, 梁璐, 杨叶钰萍, 刘佳, 徐勤松, 孙波, 蒋瑞琴 (6965)                    |
| 微塑料和镉复合污染对狼尾草根际土壤微生物群落结构和功能的影响                  | 段莉阳, 张玉, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (6973)                         |
| 设施番茄种植年限对土壤理化性质及微生物群落的影响                        | 赵阳阳, 刘银双, 宋瑶, 张晓旭, 贾振华, 黄亚丽 (6982)                                 |
| 3 种氧化剂对焦化场地多环芳烃的修复效果与土著微生物的响应关系                 | 李伟, 王伟伟, 孟祥宇, 孙英杰, 王亚楠, 李书鹏, 杨乐巍, 刘鹏, 刘渊文 (6992)                   |
| 河北省不同盐渍化土壤类型的微生物多样性与种群结构                        | 刘银双, 牛宏进, 赵阳阳, 孙宏勇, 陈晓波, 黄亚丽 (7004)                                |
| 玉米根际微生物氮磷转化的功能基因组学分析                            | 汪香君, 姜美彤, 李森, 倪浩为, 孙波, 梁玉婷 (7014)                                  |
| 外源菌剂联合柠檬酸强化龙葵修复土壤镉污染                            | 王楷, 王丽, 王一钡, 游梦, 梁婷, 邹茸, 范洪黎 (7024)                                |
| 1 株肠杆菌与硫酸盐联合施用对水稻积累镉的影响                         | 张朴心, 姚俊帆, 刘玉玲, 张威宇, 尹雪斐, 铁柏清 (7036)                                |
| 《环境科学》第 44 卷(2023 年)总目录                         | (7045)                                                             |
| 《环境科学》征订启事(6507)                                |                                                                    |
| 《环境科学》征稿简则(6620)                                |                                                                    |
| 信息(6743, 6846, 6856)                            |                                                                    |

# 黄河干流沉积物重金属的赋存形态特征及污染评价

王依滴<sup>1</sup>, 欧阳威<sup>2</sup>, 刘连华<sup>3\*</sup>, 陆中桂<sup>2</sup>

(1. 北京大学环境科学与工程学院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871; 2. 北京师范大学环境学院, 北京 100875; 3. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

**摘要:** 重金属毒性强、在环境中不易降解, 可通过食物链在人体累积, 进而对流域生态环境及人类健康产生严重影响。2019年9月, 沿黄河干流调查了14个断面, 分析了沉积物中6种重金属(As、Cd、Cr、Cu、Pb和Zn)的总量及其赋存形态, 采用地累积指数法、潜在生态风险指数法和风险评价编码法对沉积物重金属污染程度和生物有效性进行风险评价, 采用主成分分析和冗余分析解析了重金属的主要来源。结果发现, 重金属的含量平均值排序为: Cr > Zn > Cu > Pb > As > Cd, 相对于各河段的背景值, Cd的超标率最高, 达到85.7%。沉积物中As、Zn、Pb和Cu均以可氧化态为主, Cd以弱酸溶解态和残渣态为主, Cr则以残渣态为主。As、Cr、Cu、Pb和Zn的生物有效性均表现出上游最低, 中游升高, 下游降低的趋势。风险评价表明Cd是黄河干流污染风险级别最高的元素, 极易对生态环境造成严重的威胁, 应当优先防控, 尤其是干流内蒙古段。PCA和RDA分析揭示了细颗粒泥沙和总有机质对重金属污染的主控作用, 因此在黄河流域应重点防控随土壤侵蚀和泥沙迁移流失的重金属污染。

**关键词:** 黄河; 重金属(HMs); 沉积物; 赋存形态; 污染评价

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)12-6720-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202301095

## Fraction Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of the Yellow River Mainstream

WANG Yi-di<sup>1</sup>, OUYANG Wei<sup>2</sup>, LIU Lian-hua<sup>3\*</sup>, LU Zhong-gui<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 2. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Heavy metals (HMs) are highly toxic and do not easily degrade in the environment. They can accumulate in the human body through the food chain, with serious impacts on the ecological environment and human health. In this study, 14 sampling sites along the mainstream of the Yellow River were investigated, and the total content and chemical fractions of six heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Pb, and Zn) in sediments were analyzed. The geo-accumulation index, potential ecological risk index, and risk assessment coding were used to assess the contamination level and bioavailability of HMs in sediment. Principal component analysis and redundancy analysis were used to identify the main sources of HMs. The results showed that the average content of heavy metals was in the order of Cr > Zn > Cu > Pb > As > Cd. Cd had the highest excess rate relative to the background value of each reach, reaching 85.7%. In the sediments, As, Zn, Pb, and Cu were predominantly in the oxidizable fraction (F3: sulfide and organic matter-bound), Cd was mainly occupied by the acid-soluble (F1: exchangeable and carbonate-bound) and a residual fraction (F4: mineral matrix-bound), and Cr was predominantly in the residual fraction. As, Cr, Cu, Pb, and Zn showed the lowest bioavailability in the upstream, increased in the midstream, and finally decreased in the downstream. The risk assessment showed that Cd, the element with the highest pollution risk level in the Yellow River, was prone to pose a serious threat to the ecological environment and should be prevented and controlled first. The PCA and RDA analyses revealed that fine sediment and total organic matter controlled HMs contamination. Therefore, the prevention and control of soil erosion and sediment migration should be emphasized to control HMs pollution in the Yellow River Basin.

**Key words:** Yellow River; heavy metals (HMs); sediment; chemical fraction; pollution assessment

重金属毒性强、在环境中不易降解, 可以通过食物链在人体累积, 进而对流域生态环境及人类健康产生严重影响<sup>[1,2]</sup>。众所周知, 水体和悬浮颗粒物中的重金属可以通过吸附、络合、絮凝和沉降等过程富集到沉积物中, 在水文环境条件发生变化时重金属又会被重新释放到上覆水中<sup>[3]</sup>。因此, 河床沉积物对河流中的二次污染物的迁移转化过程具有不可忽视的作用<sup>[4]</sup>。国内外相关研究结果表明, 对沉积物中重金属进行赋存形态的分析能更好地评价其潜在生态危害性和可迁移性<sup>[5,6]</sup>。欧共体物质标准局提出的BCR分步提取法因其操作简便、精准度高和稳定性强等特点已被广泛应用于沉积物中重金属形态的分析<sup>[7]</sup>。该方法将重金属的形态分为弱酸

溶解态(F1, 可交换及碳酸盐结合态)、可还原态(F2, 铁锰氧化物结合态)、可氧化态(F3, 有机物及硫化物结合态)和残渣态(F4, 矿物晶体强烈结合态)4部分<sup>[8]</sup>。不同的重金属形态都具有不同的生物化学反应特性, 它们的生物有效性和流动性也存在差异, 因而在水生环境中表现出不同的地球化学行为<sup>[9]</sup>。从沉积物中重金属赋存形态的视角, 探讨重金属的流失机制和来源特征, 对于在流域尺度上制

收稿日期: 2023-01-13; 修订日期: 2023-02-18

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2022M720230); 国家自然科学基金项目(42107394)

作者简介: 王依滴(1992~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为流域重金属迁移转化机制, E-mail: yidiwang@pku.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: liulianhua@caas.cn

定控制策略和方法来管理河流地区的水质是至关重要的<sup>[10]</sup>。

黄河在中国经济发展中起着至关重要的作用, 养育着 1.07 亿人口, 灌溉了 15% 的农田, 对中国国内生产总值的贡献率为 9%<sup>[11]</sup>。作为典型的多沙河流, 黄河近年来吸引了诸多学者开展沉积物中重金属的分布特征和成因的相关研究。Wang 等<sup>[12]</sup>在对黄河口潮间带沉积物的研究中发现, 沉积物粒径和总有机质是影响重金属分布的主要因素。李军等<sup>[13]</sup>发现黄河兰州段表层沉积物以 Cr 污染为主, Cd 和 Ni 污染次之。张倩等<sup>[14]</sup>评估了黄河上游重金属的生态风险, 发现整体上偏低, 其中 Cd 和 As 贡献较大。目前对黄河沉积物重金属的研究多针对于干流的某一河段、支流或河口。尽管王韬轶等<sup>[15]</sup>探讨了黄河全河流沉积物重金属含量的时空分布差异, 但尚未对重金属的赋存形态进行分析。

基于上述背景, 本研究对黄河干流沉积物中 As、Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 含量进行了测定。通过分析黄河干流沉积物中重金属总量和赋存形态的沿程变化格局, 评估重金属的污染程度和环境风险, 解析黄河干流沉积物中重金属的潜在来源, 识别干流重金属地球化学形态的影响因素。以期为黄河流域重金属污染的研究与防治提供基础数据和理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

黄河是亚洲第三大河, 也是中国第二大河。黄河发源于海拔 4 500 m 的青藏高原巴颜喀拉山脉, 从源头延伸至渤海, 呈“几”字型, 横跨中国中部和北部, 全长约 5 464 km<sup>[16]</sup>。黄河流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南和山东这 9 个省(自治区)。从地形上看, 从黄河源头至内蒙古河口镇段, 海拔大于 3 000 m, 主要由山地和高原组成。中游延伸至河南桃花峪段, 该段峡谷众多, 并且流经水土流失严重黄土高原, 泥沙流失量大<sup>[17]</sup>。下游由冲积平原和鲁中丘陵组成, 面积约为  $2.3 \times 10^4$  km<sup>2</sup>, 约占全流域总面积的 9%。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 样品采集与处理

沉积物样品的采集时间为 2019 年 9 月 19 日至 10 月 9 日, 采样为期 20 d, 采样地点位于黄河干流水文站的国控断面, 如图 1 所示。根据水利部黄河水利委员会的相关水文资料, 可以将采样点划分为上游(H01~H05)、中游(H06~H11)和下游(H12~H14)这 3 个河流段进行分析。取样地点的详细位置

信息见表 1。用箱式采样器采集表层沉积物样品, 每个采样点采集的沉积物样品由 3 个平行子样本组成。样品采集后仔细取出上部 0~1 cm 的沉积物, 保存在聚乙烯袋中, 在 4℃ 冰箱内保存并尽快带回实验室进行预处理。取样点选择自然条件相对维持良好, 人为活动干扰较少, 并且基本能够保证相对稳定的沉积过程。样品剔除砾石、根系等杂质后经冷冻干燥、研磨过筛后(100 目)后保存, 以便后续分析。

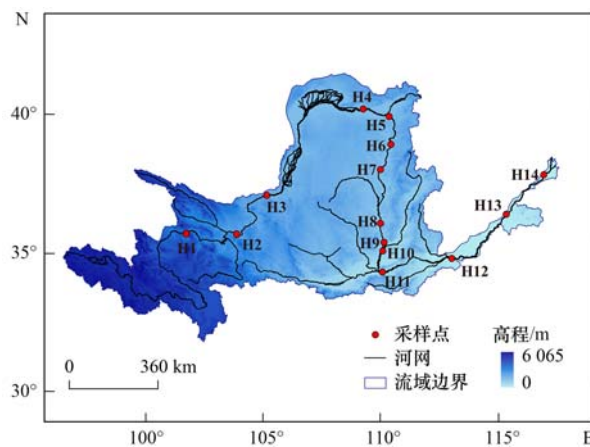


图 1 黄河干流采样点地理位置

Fig. 1 Sampling site locations of the Yellow River mainstream

#### 1.2.2 重金属含量的测定

沉积物样品经  $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$  法<sup>[18]</sup>消解采用电感耦合等离子体发射光谱(ICP-AES)和电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)分别测定重金属(As、Pb、Cu、Zn、Cr)和 Cd 的总量。应用标准物质 (GBW-07402)、试剂空白和平行样品进行全程质量控制。测定结果均在误差允许范围内, 标准物质中各重金属回收率为 96.12%~104.76%。

重金属赋存形态测定: 称取 1 g 沉积物样品, 采用改进的 BCR 连续提取法, 得到重金属的 4 种赋存形态<sup>[19]</sup>, BCR 连续提取法的质量控制为重金属形态含量之和与沉积物中重金属总量相比, 回收率在 93.75%~104.12% 范围内。

#### 1.2.3 沉积物理化性质测定

通过马尔文激光粒度分析仪测定沉积物(黏粒:  $<2 \mu\text{m}$ ; 粉粒:  $2 \sim 63 \mu\text{m}$ ; 沙粒:  $>63 \mu\text{m}$ )的粒度分布。所有干燥沉积物样品均在水浴( $60 \sim 80^\circ\text{C}$ )中用 30%  $\text{H}_2\text{O}_2$  (10~20 mL) 预处理以去除有机物, 并用 10%  $\text{HCl}$  (10~15 mL) 预处理以去除碳酸盐。再用清水离心清洗 2~3 次, 最后经超声振荡完成样品的前处理。

每个沉积物样品(0.5 g)都用 10%  $\text{HCl}$  处理 24 h 以去除无机碳。用蒸馏水清洗每个样品, 直到达到中性 pH 值, 然后在  $60^\circ\text{C}$  下烘箱干燥 24 h。使用 CHN 元素分析仪 (Carlo Erba 1108) 测定总有机碳 (TOC)

表 1 采样点具体信息

Table 1 Detailed information of sampling sites

| 采样点位置 | 采样点编号 | 所属省(自治区) | 纬度(N)/(°) | 经度(E)/(°) |
|-------|-------|----------|-----------|-----------|
| 贵德    | H01   | 青海       | 36.058 9  | 101.450 3 |
| 兰州    | H02   | 甘肃       | 36.077 9  | 103.779 9 |
| 中卫    | H03   | 宁夏       | 37.482 1  | 105.191 6 |
| 包头    | H04   | 内蒙古      | 40.532 1  | 109.922 9 |
| 头道拐   | H05   | 内蒙古      | 40.208 5  | 111.184 8 |
| 皇甫    | H06   | 陕西       | 39.196 4  | 111.184 8 |
| 温家川   | H07   | 陕西       | 38.306 7  | 110.613 7 |
| 吉县    | H08   | 山西       | 36.352 1  | 110.466 2 |
| 龙门    | H09   | 山西       | 35.680 2  | 110.588 3 |
| 渭南    | H10   | 陕西       | 35.370 9  | 110.441 1 |
| 潼关    | H11   | 陕西       | 34.611 2  | 110.454 1 |
| 郑州    | H12   | 河南       | 34.918 7  | 113.638 4 |
| 艾山    | H13   | 山东       | 36.298 7  | 116.332 9 |
| 利津    | H14   | 山东       | 37.547 5  | 118.313 0 |

含量.

使用 ICP-AES 测定消解液中的总元素浓度 (Al、Ca、Fe、Mn 和 P).

1.3 数据分析

1.3.1 数据处理与分析

应用 SPSS 20.0.0 软件包进行本研究的统计检验与分析. 使用 Origin 软件(9.0)生成图形. 采用 RStudio(1.2.1335)和 Canoco® 软件(Windows 4.5)进行 PCA 分析和 RDA 冗余分析, 根据梯度长度 (<3.0), 首先采用 DCA 去趋势分析以确定 RDA 是否可用. 所有数据在 RDA 分析前进行对数转换.

1.3.2 地累积污染指数法

地累积污染指数法是一种用来评价河流沉积物中的重金属污染程度的方法, 由德国科学家 Muller 于 1969 年首次提出<sup>[20]</sup>. 该方法将重金属元素在沉积物中的实测含量与其地球化学背景值相比, 进而尽可能减少岩性变化引起的干扰. 通过地累积污染指数的变化趋势, 从而反映出采样点的沉积特性以及污染来源的变化. 公式如下:

$$I_{geo} = \log_{10} [C_s^i / (k \cdot C_n^i)] \quad (1)$$

式中,  $C_s^i$  为实测的重金属  $i$  的浓度,  $C_n^i$  为沉积物的重金属  $i$  的地球化学背景值. 将黄河上中游河段对应省份的土壤背景值作为沉积物重金属的背景值<sup>[21]</sup>, 并且考虑到下游无支流汇入黄河, 因此下游选取黄土元素重金属背景值作为沉积物重金属背景值<sup>[22]</sup>. 另外, 考虑到成岩作用引起的背景值波动,  $k$  为常数, 取值为 1.5<sup>[23]</sup>. 地累积指数的分级见表 2.

1.3.3 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法 (PERI) 最初是由瑞典科学家 Hakanson 于 1980 年提出的一种用于评估沉积物中重金属污染状况的方法<sup>[24]</sup>. 该方法主要通过使

表 2 地累积指数污染程度的划分标准

Table 3 Classification standard of  $I_{geo}$

| $I_{geo}$ 值 | $I_{geo}$ 分级 | 污染等级  |
|-------------|--------------|-------|
| <0          | 0            | 无污染   |
| 0~1         | 1            | 轻度污染  |
| 1~2         | 2            | 偏中度污染 |
| 2~3         | 3            | 中度污染  |
| 3~4         | 4            | 偏重度污染 |
| 4~5         | 5            | 重度污染  |
| >5          | 6            | 严重污染  |

用毒理学知识来解释重金属元素的环境效应和生态效应, 并考虑不同重金属元素的环境敏感性和毒性等差异, 从而为改善河流水环境提供更准确、科学和合理的参考依据<sup>[25]</sup>.

$$PERI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \cdot C_f^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \cdot C_s^i / C_n^i \quad (2)$$

式中, PERI 为沉积物中重金属  $i$  的潜在生态风险指数.  $E_r^i$  为沉积物中与重金属  $i$  相关的潜在生态风险因子, 是毒性响应因子  $T_r^i$  和污染因子  $C_f^i$  的乘积.  $T_r^i$  为重金属  $i$  的毒性响应系数, 对应重金属 As、Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 的值分别为 10、30、2、5、5 和 1.  $C_f^i$  为重金属  $i$  的污染因子, 是沉积物中重金属含量  $C_s^i$  与重金属背景值  $C_n^i$  的比值, 黄河上中游河段对应省份的土壤背景值作为沉积物重金属的背景值, 下游选取黄土元素重金属背景值作为沉积物重金属背景值. 潜在的生态风险指数具体的划分标准见表 3.

1.3.4 风险评价编码法

风险评价编码法 (RAC) 最初是由意大利科学家 Perin 等<sup>[26]</sup> 提出的根据可交换部分 (F1) 含量评估沉积物中重金属的生物有效性的方法, 沉积物中

表 3 潜在生态风险指数具体划分标准

| Table 3 Classification standard of potential ecological risk |    |         |    |
|--------------------------------------------------------------|----|---------|----|
| 分级(单)                                                        | 标准 | 分级(总)   | 标准 |
| <40                                                          | 低  | <150    | 低度 |
| 40~80                                                        | 中  | 150~300 | 中度 |
| 80~160                                                       | 较重 | 300~600 | 重度 |
| 160~320                                                      | 重  | >600    | 严重 |
| >320                                                         | 严重 |         |    |

重金属的毒性与间隙水中生物可利用的金属组分高度相关,间隙水中自由金属离子的活度主要取决于沉积物水化学和沉积物中酸可溶态重金属的释放风险.其计算公式如下:

$$RAC = \frac{C_{F1}}{C_{tot}} \times 100\% \tag{3}$$

式中,  $C_{F1}$  为沉积物中弱酸溶解态(F1)的含量;  $C_{tot}$  为沉积物中重金属的总含量. RAC 的分级如表 4 所示.

表 4 风险评估编码法等级划分标准

| Table 4 Classification standard of RAC |    |      |
|----------------------------------------|----|------|
| RAC                                    | 分级 | 风险等级 |
| <1%                                    | 1  | 无风险  |
| 1%~10%                                 | 2  | 低风险  |
| 10%~30%                                | 3  | 中等风险 |
| 30%~50%                                | 4  | 高风险  |
| >50%                                   | 5  | 极高风险 |

2 结果与讨论

2.1 黄河干流沉积物重金属总量沿程变化特征

黄河干流表层沉积物样品的重金属上中下游含量存在差异(图 2).  $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Pb})$  和  $\omega(\text{Zn})$  分别为 6.80~11.88、0.10~0.19、39.80~58.07、7.22~15.94、8.32~12.69 和 33.33~61.13  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 平均值分别为 8.29、0.15、47.52、11.78、10.65 和 46.56  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 重金属的含量平均值排序为:  $\text{Cr} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{As} > \text{Cd}$ . 除了 As 受到背景值的影响,在贵德出现最高值以外,上游区域沉积物中 Cd、Cr 和 Pb 均在头道拐(H05)出现最高值.在中游区域,Cr 和 Zn 在渭南(H10)出现最高值.在下游区域,沉积物中重金属含量均在郑州(H12)出现相对高值随后降低.与黄河各河段背景值相比,主要的超标元素为 Cd,超标率为 85.7%.As、Cr 和 Cu 超标率分别为 7.1%、14.3% 和 7.1%,Pb 和 Zn 无超标.

2.2 黄河干流沉积物重金属形态沿程变化特征

为了探讨黄河干流沉积物中重金属的生物可利用性,对干流表层沉积物中 As、Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 的不同形态含量(F1:弱酸溶解态,F2:可还原态,F3:可氧化态,F4:残渣态)进行了分析.如图3所

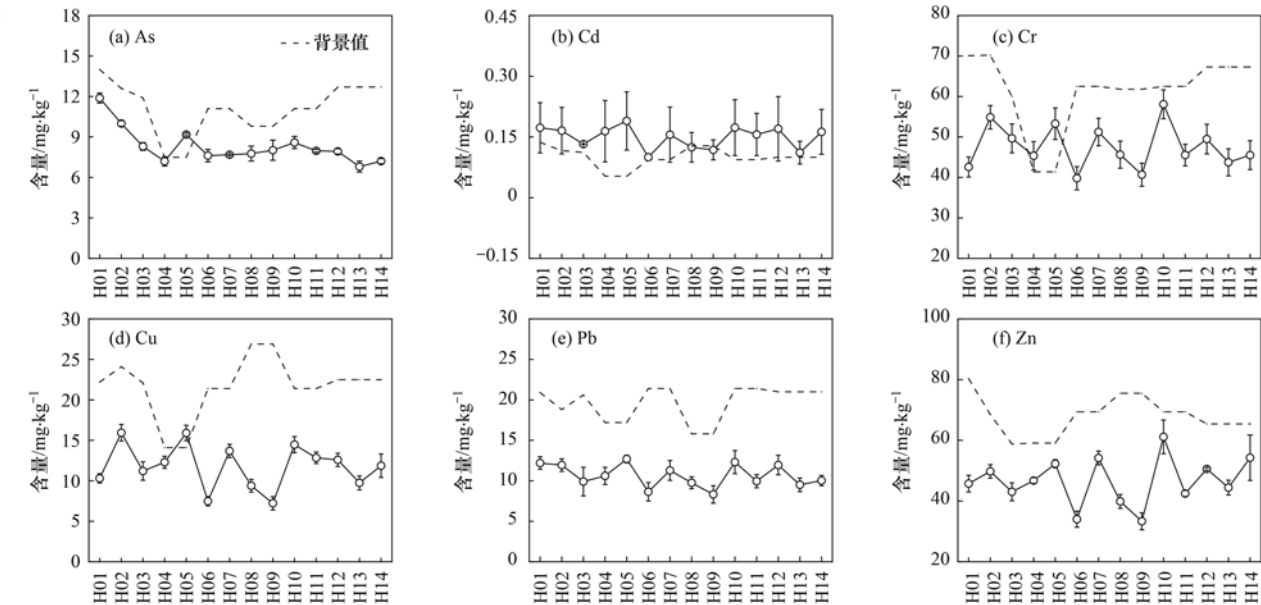


图 2 黄河干流沉积物中重金属含量的沿程变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of heavy metals contents in sediment samples along the Yellow River mainstream

示,不同重金属形态的分布有显著差异(Kruskal-Wallis,  $P < 0.05$ ). F1、F2 和 F3 之和被称为生物有效态,反映出对水生生物较高的潜在生物毒性.黄河干流沉积物重金属中活性态质量分数顺序依次为:  $\text{As} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Cr}$ ,所占质量分数分别为

75.4%、71.2%、60.2%、59.3%、54.4% 和 34.9%.除 Cr 以外,其他重金属的活性态质量分数均较高,应引起广泛重视.其中,As、Zn、Pb 和 Cu 均以 F3(可氧化态)为主,所占质量分数分别为 50.79%、49.6%、39.8% 和 50.15%.可氧化态重金属在强氧

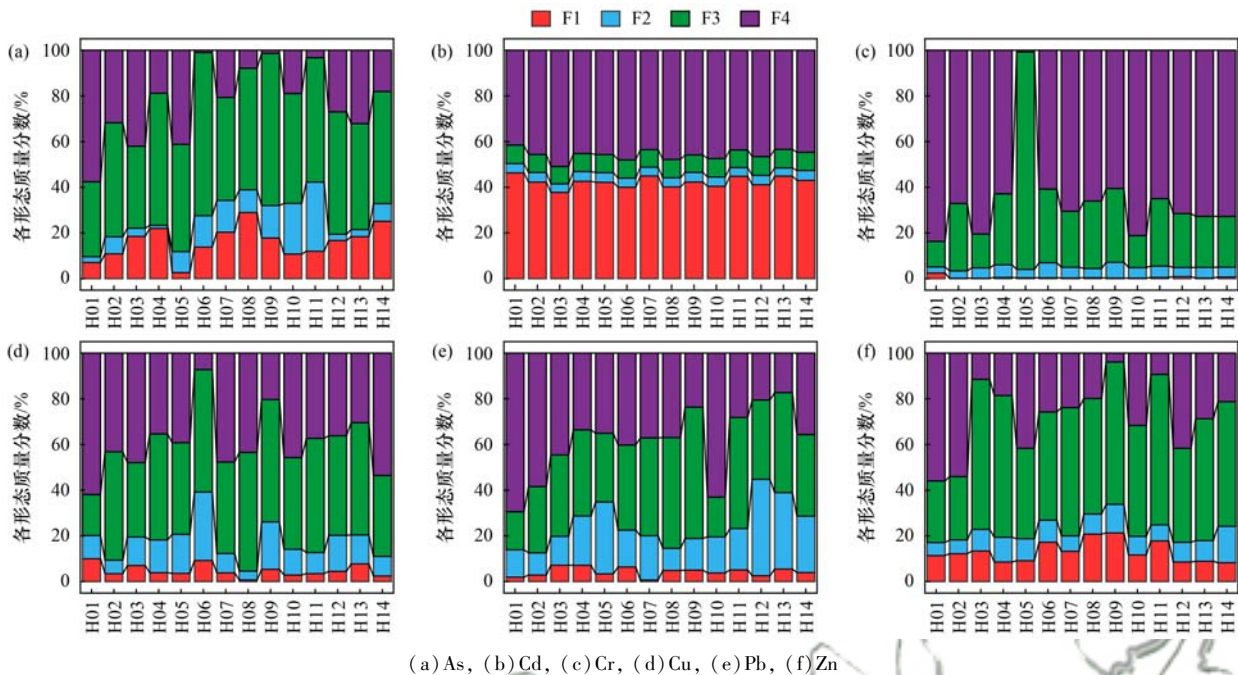


图3 黄河干流沉积物中重金属形态的沿程分布特征

Fig. 3 Fractions of heavy metals in sediment samples along the Yellow River mainstream

化条件下可产生活性,转化为生物可利用态,可能造成对水体的二次污染<sup>[27]</sup>. Cd 则以 F1(弱酸溶解态)和 F4(残渣态)为主,质量分数分别为 42.5% 和 45.6%,主要是由于 Cd 具有较强的活性和主极化能力,随矿物风化进入河流环境后,易被黏土矿物或土壤胶体强烈吸附,这与袁浩等<sup>[28]</sup>在 2004 年对黄河沉积物金属赋存形态的研究结果基本一致. Cr 则以 F4(残渣态)为主(65.1%),表明 Cr 性质稳定,主要分布在原生和次生硅酸盐矿物晶格中,不易迁移和被生物利用,对环境危害较低.从空间上看,As、Cr、Cu、Pb 和 Zn 的生物有效性均表现出上游最低,中游升高,下游降低的趋势.

### 2.3 黄河干流沉积物重金属污染评价

由黄河干流沉积物中重金属地累积指数( $I_{geo}$ )可知[图 4(a)],重金属的  $I_{geo}$  值呈现出 Cu(0.094) > Pb(0.091) > Zn(-0.008) > As(-0.051) > Cd(-0.035) > Cr(-0.358) 的趋势.可以看出黄河干流中游  $I_{geo}$  略高于上游和下游,但总体上处于无~轻

度污染状态,与王韬轶等<sup>[15]</sup>对黄河秋季沉积物的评价结果一致.图 4(b)展示了单一金属潜在生态风险指数( $E_r^i$ )和所有金属的潜在生态风险指数(PERI).  $E_r^i$  平均值依次为: Cd(49.51) > As(7.66) > Cu(2.87) > Pb(2.74) > Cr(1.60) > Zn(0.69). PERI 指数处于 41.60~132.35 范围内,平均值为 65.07,整体处于低度生态风险.其中, Cd 的  $E_r^i$  对 PERI 贡献比例最高,达到了(71%~82%),且在多个采样点达到了中等生态危害( $E_r^i > 40$ ),特别是在包头和头道拐处达到了较重生态风险.由于黄河内蒙段具有丰富的农业和矿产资源,分布有以工业生产为主的包头市和乌海市,还有农业生产为主的河套平原(主要集中在巴彦淖尔市),已有多项研究表明了该河段 Cd 污染较为严重,应加强污染排放治理<sup>[29~31]</sup>.如[图 4(c)]所示,利用风险评价编码法计算得到了各重金属的 RAC 指数.重金属的 RAC 平均值排序为: Cd(42.37%) > As(16.05%) > Zn(12.99%) > Cu(4.85%) > Pb(4.30%) > Cr

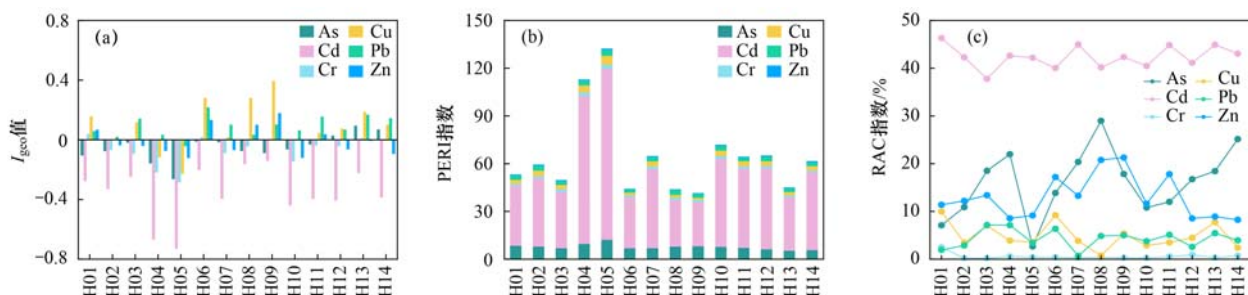


图4 黄河干流沉积物重金属污染评价

Fig. 4 Evaluation of heavy metal pollution in sediments of the Yellow River mainstream

(0.58%). Cd 是黄河干流污染风险级别最高的元素, 和 PERI 评价结果一致. 100% 的采样点 Cd 都处于高风险级别, 具有较高的潜在毒性和生物可利用性, 极易对生态环境造成严重的威胁. As 和 Zn 的风险级别次于 Cd, 处于中等风险级别, 且都在中游出现高值. Cu、Pb 整体呈现低风险级别, 对水体环境的潜在危害较小, Cr 金属以残渣态为主, 生物可利用性低, 属于无风险级别.

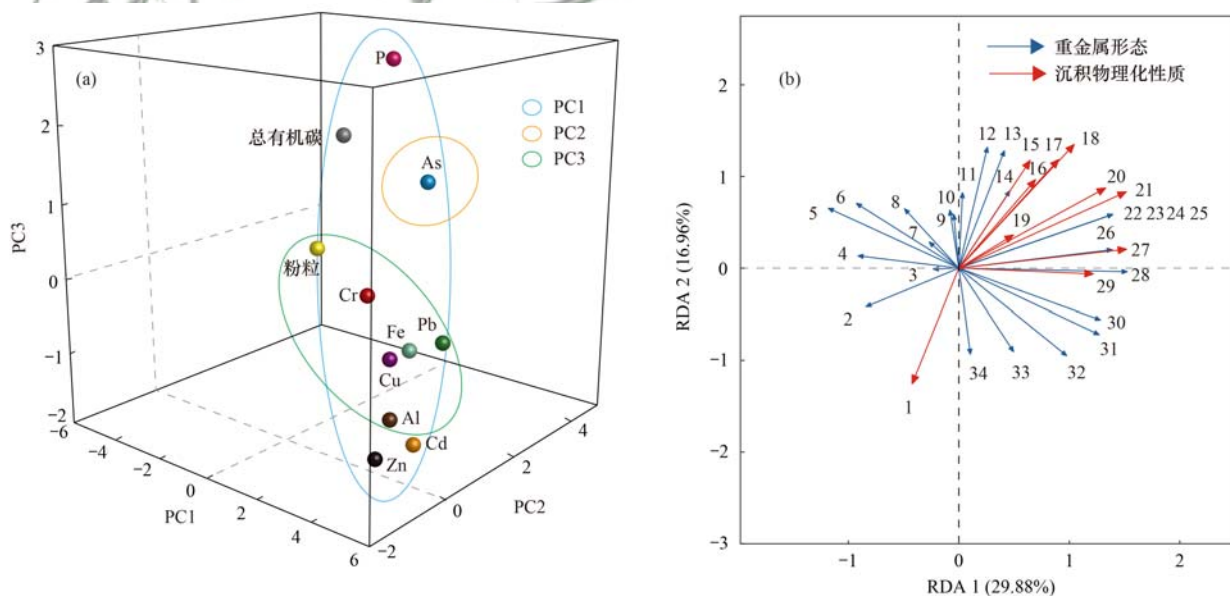
$I_{geo}$  指数评价简便, 仅需重金属的测量值和背景值即可进行评价, 但难以区分自然污染和人为污染. 潜在生态风险指数可以考虑重金属的毒性, 同时顾及背景值的地区差异性, 不足之处是毒性加权系数固定, 缺乏地区水文环境对毒性的影响, RAC 指数法是基于重金属的赋存形态而提出的, 评价重金属的生物可利用性程度和其环境风险较为准确. 由于每种方法都有其优势和局限性, 因此有必要采用多种方法进行河流沉积物重金属的综合评价, 以便相互补充和借鉴, 可以使评价结果更符合河流的实际情况<sup>[32]</sup>.

#### 2.4 黄河干流沉积物重金属来源解析

重金属的污染源是决定沉积物中重金属含量和分布的最重要因素之一<sup>[33]</sup>. 利用主成分分析 (principal component analysis, PCA) 探索了重金属含量与沉积物理化性质参数之间的关系. PCA 的 KMO 值为 0.703 (>0.6), Bartlett 球度检验的相关概率为 0, 表明 PCA 可用于维度分解<sup>[34]</sup>. 主成分分

析结果表明, 重金属的变异性可以用 PC1、PC2 和 PC3 来解释, 其贡献率分别为 67.15%、12.30% 和 10.73%. 以上数据绘制在图 5(a) 中, 以可视化重金属的不同组分. PC1 中的变量比其他组分的变量更为显著, 对 Cr ( $r=0.346$ )、Cu ( $r=0.348$ )、Pb ( $r=0.332$ )、Al ( $r=0.335$ ) 和 Fe ( $r=0.361$ ) 的总含量具有高负荷特征. PC1 表征了 Cr、Cu 和 Pb 的同源性, 与岩石风化、土壤侵蚀等自然过程中沉积物中的组分之间的相关表明了这些金属属于自然来源. PC2 以 As 的负载量为特征 ( $r=0.812$ ), 作为一个相对独立的范畴, 沉积物的组分变量对 As 的影响较小. PC3 以 Cd ( $r=-0.374$ )、Zn ( $r=-0.332$ )、P ( $r=0.595$ ) 和粉粒 ( $r=-0.322$ ) 为特征, 表明 Cd 和 Zn 与沉积物中的磷和粉粒密切相关, PCA3 属于人为来源. 以往的研究均表明 Cd 和 Zn 主要来源于化肥和农药等农业活动以及冶金等工业活动<sup>[35,36]</sup>.

RDA 分析揭示了沉积物物理化学属性与重金属赋存形态之间的相互作用. 在图 5(b) 中, 黄河中大部分金属以可氧化态 (F3) 即硫化物和有机结合态形式存在, As-F3、Cu-F3、Cr-F3 和 Cd-F3 与总有机碳夹角较小表明有机质是黄河干流重金属主要的吸附载体. 重金属离子可以直接被有机质吸附或者通过配位键与有机质络合进行迁移转化<sup>[37]</sup>. 粒径对沉积物比表面积和表面自由能等特征均有重要影响, 进而影响对重金属的吸附、解吸和迁移. 粒径与



1. 粒径, 2. As-F1, 3. Zn-F1, 4. Pb-F1, 5. Cr-F2, 6. Pb-F3, 7. As-F3, 8. Zn-F3, 9. Zn-F2, 10. As-F2, 11. Cu-F2, 12. Cu-F3, 13. Cr-F3, 14. Pb-F2, 15. 粉粒, 16. 总有机碳, 17. Ca, 18. Mg, 19. 黏粒, 20. Al, 21. Fe, 22. Cd-F1, 23. Cd-F2, 24. Cd-F3, 25. Cd-F4, 26. Cu-F4, 27. Mn, 28. Zn-F4, 29. P, 30. Pb-F4, 31. As-F4, 32. Cr-F1, 33. Cu-F1, 34. Cr-F4; 红色箭头与蓝色箭头之间的余弦值表示影响因子与响应变量之间相关性的关系; 箭头的长度越长表示相关性越大, 反之则相关性越小

图 5 沉积物理化性质与重金属总量和形态之间关系的统计分析

Fig. 5 Statistical analysis of the relationship between physical and chemical properties of sediments and the total amount and fractions of heavy metals

多数重金属赋存形态呈现负相关性,表明重金属更倾向于分布于细颗粒物中,表现出沉积粒度效应<sup>[38,39]</sup>.有研究表明,Cd<sup>2+</sup>容易与吸附于细颗粒表面的Ca<sup>2+</sup>发生替代反应,进而与碳酸盐形成金属络合物,这也是Cd的弱酸溶解态(F1)含量偏高的主要原因<sup>[40]</sup>.此外,磷的外源输入很容易与沉积物成分(包括黏粒、碳酸钙和铁氧化物/氢氧化物)发生反应,从而形成相对不溶性的络合物<sup>[41~43]</sup>.因此,残渣态(F4)的金属多数与Fe、Al、Mn和P呈显著正相关,分布在原生或次生稳定矿物中<sup>[44,45]</sup>.综上所述,表明黄河干流中大量细颗粒泥沙的流失是重金属污染的主要途径.

### 3 结论

(1)黄河干流沉积物中重金属的含量平均值排序为:Cr>Zn>Cu>Pb>As>Cd.与背景值相比,主要的超标元素为Cd、As、Cr和Cu.

(2)黄河干流沉积物中As、Zn、Pb和Cu均以可氧化态为主,Cd以弱酸溶解态和残渣态为主,Cr则以残渣态为主.As、Cr、Cu、Pb和Zn的生物有效性均表现出上游最低,中游升高,下游降低的趋势.

(3)Cd是黄河干流污染风险级别最高的元素,具有较高的潜在毒性和生物可利用性,极易对生态环境造成严重的威胁,需要优先管控.

(4)细颗粒泥沙和总有机碳是黄河干流沉积物重金属污染的主控因素.因此,在黄河流域,应重点防控随土壤侵蚀和泥沙迁移流失的重金属污染.

#### 参考文献:

- [1] Qiao P W, Lei M, Yang S C, *et al.* Development of a model to simulate soil heavy metals lateral migration quantity based on SWAT in Huanjiang watershed, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, **77**: 115-129.
- [2] Ouyang W, Wang Y D, Lin C Y, *et al.* Heavy metal loss from agricultural watershed to aquatic system: a scientometrics review [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **637-638**: 208-220.
- [3] 王恩瑞, 张坤峰, 昌盛, 等. 珠海市中部主要供水水库沉积物重金属时空分布与风险评价[J]. *环境科学*, 2023, **44** (1): 189-197.  
Wang E R, Zhang K F, Chang S, *et al.* Spatiotemporal distribution and pollution risk assessment of heavy metals in sediments of main water supply reservoirs in central Zhuhai city [J]. *Environmental Science*, 2023, **44** (1): 189-197.
- [4] Qin Y H, Tao Y Q. Pollution status of heavy metals and metalloids in Chinese lakes: distribution, bioaccumulation and risk assessment [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, **248**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2022.114293.
- [5] Liu B X, Luo J, Jiang S, *et al.* Geochemical fractionation, bioavailability, and potential risk of heavy metals in sediments of the largest influent river into Chaohu lake, China [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **290**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.118018.
- [6] Shi W C, Li T, Feng Y, *et al.* Source apportionment and risk assessment for available occurrence forms of heavy metals in dongdahe wetland sediments, southwest of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **815**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152837.
- [7] 张雅然, 车霏霏, 付正辉, 等. 青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析[J]. *环境科学*, 2022, **43** (6): 3037-3047.  
Zhang Y R, Che F F, Fu Z H, *et al.* Distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Lake Qinghai [J]. *Environmental Science*, 2022, **43** (6): 3037-3047.
- [8] Chakraborty P, Babu P V R, Vudamala K, *et al.* Mercury speciation in coastal sediments from the central east coast of India by modified BCR method[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, **81** (1): 282-288.
- [9] Bastami K D, Neyestani M R, Raeisi H, *et al.* Bioavailability and geochemical speciation of phosphorus in surface sediments of the Southern Caspian Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, **126**: 51-57.
- [10] Wang Y D, Ouyang W, Wang A H, *et al.* Synergistic loss of heavy metal and phosphorus: evidence from geochemical fraction and estuary sedimentation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **416**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125710.
- [11] Miao C Y, Ni J R, Borthwick A G L. Recent changes of water discharge and sediment load in the Yellow River basin, China [J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2010, **34** (4): 541-561.
- [12] Wang Z, Lin K X, Liu X S. Distribution and pollution risk assessment of heavy metals in the surface sediment of the intertidal zones of the Yellow River estuary, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, **174**, doi: 10.1016/j.marpollbul.2021.113286.
- [13] 李军, 李旭, 李开明, 等. 黄河兰州段城市河道表层沉积物重金属空间分布特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2023, **44** (5): 2562-2573.  
Li J, Li X, Li K M, *et al.* Spatial distribution characteristics and source analysis of heavy metals in urban river surface sediments from the Lanzhou reach of the Yellow River [J]. *Environmental Science*, 2023, **44** (5): 2562-2573.
- [14] 张倩, 刘湘伟, 税勇, 等. 黄河上游重金属元素分布特征及生态风险评价[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2021, **57** (2): 333-340.  
Zhang Q, Liu X W, Shui Y, *et al.* Distribution of heavy metals in the upstream of Yellow River and ecological risk assessment [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2021, **57** (2): 333-340.
- [15] 王韬轶, 潘保柱, 韩诤, 等. 黄河沉积物重金属时空分布与污染评价[J]. *环境科学*, 2022, **43** (5): 2467-2475.  
Wang T Y, Pan B Z, Han X, *et al.* Spatial-temporal distribution and pollution assessment of heavy metals in sediments of the Yellow River [J]. *Environmental Science*, 2022, **43** (5): 2467-2475.
- [16] Li X Y, Chen H, Jiang X Y, *et al.* Impacts of human activities on nutrient transport in the Yellow River: the role of the water-sediment regulation scheme [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **592**: 161-170.
- [17] 杨磊, 冯青郁, 陈利顶. 黄土高原水土保持工程措施的生态系统服务[J]. *资源科学*, 2020, **42** (1): 87-95.  
Yang L, Feng Q Y, Chen L D. Ecosystem services of soil and water conservation measures on the Loess Plateau [J]. *Resources Science*, 2020, **42** (1): 87-95.

- [18] Lin C Y, He M C, Zhou Y X, *et al.* Distribution and contamination assessment of heavy metals in sediment of the Second Songhua River, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, **137**(1-3): 329-342.
- [19] Nemati K, Abu Bakar N K, Abas M R, *et al.* Speciation of heavy metals by modified BCR sequential extraction procedure in different depths of sediments from Sungai Buloh, Selangor, Malaysia [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **192**(1): 402-410.
- [20] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. *GeoJournal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [21] 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.
- [22] 田均良, 李雅琦, 陈代中. 中国黄土元素背景值分异规律研究 [J]. *环境科学学报*, 1991, **11**(3): 253-262.  
Tian J L, Li Y Q, Chen D Z. Elemental background variation pattern of loess in China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1991, **11**(3): 253-262.
- [23] 陈林, 马琨, 马建军, 等. 宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态风险评价及来源解析 [J]. *环境科学*, 2023, **44**(1): 356-366.  
Chen L, Ma K, Ma J J, *et al.* Risk Assessment and sources of heavy metals in farmland soils of yellow river irrigation area of Ningxia [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(1): 356-366.
- [24] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [25] Zhong X, Chen Z W, Li Y Y, *et al.* Factors influencing heavy metal availability and risk assessment of soils at typical metal mines in Eastern China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **400**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123289.
- [26] Perin G, Craboledda L, Lucchese M, *et al.* Heavy metal speciation in the sediments of northern Adriatic Sea. A new approach for environmental toxicity determination [A]. In: Lakkas TD (Ed.). *Heavy Metals in the Environment* [M]. Edinburgh: CEP Consultants, 1985. 454-456.
- [27] 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 1002-1009.  
Lin C Q, Hu G R, Yu R L, *et al.* Speciation and ecological risk of heavy metals in surface sediments from Jiulong River [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 1002-1009.
- [28] 袁浩, 王雨春, 顾尚义, 等. 黄河水系沉积物重金属赋存形态及污染特征 [J]. *生态学杂志*, 2008, **27**(11): 1966-1971.  
Yuan H, Wang Y C, Gu S Y, *et al.* Chemical forms and pollution characteristics of heavy metals in Yellow River sediments [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, **27**(11): 1966-1971.
- [29] 伯英, 罗立强. 内蒙古巴彦淖尔地区环境中砷的分布特征 [J]. *环境与健康杂志*, 2010, **27**(8): 696-699.  
Bo Y, Luo L Q. Distribution characteristics of arsenic in environment of Bayannaoer, Inner Mongolia [J]. *Journal of Environment and Health*, 2010, **27**(8): 696-699.
- [30] 乌云, 朝伦巴根, 李畅游, 等. 乌梁素海表层沉积物营养元素及重金属空间分布特征 [J]. *干旱区资源与环境*, 2011, **25**(4): 143-148.  
Wu Y, Chao L B G, Li C Y, *et al.* The spatial distribution characteristics of nutrient elements and heavy metals in surface sediments of lake Wuliangsuhai [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, **25**(4): 143-148.
- [31] 郝建秀. 黄河上游底泥重金属的空间分布与环境风险评价研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
- Hao J X. Spatial distribution and environmental risk assessment of heavy metals in sediment of the upstream Yellow River [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.
- [32] 王永华, 李晓光, 金相灿. 沉积物重金属污染评价——以巢湖龟山区为例 [J]. *中国环境监测*, 2007, **23**(6): 52-56.  
Wang Y H, Li X G, Jin X C. The estimation of heavy metals in sediments in the east area of Chaohu [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2007, **23**(6): 52-56.
- [33] Zhang L X, Zhu G Y, Ge X, *et al.* Novel insights into heavy metal pollution of farmland based on reactive heavy metals (RHMs): pollution characteristics, predictive models, and quantitative source apportionment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, **360**: 32-42.
- [34] Tolosana-Delgado R, McKinley J. Exploring the joint compositional variability of major components and trace elements in the Tellus soil geochemistry survey (Northern Ireland) [J]. *Applied Geochemistry*, 2016, **75**: 263-276.
- [35] Liang G N, Zhang B, Lin M, *et al.* Evaluation of heavy metal mobilization in creek sediment: influence of RAC values and ambient environmental factors [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **607-608**: 1339-1347.
- [36] Khan K, Lu Y L, Khan H, *et al.* Health risks associated with heavy metals in the drinking water of Swat, northern Pakistan [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(10): 2003-2013.
- [37] Clemente R, Bernal M P. Fractionation of heavy metals and distribution of organic carbon in two contaminated soils amended with humic acids [J]. *Chemosphere*, 2006, **64**(8): 1264-1273.
- [38] Lee S J, Kim J H, Chang Y S, *et al.* Characterization of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans in different particle size fractions of marine sediments [J]. *Environmental Pollution*, 2006, **144**(2): 554-561.
- [39] Wang S R, Jin X C, Bu Q Y, *et al.* Effects of particle size, organic matter and ionic strength on the phosphate sorption in different trophic lake sediments [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, **128**(2-3): 95-105.
- [40] Tian Y, Lu H L, Hong H L, *et al.* Potential and mechanism of glomalin-related soil protein on metal sequestration in mangrove wetlands affected by aquaculture effluents [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **420**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126517.
- [41] Korkmaz K, Ibrikci H, Karnez E, *et al.* Phosphorus use efficiency of wheat genotypes grown in calcareous soils [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2009, **32**(12): 2094-2106.
- [42] Dijkstra J J, Meeussen J C L, Comans R N J. Leaching of heavy metals from contaminated soils: an experimental and modeling study [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(16): 4390-4395.
- [43] Gu X, Ouyang W, Xu L, *et al.* Occurrence, migration, and allocation of arsenic in multiple media of a typical semi-enclosed bay [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **403**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121313.
- [44] Zhang W G, Yu L Z, Lu M, *et al.* Magnetic approach to normalizing heavy metal concentrations for particle size effects in intertidal sediments in the Yangtze Estuary, China [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **147**(1): 238-244.
- [45] Wang Y D, Ouyang W, Lin C Y, *et al.* Higher fine particle fraction in sediment increased phosphorus flux to estuary in restored Yellow River Basin [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **55**(10): 6783-6790.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                             |                                                             |        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------|
| Meteorological Impact Assessment of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> Complex Pollution in Key Regions of China Based on Meteorological Conditions Index | YANG Xin, YANG Yuan-qin, LI Hong, <i>et al.</i>             | (6433) |
| Scale Dependence Between PM <sub>2.5</sub> and Meteorological Factors and Its Influencing Factors in “2+26” Cities                                          | WU Shu-qi, JIN Jian-nan, ZHENG Dong-yang, <i>et al.</i>     | (6441) |
| Chemical Constituents and Sources of PM <sub>2.5</sub> Around the Wuhan Military Games Period                                                               | LIU Shi-hao, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i>      | (6452) |
| Characteristics and Sources of PM <sub>2.5</sub> Pollution During Winter in Handan City from 2016 to 2020                                                   | NIU Hong-ya, GAO Na-na, BAO Xiao-lei, <i>et al.</i>         | (6463) |
| Chemical Compositions and Sources of PM <sub>2.5</sub> in Weinan City                                                                                       | GUO Jing-ning, LI Xiao-fei, YU Feng, <i>et al.</i>          | (6474) |
| Analysis of Formation Processes and Sources of PM <sub>2.5</sub> Ammonium During Winter and Summer in Suburban Area of the Yangtze River Delta              | XIANG Yan-kun, CAO Fang, ZHANG Wen-qi, <i>et al.</i>        | (6486) |
| Chemical Composition and Characterization of Nitroaromatic Compounds in Urban Areas of Shanghai                                                             | YANG Lu, MA Ying-ge, YU Jian-zhen, <i>et al.</i>            | (6495) |
| Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM <sub>2.5</sub> , Liliang City                                                                      | MU Ling, LIU Zi-ye, LI Yang-yong, <i>et al.</i>             | (6508) |
| Effect of Biomass Burning on Carbonaceous Aerosol Composition and Light Absorption in Guangxi Regional Background Site                                      | WU Xing-qi, CAO Fang, HONG Yi-hang, <i>et al.</i>           | (6518) |
| Characteristics of Light Absorption, Sources, and Seasonal Variation of Atmospheric Brown Carbon in Northern Nanjing                                        | CHEN Xing-zhou, CUI Shi-jie, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i> | (6529) |
| Health Benefit Assessment of Coal-to-electricity Policy on PM <sub>2.5</sub> Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region                                      | ZHANG Ru-ting, CHEN Chuan-min, LIU Song-tao, <i>et al.</i>  | (6541) |
| Source Apportionment of Ambient VOCs in Qingdao Based on Photochemical Loss Correction                                                                      | KONG Cui-li, WU Yu-tong, GU Yao, <i>et al.</i>              | (6551) |
| Pollution Characteristics and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Liaocheng in Summer                                                            | LI Wan-yong, HUANG Hao-yu, WANG Yan-zhen, <i>et al.</i>     | (6564) |
| Source Analysis of Ozone and Its Precursors in Zibo Based on 3-D Air Quality Model                                                                          | ZHANG Xin-xin, ZHAO Xiu-ying, HUANG Ling, <i>et al.</i>     | (6576) |
| Spatio-temporal Characteristics and Influencing Factors of Ozone Suppression Events Under High Temperature in China                                         | OU Lin-chong, CHEN Wei-hua, WU Yong-kang, <i>et al.</i>     | (6586) |
| Review of UAV-based Atmospheric Fine Particulate Matter and Ozone Pollution Detection and Source Localization                                               | QU Ya-wei, WANG Ti-jian, YUAN Cheng, <i>et al.</i>          | (6598) |
| Health Impact Analysis of Fine Particulate Pollution from Vehicles in the Beijing-Tianjin-Hebei Region                                                      | HAO Yong-pei, SONG Xiao-wei, ZHU Xiao-dong, <i>et al.</i>   | (6610) |
| Assessment of Emission Reduction Potential of CO <sub>2</sub> Capture, Geological Utilization, and Storage in Cement Industry of China                      | WEI Ning, LIU Sheng-nan, WEI Feng, <i>et al.</i>            | (6621) |
| Life Cycle Carbon Emission Accounting and Emission Reduction Potential Assessment of Steel Industry                                                         | SONG Xiao-cong, DU Shuai, DENG Chen-ning, <i>et al.</i>     | (6630) |
| Evolution Characteristics and Driving Forces of Carbon Dioxide Emissions and Sinks in the Pearl River Delta Region, China                                   | HU Jing-xin, SHA Qing-e, LIU Hui-lin, <i>et al.</i>         | (6643) |
| Impact of Accelerated Electrification Under the Low Carbon Path in Dongguan City on the Coordinated Emission Reduction of CO <sub>2</sub> and Pollutants    | WU Le-min, CHEN Bing-yin, OU Lin-chong, <i>et al.</i>       | (6653) |
| Relationship Between Urbanization and Carbon Emissions in the Chang-Zhu-Tan Region at the County Level                                                      | LIU Xian-zhao, LI Yang, <i>et al.</i>                       | (6664) |
| Characteristics and Influencing Factors of Greenhouse Fluxes from Urban Lawn                                                                                | CHEN Li-han, LIU Shuo, LIN Yi, <i>et al.</i>                | (6680) |
| Dual-Perspective Analysis of the Warming Effect of the Methane Emissions from Animal Husbandry in China                                                     | LIU Shu-le, YAN Wei, CAO Qing-xian, <i>et al.</i>           | (6692) |
| Pollution Level and Risk Assessment of OPEs in Typical River Basins of China                                                                                | ZHAO Jiang-lu, LU Hai-jian, LÜ Jia-pei, <i>et al.</i>       | (6700) |
| Soil Heavy Metal Contamination, Sources, and Health Risk of Typical Drinking Water Sources in the Suspended Reach of the Lower Yellow River                 | PENG Chao-yue, REN Chong, SHEN Hao-xin, <i>et al.</i>       | (6710) |
| Fraction Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of the Yellow River Mainstream                                             | WANG Yi-di, OUYANG Wei, LIU Lian-hua, <i>et al.</i>         | (6720) |
| Influence of Land Use Structure and Spatial Pattern on Water Quality of Small and Medium-sized Rivers in Poyang Lake Basin                                  | WEN Jia-wei, WANG Peng, HUANG Gao-xiang, <i>et al.</i>      | (6728) |
| Water Environment Characteristics and Water Quality Assessment of Typical Lakes in Inner Mongolia                                                           | WANG Xin-yuan, PAN Bao-zhu, WANG Li-xin, <i>et al.</i>      | (6744) |
| Relationship Between Precipitation, River Water, and Groundwater Conversion in the Upper Reaches of Xilin River During the Rainy Season                     | SUN Jin, WANG Yi-xuan, YANG Lu, <i>et al.</i>               | (6754) |
| Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in the Northwest Salt Lake Basin                                                           | YAN Yan, GAO Rui-zhong, LIU Ting-xi, <i>et al.</i>          | (6767) |
| Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin                                                                                    | LIU Yu, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i>          | (6778) |
| Bisulfite Promoted Minute Fe <sup>2+</sup> -Activated Peroxydisulfate for Paracetamol Degradation                                                           | MO Xi-ting, NIE Shu-hua, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>         | (6790) |
| Degradation of Ciprofloxacin by Activating Peroxymonosulfate with Sludge Biochar                                                                            | ZHENG Da-yang, ZOU Jia-li, XU Hao, <i>et al.</i>            | (6801) |
| Adsorption of Iopamidol by NaHCO <sub>3</sub> -activated Buckwheat Biochar                                                                                  | WEI Hong, ZHAO Jiang-juan, JING Li-ming, <i>et al.</i>      | (6811) |
| Preparation of Bamboo-based N, P Co-doped Activated Carbon and Its Lanthanum Ion Adsorption Performance                                                     | WANG Gui-long, LIU Yan-yan, JIANG Rong-yuan, <i>et al.</i>  | (6823) |
| Analysis of Vegetation Change and Influencing Factors in Southwest Alpine Canyon Area                                                                       | LAI Jin-lin, QI Shi, CUI Ran-ran, <i>et al.</i>             | (6833) |
| Effect of Biochar on Agricultural Soil Aggregates and Organic Carbon: A Meta-analysis                                                                       | MENG Yan, SHEN Ya-wen, MENG Wei-wei, <i>et al.</i>          | (6847) |
| Carbon Cycling Processes in Croplands and Their Quantification Methods                                                                                      | SUN Zhao-an, ZHU Biao, <i>et al.</i>                        | (6857) |
| Effects of Biochar Application on Soil Organic Carbon Component in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi                       | MOU Zhi-yi, SHEN Yu-yi, CAO Yang, <i>et al.</i>             | (6869) |
| Evolution Characteristics of Soil Active Organic Carbon and Carbon Pool Management Index Under Vegetation Restoration in Karst Area                         | CAI Hua, SHU Ying-ge, WANG Chang-min, <i>et al.</i>         | (6880) |
| Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Environmental Media in China                                             | CHEN Li-hong, CAO Ying, LI Qiang, <i>et al.</i>             | (6894) |
| Spatial Prediction Modeling for Soil pH Based on Multiscale Geographical Weighted Regression (MGWR) and Its Influencing Factors                             | ZHAO Ming-song, CHEN Xuan-qiang, XU Shao-jie, <i>et al.</i> | (6909) |
| Characteristics and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Around a Coal-fired Power Plant                                                    | ZHANG Jun, LI Xu, LIU Lei-yu, <i>et al.</i>                 | (6921) |
| Characteristics of Soil Pollution and Source Analysis of Typical Pollutants in the Petrochemical Site                                                       | ZHANG Yu-rong, LUO Shuai, CHEN Yuan, <i>et al.</i>          | (6933) |
| Characteristics of Antibiotic Resistance Genes Distribution in Different Types of Agricultural Land Soils in Highly Cultivated Hilly Areas                  | CHEN Rui, CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i>      | (6947) |
| Effects of Organic Fertilizer Combined with Biochar on Denitrifying Microorganisms and Enzyme Activities in Orchard Soil                                    | DENG Zheng-xin, GAO Ming, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i>        | (6955) |
| Effects of Organic Fertilization on Bacterial Community and Maize Productivity in Dryland Red Soil                                                          | LIN Ting-ting, ZHENG Jie, ZHU Guo-fan, <i>et al.</i>        | (6965) |
| Effects of Combined Pollution of Microplastics and Cadmium on Microbial Community Structure and Function of <i>Pennisetum hybridum</i> Rhizosphere Soil     | DUAN Li-yang, ZHANG Yu, REN Xue-min, <i>et al.</i>          | (6973) |
| Effects of Tomato Planting Years on Soil Physical and Chemical Properties and Microbial Communities                                                         | ZHAO Yang-yang, LIU Yin-shuang, SONG Yao, <i>et al.</i>     | (6982) |
| Remediation of Three Oxidants on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Coking Contaminated Soil and Its Response to Indigenous Microorganisms                 | LI Wei, WANG Hua-wei, MENG Xiang-yu, <i>et al.</i>          | (6992) |
| Microbial Diversity and Population Structure of Different Salinized Soil Types in Hebei Province                                                            | LIU Yin-shuang, NIU Hong-jin, ZHAO Yang-yang, <i>et al.</i> | (7004) |
| Functional Genomics Analysis of Nitrogen and Phosphorus Transformation in Maize Rhizosphere Microorganisms                                                  | WANG Xiang-jun, JIANG Mei-tong, LI Sen, <i>et al.</i>       | (7014) |
| Remediation of Soil Cadmium Contamination by <i>Solanum nigrum</i> L. Enhanced by the Combination of Exogenous Bacteria and Citric Acid                     | WANG Kai, WANG Li, WANG Yi-kun, <i>et al.</i>               | (7024) |
| Effect of Combined Application of an <i>Enterobacter</i> and Sulfur Fertilizer on Cadmium and Arsenic Accumulation in Rice                                  | ZHANG Pu-xin, YAO Jun-fan, LIU Yu-ling, <i>et al.</i>       | (7036) |