

北京城区PM_{2.5}各组分污染特征及来源分析

安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献

PM_{2.5} 化学组成

SO_4^{2-} NH_4^+ NO_3^-
元素碳 Cl^- 有机物 地壳元素

源解析

二次
颗粒物

机动车

扬尘

工业

燃煤

生物质
燃烧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年5月

第43卷 第5期
Vol.43 No.5

目次

北京城区 PM _{2.5} 各组分污染特征及来源分析	安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献 (2251)
基于时空混合效应模型的京津冀 PM _{2.5} 浓度变化模拟	范丽行, 杨晓辉, 宋春杰, 李梦诗, 段继福, 王卫, 李夫星, 李伟妙 (2262)
2000~2018 年京津冀城市群 PM _{2.5} 时空演变及其与城市扩张的关联	赵安周, 相恺政, 刘宪锋, 张向蕊 (2274)
海-陆大气交汇作用下青岛冬季大气 PM _{2.5} 污染特征与来源解析	虞雄, 杨凌霄, 张婉, 齐安安, 王滢铭, 王鹏程, 黄琦, 赵彤, 张雄飞, 徐鹏, 张天琪, 王文兴 (2284)
硫酸盐非均相机制对颗粒物污染的影响: 上海典型污染事件的 WRF-Chem 模拟	张茹涵, 张皓然, 冯伟航, 汤克勤, 马亚平, 王红丽, 黄成, 胡建林, 张宏亮, 李楠 (2294)
省会城市不同功能区大气 PM _{2.5} 化学组分季节变化及来源分析	孙友敏, 范晶, 徐标, 李彦, 韩红, 张桂芹 (2304)
太原市冬季不同污染程度下 PM _{2.5} 的化学组成、消光特征及氧化潜势	任娇, 赵荣荣, 王铭, 张欢欢, 尹诗杰, 薛永刚 (2317)
郑州市冬季大气 PM _{2.5} 金属元素来源及健康风险评价	姚森, 王乾恒, 薛妍, 史来文, 张俊美, 杨书申 (2329)
淄博市冬季 PM _{2.5} 载带金属元素污染特征、生态风险评价及来源分析	白雯宇, 徐勃, 郭丽瑶, 殷宝辉, 马银红, 李丽明, 杨文, 赵雪艳 (2336)
承德市 PM _{2.5} 中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评价	贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 郭睿瑶, 姚波, 崔建升, 冯亚平, 王帅, 侯晓松 (2343)
珠三角大气中二噁英污染水平与区域迁移	付建平, 谢丹平, 黄锦琼, 杨艳艳, 冯桂贤, 周长风, 廖海婷, 青亮, 张漫雯, 吴明亮, 张素坤 (2355)
华北平原南部农村地区黑碳气溶胶浓度及来源	张玲, 孔少飞, 郑煌, 胡尧, 曾昕, 程溢, 祁士华 (2363)
基于模式过程分析技术天津地区 PM _{2.5} 污染气象成因分析	郝团, 蔡子颖, 韩素芹, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨 (2373)
基于排放量和大气反应活性的 VOCs 污染源分级控制	陈鹏, 张月, 邢敏, 李珊珊 (2383)
基于复杂网络的中国臭氧拓扑特征	菅娜, 陈建华, 李冬, 王迪, 薛志钢 (2395)
基于前体物多情景排放的兰州市 2030 年夏季臭氧预测	陈天雷, 吴敏, 潘成珂, 常莉敏, 李洪, 刘鹏, 高宏, 黄韬, 马建民 (2403)
基于源反演和气溶胶同化方法天津空气质量模式预报能力改进	蔡子颖, 唐邈, 肖致美, 杨旭, 朱玉强, 韩素芹, 徐虹, 邱晓滨 (2415)
基于空气质量监测数据的钢铁行业污染源识别方法	石耀耀, 胡京南, 褚咏昕, 段青春, 胡丙鑫, 殷丽娜, 吕玲玲 (2427)
重污染天气应对“绩效分级、差异化管控”措施首次实践效果后评估	曾景海, 王灿 (2436)
黄河流域水污染风险分区	周夏飞, 曹国志, 方方, 杨威杉, 徐泽升 (2448)
黄河流域甘肃段工业行业水污染物空间排放特征	李雪迎, 杨曦, 乔琦, 刘丹丹, 张玥, 赵若楠, 白璐 (2459)
黄河沉积物重金属时空分布与污染评价	王超群, 潘保柱, 韩语, 王雨竹, 李晨辉, 杜蕾 (2467)
APCS-MLR 结合 PMF 模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源	沈宸宇, 闫钰, 于瑞莲, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (2476)
河流底泥 DOM、营养盐与重金属空间分异特征及响应关系	肖艳春, 于会彬, 宋永会 (2489)
太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析	胡杰, 赵心语, 王婷婷, 苟奎贤, 王春玲 (2500)
洪泽湖溶解态有机质与重金属汞的结合特性	胡斌, 王沛芳, 张楠楠, 包天力, 金秋彤 (2510)
富营养化驱动下西凉湖百年生态演化轨迹	郑佳楠, 徐敏, 郑文秀, 朱可欣, 王荣, 张恩楼 (2518)
基于 DGT 技术的黄河上游典型水库沉积物氮磷释放与污染源解析	马玉坤, 朱翔, 庞晴晴, 孔明, 韩天伦, 彭福全, 谢磊, 汪龙眠, 徐斌, 何斐 (2527)
暴雨前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析	张彦, 邹磊, 梁志杰, 姜明, 李平, 黄仲冬, 齐学斌 (2537)
鄱阳湖流域水葫芦 (<i>Eichhornia crassipes</i>) 对水体微塑料的吸附截留效应	李文刚, 吴希恩, 简敏菲, 刘淑丽, 刘海球, 丁惠君 (2548)
太湖塑料添加剂时空分布和生态风险评价	刘舒娇, 丁剑楠, 石波哲, 张军毅, 庄严, 邹华 (2557)
骆马湖表层沉积物微塑料的分布、来源及储量	姚明轩, 白雪, 徐振佳, 李凤杰, 陆滢, 李畅, 华祖林 (2566)
太湖不同介质中磷的污染特征及其治理启示	蔡梅, 陆志华, 王元元, 钱旭 (2575)
辽河四平段流域河流沉积物微生物群落多样性和结构分析	李鹏洋, 安启睿, 王新皓, 孙思宇, 李青乾, 郑娜 (2586)
面源污染诱导嘉陵江沉积物中细菌群落结构与功能异变	薛玉琴, 徐飞, 刘坤和, 王佳颖, 竹兰萍, 朱志豪, 张拓 (2595)
微塑料对沉积物细菌群落组成和多样性的影响	李汶璐, 王志超, 杨文煊, 张博文, 李卫平 (2606)
白洋淀冬季沉积物好氧反硝化菌垂直分布特征及群落构建	张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 周石磊, 孟佳靖, 陈哲, 张一凡, 董宛佳, 崔建升 (2614)
人工诱导水库分层水体提前混合对细菌群落结构和代谢活性的影响	高悦, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 司凡, 杨斌 (2624)
鄱阳湖典型区铜锈环螺体内微塑料分布特征	江为群, 胡启武, 简敏菲, 邹龙, 刘淑丽 (2633)
负载多壁碳纳米管的多孔 Ti/SnO ₂ -Sb-Ni 电极电催化氧化双酚 A	符远航, 刘安迪, 黄伟斌, 唐彬彬, 张进忠 (2640)
磁性 Mn _{0.6} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄ 催化 H ₂ O ₂ 降解亚甲基蓝效能及机制	徐冬莹, 余静, 郝旗, 杨迎春, 方淑红 (2650)
两种纳米颗粒对沸石吸附环丙沙星的影响	蒋兰翠, 孟昭福, 刘贤, 刘欣, 王新欣, 曹雪雯 (2662)
AMD 污泥复合材料吸附 As(V) 的机制及其影响因素	张亚辉, 张瑞雪, 吴攀, 陈世万, 杨艳, 安丽, 傅渝然, 张子豪 (2673)
三氯生及其降解中间产物对活性污泥中微生物群落变化和硝化反硝化功能基因的影响	卢英源, 董小琦, 彭星星, 贾晓珊 (2685)
污染场地风险管控可持续评价指标体系构建及关键影响因素分析	李笑诺, 易诗懿, 陈卫平 (2699)
基于生态功能的滨海湿地土壤质量综合评价方法构建及实证分析	张雪, 孔范龙, 姜志翔 (2709)
铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价	陈航, 王颖, 王澍 (2719)
典型铁、锰矿物对稻田土壤砷形态与酶活性的影响	周一敏, 黄雅媛, 刘凯, 赵儒乐, 李冰玉, 雷鸣 (2732)
两种油菜施肥水溶性壳聚糖修复典型铅污染农田土壤	孟晓飞, 郑国砥, 陈同斌, 杨俊兴, 郭俊梅, 刘杰 (2741)
基于贝叶斯理论的小麦籽粒镉铅超标风险预测	王天齐, 李艳玲, 杨阳, 牛硕, 王美娥, 陈卫平 (2751)
紫色土旱坡地油菜/玉米轮作下氮流失的年度变化特征	徐曼, 高明, 余添, 朱浩宇, 邓华, 王子芳 (2758)
不同原料生物炭的理化特性及其作炭基肥缓释载体的潜力评价	邢莉彬, 成洁, 耿增超, 张宏伟, 梁宏旭, 王强, 孙倩倩, 李艳 (2770)
木醋液酸化生物炭与氮素配施对盐渍土壤活性氮及氮挥发的影响	申书伟, 张丹丹, 王敏鸽, 王旭东 (2779)
生物可降解地膜覆盖对关中地区小麦-玉米农田温室气体排放的影响	郭怡婷, 罗晓琦, 王锐, 陈海心, 冯浩 (2788)
戴云山南坡不同海拔森林土壤微生物群落结构特征和影响因素	何中声, 王紫薇, 朱静, 陈佳嘉, 谷新光, 江蓝, 陈博, 吴则焰, 刘金福, 陈文伟 (2802)
模拟增温和降雨增加对撂荒草地土壤胞外酶活性及计量特征的影响	王兴, 钟泽坤, 简俊楠, 张硕宏, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (2812)
中国主要城市的城市化对局地增温的贡献	李宇, 周德成, 闫章美, 张良侠 (2822)
《环境科学》征订启事 (2293)	
《环境科学》征稿简则 (2426)	
信息 (2585, 2672, 2708)	

黄河沉积物重金属时空分布与污染评价

王韬轶, 潘保柱*, 韩谓, 王雨竹, 李晨辉, 杜蕾

(西安理工大学西北旱区及生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

摘要: 重金属污染由于其毒性、持久性、非生物降解性和生物累积性等特点, 对水生生态系统存在着严重威胁, 沉积物粒径越细, 比表面积越大, 对重金属的吸附作用越强, 而多沙黄河中泥沙颗粒细且易悬浮。基于此, 为了明确黄河沉积物中 ($<63\ \mu\text{m}$) 重金属的时空分布特征和存在的污染风险, 分别在 2019 年春秋两季 (4~5 月和 9~10 月) 对黄河进行调查, 通过野外调查和室内实验分析, 结果发现: ① 黄河表层沉积物中的 10 种重金属含量大小排序为: $\text{Mn} > \text{V} > \text{Cr} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Co} > \text{Cd}$, 只有 V、As 和 Cd 的平均含量在春季和秋季高于黄土元素背景值, 10 种重金属含量在春季整体变化趋势为源区至中游逐渐升高后至下游降低。② 在不同时空条件下, 黄河表层沉积物中除 Cd 以外 9 种重金属的含量都有显著差异, 时空因素的共同作用导致中游区域的这 9 种重金属含量高于其他区域。③ 潜在生态危害指数 (RI) 表明, 黄河表层沉积物只有 Cd 处于中等生态危害, 其余皆处于轻生态危害; 地累积指数 (I_{geo}) 表明, 除 As 和 Cd 处于轻度污染外, 黄河沉积物整体呈无污染~轻度污染。为减轻黄河表层沉积物中重金属带来的健康生态危害, 应注意对 As 和 Cd 污染的防控, 尤其是甘宁蒙段和中游库区。

关键词: 黄河; 沉积物; 重金属; 时空分布; 污染评价

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)05-2467-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202108092

Spatial-temporal Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Yellow River

WANG Tao-yi, PAN Bao-zhu*, HAN Xu, WANG Yu-zhu, LI Chen-hui, DU Lei

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Heavy metal pollution poses a serious threat to aquatic ecosystems due to its characteristics of toxicity, persistence, non-biodegradability, and bioaccumulation. Adsorption of heavy metals by sediments is enhanced when the particle size becomes finer, and the specific surface area becomes larger. The sediments of the Yellow River have the characteristics of fine particle size and easy suspension. Based on these characteristics, to clarify the spatial-temporal distribution and the ecological risk of heavy metals in the Yellow River surface sediments ($<63\ \mu\text{m}$), an investigation was taken in spring and autumn (April to May and September to October, respectively) of 2019. Through the field investigation and laboratory experiment analysis, it was found that: ① The order of the 10 heavy metal contents in the surface sediments of the Yellow River was: $\text{Mn} > \text{V} > \text{Cr} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Co} > \text{Cd}$; the average contents of V, As, and Cd were higher than the background value of loess rock in two seasons. The overall change trend of the 10 heavy metal contents in spring was gradually increased from the source area to the middle reaches and then decreased to the downstream. ② Under the condition of different spatial-temporal distribution, the contents of nine heavy metals in the surface sediments of the Yellow River had significant differences, except that of Cd. The contents of these nine heavy metals in the middle reaches of the Yellow River were higher than those in other regions due to the interaction effects of region and season. ③ The ecological risk index (RI) showed that Cd in the surface sediments of the Yellow River was at a moderate ecological risk, and the rest were at a low ecological risk. The index of geo-accumulation (I_{geo}) showed that except for As and Cd, which were at a lightly polluted level, the remaining heavy metals in the surface sediments of the Yellow River were at a pollution-free to slightly polluted level. To reduce the health and ecological risks caused by heavy metals in the surface sediments of the Yellow River, the prevention and control measures against As and Cd pollution deserved attention, especially in the Gansu-Ningxia-Inner Mongolia section and the reservoir area in the middle reaches of the Yellow River.

Key words: Yellow River; sediments; heavy metals; spatial-temporal distribution; pollution assessment

重金属污染由于其毒性、持久性、非生物降解性和生物累积性等特点, 对水生生态系统存在着严重威胁^[1,2]。存在于水体中的重金属和悬浮颗粒通过吸附、络合和沉降, 富集到沉积物中^[3~5]。当环境条件发生变化, 如水体流量增大时, 底泥再悬浮, 沉积物中的重金属随之也会释放到上覆水中, 吸收过程变为释放过程, 危害水生生态系统^[6], 成为河流重金属污染的汇和源^[7]。有研究表明, 测定 $<63\ \mu\text{m}$ 的沉积物中重金属含量更合理^[8]。同时, 河流沉积物中 $<63\ \mu\text{m}$ 的部分更易悬浮, 因此, 沉积物中 $<63\ \mu\text{m}$ 部分的重金属污染情况引起了越来越多人的关注。

多沙黄河在世界上河流长度位列第五, 沿途分别流经青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和华北平原这 4 个不同类型的地貌单元, 流域大部分为半荒漠或草原^[9,10], 相比其他河流, 其携带泥沙量大, 泥沙颗粒较细容易悬浮^[11,12], 近年来, 已有大量研究者展开了对黄河沉积物的重金属分布特征和成因的研究。吴斌等^[13]在对黄河口沉积物中重金属的研究发现, 秋季径流量大, 人为扰动剧烈, 影响了沉积物

收稿日期: 2021-08-10; 修订日期: 2021-10-04

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (51939009)

作者简介: 王韬轶 (1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为流域水环境污染控制, E-mail: 18085271787@163.com

* 通信作者, E-mail: zhuzipan@xaut.edu.cn

中各类重金属的含量分布,夏修杰等^[14]的研究发现黄河下游段存在轻度的 Cu 污染.但目前对黄河沉积物重金属的研究多针对干流的某一断面,研究尺度小,而黄河作为西北重要的水资源,灌溉面积约占中国耕地总面积的 13%^[15],黄河干流的重金属污染将直接影响到人们的生产生活,因此亟需展开对黄河沉积物重金属含量的调查与污染评价.

基于上述背景,本研究于 2019 年春季 4~5 月和 2019 年秋季 9~10 月,自黄河源区至河口的自然河段 31 个断面及典型水库 18 个断面,共计 49 个断面进行了两次系统的沉积物采样.本次研究旨在分析黄河两季度沉积物重金属含量的分布特征,并进行污染评价,探讨不同时空条件下重金属污染的差异,以期科学地治理和保护黄河提供基础理论支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区域

黄河是中国第二大长河,发源于青藏高原东北部,是世界上有名的多沙河流之一.黄河平均径流量占汇入渤海总净流量的 78%,流域中 99.6% 的重金属是以颗粒态存在^[16].目前,黄河干流河段最常见的划分方法是黄河水利委员会将其河源至河口镇划分为上游、河口镇至桃花峪为中游,桃花峪以下为下游^[17],由于上游河段较长(3 472 km)、落差较大(3 496 m),且通常将唐乃亥水文站上游地区定义为黄河源,因此本文将黄河上游划分为(玛多—唐乃亥段)源区和(龙羊峡水库—头道拐段)上游甘宁蒙段^[18].本研究根据黄河干流分布特点共确定 49 个采样点,每个样点采集的样本由 3 个平行子样本组成,采样信息表和研究区域如图 1 和表 1 所示.

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集与处理

分别在 2019 年春秋两季(4~5 月和 9~10 月)对黄河进行调查研究,使用皮特森采泥器,采集黄河 49 个断面的表层(0~20 cm)沉积物,自然河段断面

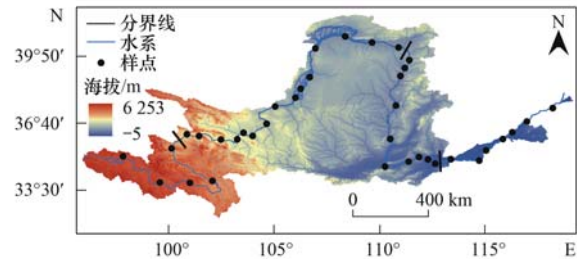


图 1 黄河流域源区至河口采样断面示意
Fig. 1 Map of Yellow River from source region to sea and sampling sites

表 1 黄河流域源区至河口采样断面信息

Table 1 Sampling sections information from source region to the estuary of the Yellow River mainstream

断面编号	断面名称	断面编号	断面名称
MD	玛多	TDG	头道拐
JM	吉迈	WJZKW	万家寨库尾
MT	门堂	WJZKZ	万家寨库中
MQ	玛曲	WJZKS	万家寨库首
TNH	唐乃亥	HQ	河曲
LYXKW	龙羊峡库尾	FG	府谷
LYXKZ	龙羊峡库中	WB	吴堡
LYXKS	龙羊峡库首	LM	龙门
GD	贵德	TG	潼关
XH	循化	SMXKW	三门峡库尾
LJXKW	刘家峡库尾	SMXKZ	三门峡库中
LJXKZ	刘家峡库中	SMXKS	三门峡库首
LJXKS	刘家峡库首	SMXBX	三门峡坝下
XC	小川	XLDKW	小浪底库尾
LZ	兰州	XLDKZ	小浪底库中
AND	安宁渡	XLDKS	小浪底库首
XHY	下河沿	XLDBX	小浪底坝下
QTXKW	青铜峡库尾	HYK	花园口
QTXKZ	青铜峡库中	JHT	夹河滩
QTXKS	青铜峡库首	GC	高村
QTXBX	青铜峡坝下	SK	孙口
SZS	石嘴山	AS	艾山
BYGL	巴彦高勒	LK	砾口
SHHK	三湖河口	LJ	利津
ZJF	昭君坟		

采集位于黄河干流水文站的国控断面,库区断面采集分别位于库首、库中和库尾的中央位置,在 0~4℃下保存.采集的沉积物经挑选、冷冻干燥和研磨后,过 240 目(63 μm)的尼龙筛,保存于塑料瓶内,而后称取 0.1 g 经干燥研磨的沉积物样品于聚四氟乙烯螺口消解罐中,加入 6 mL HNO₃, 3 mL HCl 和 2 mL HF 在 200℃ 的下消解 40 min(功率为 1 500 W).加热结束后在电热板上赶酸(电热板温度为 190℃),带溶液蒸发至 1 mL 取出冷却至室温.在通风橱中将样品转移至 50 mL 容量瓶中,并用超纯水冲洗消解罐内壁后定容至 50 mL^[19].然后将消解好的样品转移至离心管并于 4℃ 冰箱内保存(无条件可室温保存半年),此时溶液含硝酸浓度约为 2%.

1.2.2 重金属含量的测定

使用电感耦合等离子体发射光谱(美国 Thermo Fisher Scientific 公司 ICAPQ-MS)测定样品中的 V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 的含量.测试过程中,插入空白样品、标准样品(水系沉积物 GBW07309,由地矿部物化探所、测试所提供)和平行样品,用以保证测试结果的准确度和精密度.同时每个样品测试过程都插入内标溶液,回收率范围均为 80%~120%.

1.3 数据分析

1.3.1 数据处理与分析

通过 R3.6.3, SPSS 分析数据并用 Origin 绘制折线图和箱图, 分析黄河沉积物重金属的含量及沿程变化规律。

1.3.2 污染评价

采用潜在生态危害指数法 (RI)^[20], 对黄河沉积物中重金属的潜在生态危害进行评价, 计算公式为:

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i = T_r^i \frac{C_s^i}{C_n^i}$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i$$

式中, RI 为沉积物多种重金属综合潜在生态危害指数; E_r^i 为单一重金属的潜在生态危害系数; T_r^i 为各重金属的毒性响应系数^[21], $Mn = Zn = 1 < V = Cr = 2 < Cu = Ni = Co = Pb = 5 < As = 10 < Cd = 30$; C_f^i 为单一重金属污染系数; C_s^i 为沉积物中重金属的含量 ($mg \cdot kg^{-1}$); C_n^i 为重金属含量的背景值 ($mg \cdot kg^{-1}$); 本研究中源区和上中游河段沉积物重金属背景值选取河段对应省份的土壤背景值^[22], 考虑到下游无河流注入黄河, 选取了黄土元素重金属背景值^[23,24], 表 2 为潜在生态危害系数和危害指数与污染程度的关系。

表 2 潜在生态危害系数和危害指数与污染程度的关系
Table 2 Relation between E_r^i , RI, and contamination degree

E_r^i	污染程度	RI	污染程度
$E_r^i < 40$	轻微生态危害	$RI < 150$	轻微生态危害
$40 \leq E_r^i < 80$	中等生态危害	$150 \leq RI < 300$	中等生态危害
$80 \leq E_r^i < 160$	强生态危害	$300 \leq RI < 600$	强生态危害
$160 \leq E_r^i < 320$	很强生态危害	$RI \geq 600$	极强生态危害
$E_r^i \geq 320$	极强生态危害		

采用地累积指数法 (I_{geo})^[25], 对黄河情况进行评估, 计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 | C_i / (KB_i) |$$

式中, C_i 为重金属含量 ($mg \cdot kg^{-1}$); K 为由于不同地区岩石性质差异而取的修正系数 (一般为 1.5); B_i 为重金属背景值 ($mg \cdot kg^{-1}$), 本研究源区和上中游河段沉积物重金属背景值选取河段对应省份的土壤背景值, 下游无河流注入黄河, 选取了黄土元素重金属背景值, 表 3 为地累积指数和污染程度的关系。

2 结果与分析

2.1 黄河 10 种重金属元素时空分布特征

2.1.1 黄河不同区域表层沉积物重金属含量的分布特征

图 2 显示, 春季 4 个区域 10 种重金属 (V、Cr、

表 3 地累积指数和污染程度的关系

Table 3 Relation between I_{geo} and contamination degree

I_{geo}	级别	污染程度
≤ 0	0	无污染
0 ~ 1	1	轻度
1 ~ 2	2	偏中度
2 ~ 3	3	中度
3 ~ 4	4	偏重度
4 ~ 5	5	重度
≥ 5	6	严重

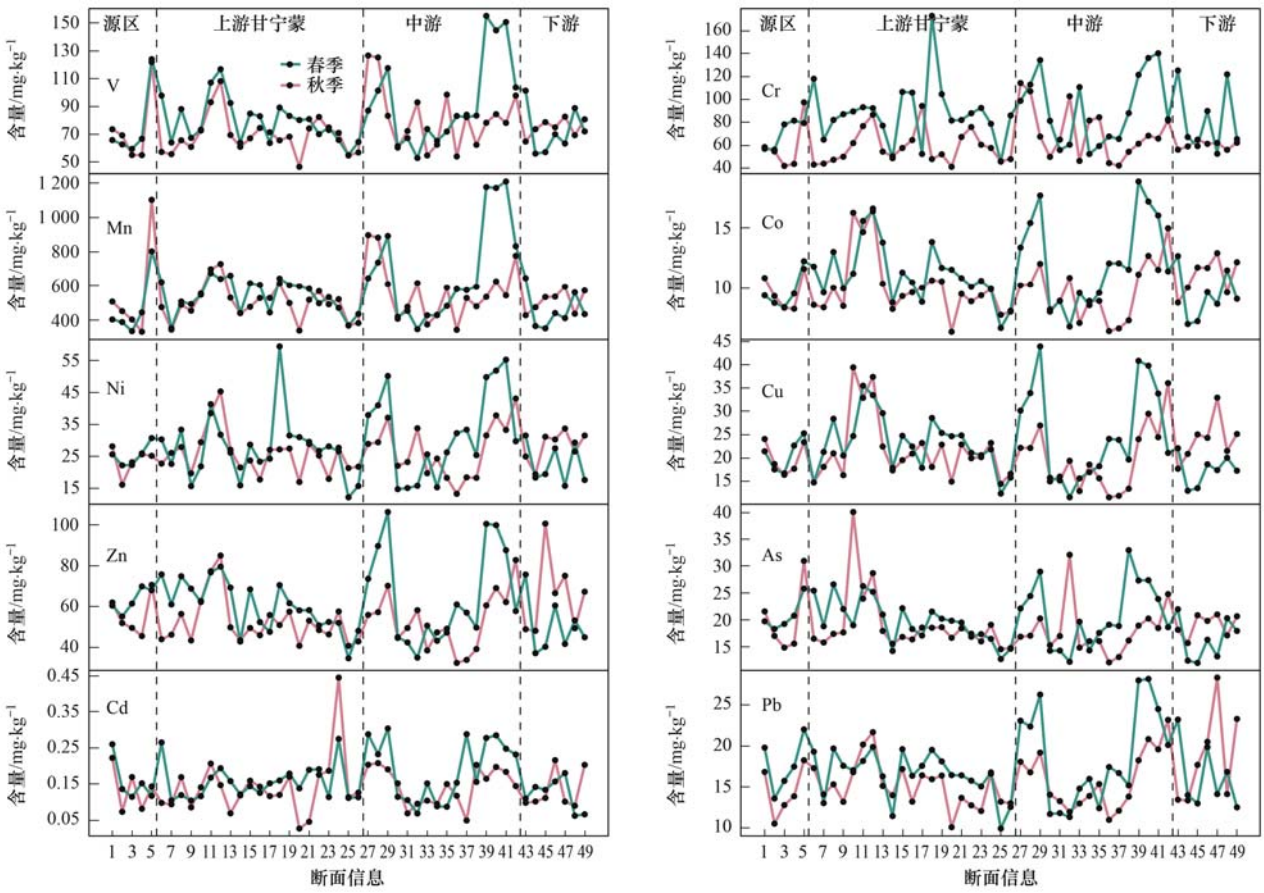
Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb) 含量在整段黄河干流的总体变化规律为: 源区到中游上升至最高后下游降低; 秋季 4 个区域中, Cr 和 Cd 有着与春季相同的变化规律, 另外 3 种重金属 Co、Ni 和 Pb 呈现出: 源区至下游逐渐升高的趋势, 其余 5 种重金属含量没有出现明显的变化趋势。

沉积物中各类重金属在 4 个不同区域内的变化趋势为: 在黄河源区, 沉积物中 (V、Cr、Mn、Co、As 和 Pb) 的含量在春季和秋季呈现出相同的上升规律, 于唐乃亥处达到最高; 在上游甘宁蒙段, 沉积物中 V、Mn 和 Zn 的含量在春季和秋季的刘家峡库区出现先升高后降低的趋势, 但在该区域沉积物中 Cd 的含量在三湖河口达到了春秋两季的峰值, Cr 和 Ni 均在秋季的青铜峡库尾达到了干流河段的峰值, 秋季的 Co、Cu 和 As 在循化样点达到该区域峰值; 在中游区域, 春季的沉积物中 10 种重金属 (V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb) 的含量, 在万家寨和小浪底库区均出现明显升高的现象, 都高于前后的自然河段, 且在小浪底库区达到最高, 该库区后方的小浪底坝下沉积物中 V、Mn 和 Cd 的含量高于下游段, 在秋季, 小浪底坝下沉积物中除 Cr 和 Cd 以外的 8 种重金属含量均高于前方的小浪底库区和下游; 在下游区域, 沉积物中重金属含量没有呈现出明显的变化规律。

2.1.2 黄河不同季节表层沉积物的重金属含量差异

图 3 显示, 黄河被划分为源区、上游甘宁蒙段、中游和下游这 4 个区域。在源区春季和秋季表层沉积物的重金属含量差异不明显; 在上游甘宁蒙段至中游区域, 春季黄河表层沉积物中 10 种重金属的含量高于秋季; 而在下游区域除 V、Cr 和 Cd 以外的 7 种重金属在秋季的含量高于春季。

表 4 中双因素方差分析显示, 除 Cd 外, 沉积物的其他重金属含量在不同的季节和不同的区域存在显著差异。由偏 η^2 可知, 沉积物中不同区域对 V、Mn、Ni 和 Pb 的影响大于季节和季节与区域的共同作用, 沉积物中季节与区域的共同作用对 Co、Cu、Zn、As 的影响大于不同区域和不同季节的影响, 沉



断面信息:1. MD, 2. JM, 3. MT, 4. MQ, 5. TNH, 6. LYXKW, 7. LYXKZ, 8. LYXKS, 9. GD, 10. XH, 11. LJXKW, 12. LJXKZ, 13. LJXKS, 14. XC, 15. LZ, 16. AND, 17. XHY, 18. QTXKW, 19. QTXKZ, 20. QTXKS, 21. QTXBX, 22. SZS, 23. BYGL, 24. SHHK, 25. ZJF, 26. TDG, 27. WJZKW, 28. WJZKZ, 29. WJZKS, 30. HQ, 31. FG, 32. WB, 33. LM, 34. TG, 35. SMXKW, 36. SMXKZ, 37. SMXKS, 38. SMXBX, 39. XLDKW, 40. XLDKZ, 41. XLDKS, 42. XLDBX, 43. HYK, 44. JHT, 45. GC, 46. SK, 47. AS, 48. LK, 49. LJ

图 2 黄河沉积物重金属含量分区折线图

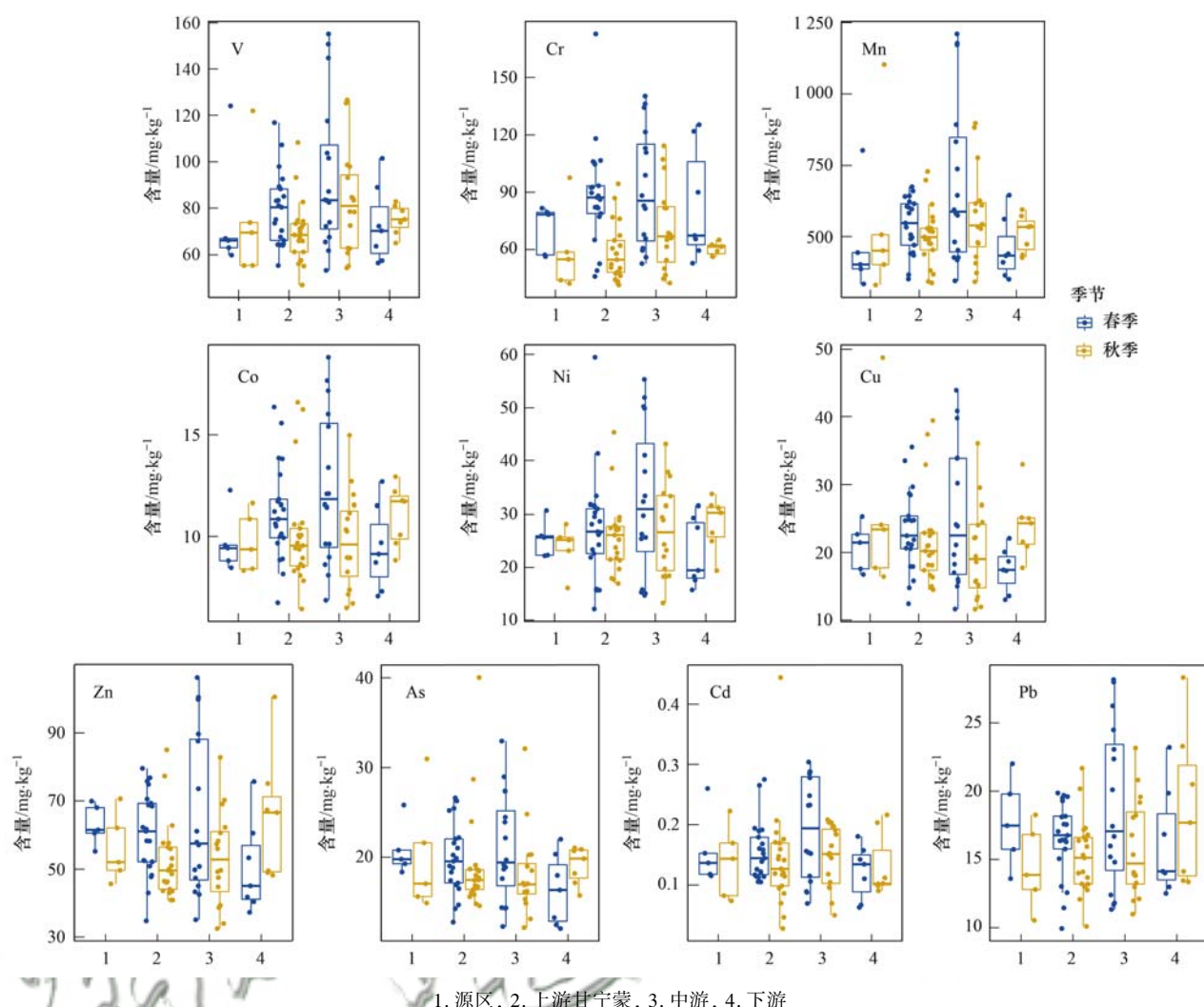
Fig. 2 Folded line chart of heavy metal contents in different regions of the Yellow River

表 4 季节与区域对重金属含量的双因素方差分析结果¹⁾

Table 4 Two-way ANOVA results of the effects of season and region on heavy metals content

重金属	作用	<i>P</i> 值	偏 η^2	排序	重金属	作用	<i>P</i> 值	偏 η^2	排序
V	季节	<0.001	0.04	中游>上游甘	Cu	季节	0.671	0.001	
	区域	<0.001	0.105	宁蒙和源区		区域	0.561	0.007	中游>下游
	季节×区域	0.404	0.01			季节×区域	<0.001	0.077	
Cr	季节	<0.001	0.154		Zn	季节	0.01	0.023	
	区域	<0.001	0.075	中游>源区		区域	0.168	0.017	中游>下游
	季节×区域	0.321	0.012			季节×区域	<0.001	0.052	
Mn	季节	0.173	0.006	中游>上游甘	As	季节	0.844	0.01	
	区域	<0.001	0.117	宁蒙、下游和源区		区域	0.207	0.016	中游>下游
	季节×区域	0.009	0.04			季节×区域	0.047	0.027	
Co	季节	0.251	0.005		Cd	季节	0.448	0.002	
	区域	0.055	0.026	中游>源区和下游		区域	0.112	0.021	
	季节×区域	0.002	0.051			季节×区域	0.528	0.008	
Ni	季节	0.442	0.002	中游>上游甘	Pb	季节	<0.001	0.037	
	区域	<0.001	0.053	宁蒙、下游和源区		区域	<0.001	0.053	中游>上游
	季节×区域	0.018	0.035			季节×区域	0.053	0.027	

1) 黑体字表示 $P < 0.05$



1. 源区, 2. 上游甘宁蒙, 3. 中游, 4. 下游

图3 黄河沉积物重金属含量分区箱型图

Fig. 3 Box plot of heavy metal contents in different regions in the Yellow River

积物中季节对 Cr 的影响大于不同区域和季节与区域的共同作用。

2.2 黄河表层沉积物重金属污染评价

2.2.1 黄河表层沉积物潜在生态危害指数评价

如图4所示,黄河表层沉积物春季的综合潜在生态危害指数(RI)略高于秋季,V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd和Pb的潜在生态危害系数 E_i^p 春季平均值(范围)分别为2.33(1.55~4.26)、2.74(1.39~5.76)、0.92(0.47~1.63)、4.95(2.83~8.93)、4.58(2.26~8.92)、5.13(2.41~9.08)、0.89(0.48~1.53)、16.72(9.48~29.58)、46.84(18.63~155.88)和4.41(2.89~8.31);秋季平均值(范围)分别为2.11(1.25~3.71)、1.99(1.20~3.70)、0.87(0.46~1.90)、4.49(2.60~8.05)、4.31(2.14~7.11)、4.97(2.59~10.99)、0.81(0.50~1.54)、15.97(9.56~30.74)、42.66(7.35~251.85)和4.03(2.44~6.75)。

其中Cd的单一潜在生态危害系数 E_i^p 对各个样

点的综合潜在生态危害指数(RI)贡献比例最高,达到了(20%~74%),且在多个样点达到了中等生态危害($E_r^i > 40$),其次是As的贡献比例达到了(8%~38%);两季度的RI都在上游甘宁蒙段至中游段呈先上升后降低的趋势,其中在甘宁蒙段,中游小浪底库区这两个区域都出现了高于临近自然河段的峰值,尤其是巴彦高勒和三湖河口两个样点的RI达到中等~强生态危害。

2.2.2 黄河沉积物地累积指数污染评价

由黄河表层沉积物中重金属地累积指数(I_{geo})可知(图5),根据 I_{geo} 分级标准,除As和Cd以外,总体上处于无~轻度污染状态,与前面潜在生态危害系数 E_i^p 得出的结果一致,对比两个季节的 I_{geo} 结果为春季略高于秋季;而As和Cd明显高于其他重金属,有超过50%的样点处于轻度污染,整体处于轻度污染状态,且秋季的三湖河口表层沉积物中的Cd达到了中度污染,与RI的结果类似。

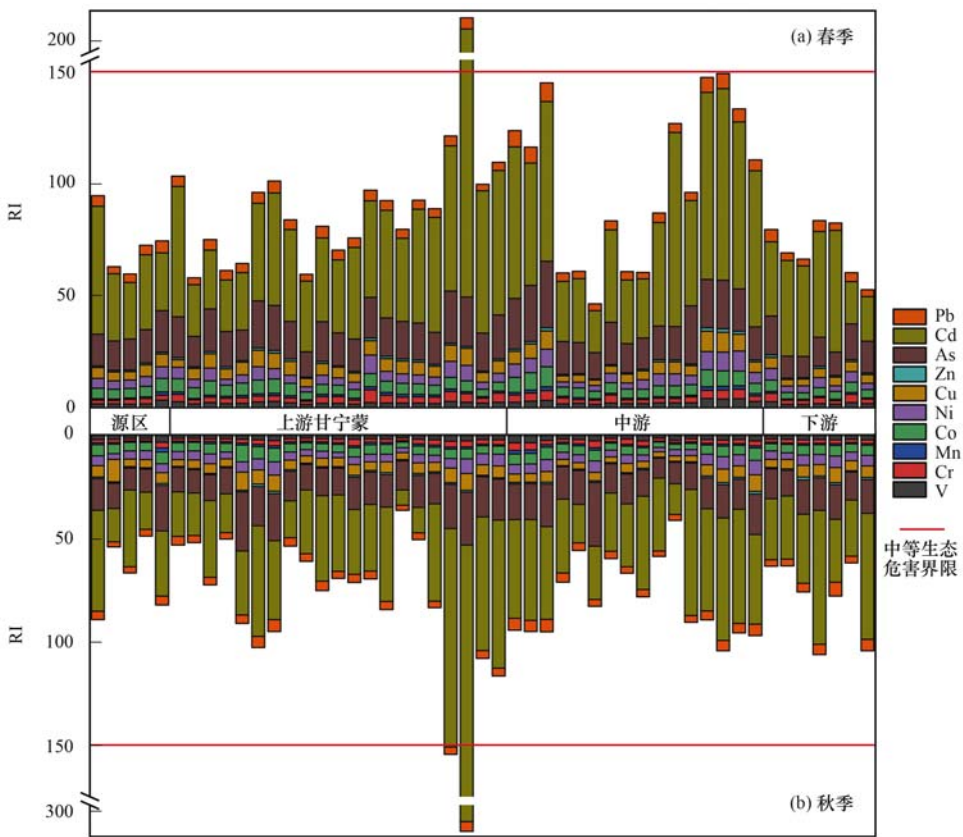


图4 黄河不同季节重金属生态危害评估

Fig. 4 Seasonal ecological risk assessment of heavy metals in the Yellow River

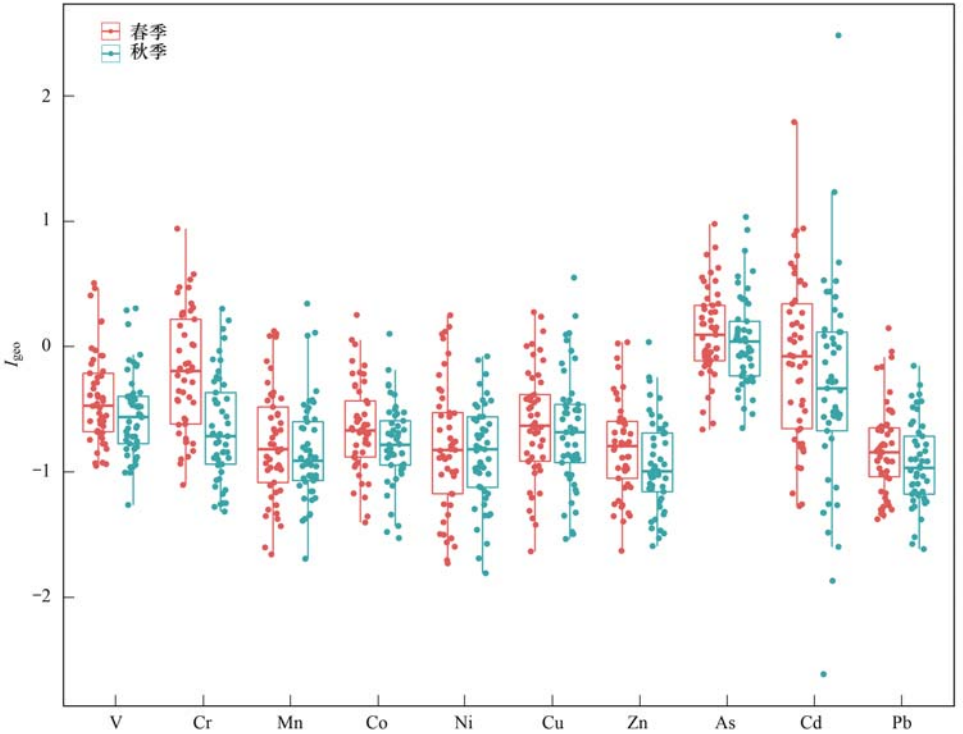


图5 黄河不同季节10种重金属地累积指数箱图

Fig. 5 Seasonal box plot of I_{geo} for ten heavy metals in the Yellow River

3 讨论

3.1 黄河干流春秋季表层沉积物的重金属含量
黄河干流表层沉积物中各类重金属的平均含量

如表5所示,春季10种重金属含量均值高于秋季,与黄土元素背景值相比,春秋季V的含量略高于背景值,As和Cd的含量超标倍数为黄土元素背景值的0.4~0.6倍,与Tian等^[26]和戴彬等^[27]针对黄河

表 5 国内河流沉积物中重金属含量分布情况¹⁾/mg·kg⁻¹
Table 5 Distribution of heavy metal contents in domestic river sediments/mg·kg⁻¹

项目	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	文献
黄河春季	82.95	86.93	569.81	11.15	28.22	22.85	60.92	19.81	0.16	17.31	本研究
黄河秋季	75.01	63.11	532.03	10.09	26.33	21.98	54.87	18.85	0.14	15.83	本研究
长江冬季	NA	89.54	NA	18.53	37.40	82.00	174.00	52.40	2.46	60.00	[28]
珠江秋季	NA	75.00	NA	NA	30.00	38.00	162.00	NA	1.67	47.00	[29]
黄土元素背景值	72.70	67.30	740.00	12.40	31.00	22.50	65.40	12.70	0.10	21.00	[20]

1) “NA”表示文献中没有相关数据

甘宁蒙段及下游段得出表层沉积物中 As 和 Cd 含量较高的结果相近. 与珠江秋季和长江冬季对比, 黄河表层沉积物中 Zn、As、Cd 和 Pb 含量远低于这两条河流, 这主要是由于长江和珠江多金属成矿带, 矿产的开采和冶炼导致了周围环境被重金属污染^[30,31], 而黄河流域的矿产主要集中在内蒙、甘肃和山西等地, 同时这些地区的水土流失量大, 占全国水土流失量的 1/3^[32,33], 水土的大量流失则可能会造成泥沙携带污染物向下游及河口迁移的现象^[34,35].

3.2 时空因素对黄河表层沉积物重金属含量的影响

本研究结果表明, 除 Cd 外, 大多数表层沉积物的重金属含量在不同的时空上存在显著差异. 黄河中游区域表层沉积物的重金属含量高于其他 3 个区域. 有研究发现^[36], 库区对泥沙具有截留作用, 而黄河甘宁蒙—中游段水土流失严重, 大量泥沙携带重金属被中游库区截留, 以及多条支流对干流的补给, 导致中游区域表层沉积物的重金属含量较高^[37]. 而库区在进行调水调沙时, 库区的沉积物将会转移至坝下的自然河段中, 造成了万家寨库区坝下和小浪底库区坝下表层沉积物的重金属含量高于前后临近自然河段的现象^[38].

除了空间的差异外, 黄河干流沉积物的重金属含量也存在着时间上的差异. 上游至中游段表层沉积物的 10 种重金属含量, 春季基本高于秋季, 这可能是由于黄河上中游段秋季丰水期流量增大导致^[39], 在河流流量增大后的水力扰动影响下, 使沉积物理化性质发生改变, 同时扰动给体系带来了溶解氧, 促进了沉积物中有机物的氧化, 进而促进重金属的释放^[34], 张倩等^[40]在对黄河上游重金属的研究中发现: 秋季汛期, 再悬浮作用导致沉积物向水体中释放重金属, 与本文的结果一致. 而黄河下游段表层沉积物中 Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As 和 Pb 的含量呈现出秋季高于春季, 黄河下游丰水期污染负荷以非点源为主, 水土流失严重的黄河是大量非点源污染物的承纳体^[41], 导致出现了这 7 种重金属含量秋季高于春季的现象. 不过值得注意的是源区沉积物中重金属含量在春季和秋季未出现明显差异, 这是由于源区河流携带泥沙量少, 地广人稀, 工农业发展程度低, 人为污染较少^[42].

季节与区域的显著影响表明, 季节与区域共同影响着沉积物中 Co、Cu、Zn 和 As 的含量.

3.3 黄河表层沉积物重金属污染评价

RI 评价结果显示, 黄河干流表层沉积物整体都处于轻生态危害, 除了巴彦高勒和三湖河口等个别样点外, 春季的 RI 均值要高于秋季, 这与两季节的重金属含量变化规律一致, 但由于 Cd 的潜在生态危害较高, 导致黄河干流表层沉积物存在较高生态危害, As 元素次之, 与田莉萍等^[43]得出黄河 Cd 和 As 生态危害比较突出的结论一致. 而在甘宁蒙段及小浪底库区出现了两个峰值, 其中巴彦高勒和三湖河口样点位于内蒙古的巴彦淖尔市, 地处河套平原腹地, 有着丰富的矿产和农业资源. 乌云等^[44]和伯英等^[45]的研究也表明了巴彦淖尔市所处的河套平原存在着 As 和 Cd 的污染, 且在该流域的上游分布着众多中小型环保措施不完善的企业, 而在秋季的三湖河口, 由于丰水期雨量增大, 本来存在的大量点源污染便随之汇入黄河干流, 从而导致了该样点在秋季达到了强生态危害, 应加强该区域的污染排放治理; 中游库区由于其对泥沙的截留作用, 导致库区的 RI 往往高于临近自然河段, 尤其是位于中游后方的小浪底库区, 小浪底库区的 RI 值达到了黄河中下游段的峰值, 在水库的调水调沙时期, 携带重金属的泥沙向坝下排放, 因此也要注意在库区坝下可能存在的重金属污染.

地累积指数(I_{geo})的结果同样也表明, 黄河干流表层沉积物存在着 As 和 Cd 轻度~中度的污染, 尤其是在春季. 综上所述黄河干流表层沉积物中 As 和 Cd 的污染应引起足够的重视.

4 结论

- (1) 黄河表层沉积物中 10 种重金属含量大小排序为: Mn > V > Cr > Zn > Ni > Cu > As > Pb > Co > Cd, 只有 V、As 和 Cd 的平均含量在春季和秋季高于黄土元素背景值, 10 种重金属含量在春季整体变化趋势为源区至中游逐渐升高后至下游降低.
- (2) 在不同时空条件下, 黄河表层沉积物中除 Cd 以外 9 种重金属的含量都有显著差异, 时空因素

的共同作用导致中游区域的这 9 种重金属含量高于其他区域。

(3)潜在生态危害指数(RI)表明,黄河表层沉积物只有 Cd 处于中等生态危害,其余皆处于轻生态危害;地累积指数(I_{geo})表明,除 As 和 Cd 处于轻度污染外,黄河沉积物整体呈无污染~轻度污染。为减轻黄河表层沉积物中重金属带来的健康生态危害,应注意对 As 和 Cd 污染的防控,尤其是甘宁蒙段和中游库区。

参考文献:

- [1] Duman F, Aksoy A, Demirezen D. Seasonal variability of heavy metals in surface sediment of Lake Sapanca, Turkey [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, **133**(1-3): 277-283.
- [2] Liu M D, He Y P, Baumann Z, *et al.* The impact of the Three Gorges Dam on the fate of metal contaminants across the river-ocean continuum [J]. *Water Research*, 2020, **185**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116295.
- [3] Besser J M, Brumbaugh W G, Allert A L, *et al.* Ecological impacts of lead mining on Ozark streams: toxicity of sediment and pore water [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, **72**(2): 516-526.
- [4] Lv J X, Hu R J, Wang N, *et al.* Distribution and movement of heavy metals in sediments around the coastal areas under the influence of multiple factors: a case study from the junction of the Bohai Sea and the Yellow Sea [J]. *Chemosphere*, 2021, **278**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130352.
- [5] Zheng N, Wang Q C, Liang Z Z, *et al.* Characterization of heavy metal concentrations in the sediments of three freshwater rivers in Huludao City, Northeast China [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **154**(1): 135-142.
- [6] Hiller E, Jurkovič L, Šutriepka M. Metals in the surface sediments of selected water reservoirs, Slovakia [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2010, **84**(5): 635-640.
- [7] Lin L, Li C, Yang W J, *et al.* Spatial variations and periodic changes in heavy metals in surface water and sediments of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Chemosphere*, 2020, **240**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124837.
- [8] 陈静生, 王飞越, 陈江麟. 论小于 63 μm 粒级作为水体颗粒物重金属研究介质的合理性及有关粒级转换模型研究 [J]. *环境科学学报*, 1994, **14**(4): 419-425.
- Chen J S, Wang F Y, Chen J L. Relation of aquatic particulate grain size to heavy metals concentrations in eastern Chinese rivers [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1994, **14**(4): 419-425.
- [9] 倪晋仁, 高晓薇. 河流综合分类及其生态特征分析 II: 应用 [J]. *水利学报*, 2011, **42**(10): 1177-1184.
- Ni J R, Gao X W. Comprehensive approach for classification of river systems and identification of ecological characteristics II. Applications [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, **42**(10): 1177-1184.
- [10] 胡春宏, 张晓明. 黄土高原水土流失治理与黄河水沙变化 [J]. *水利水电技术*, 2020, **51**(1): 1-11.
- Hu C H, Zhang X M. Loess Plateau soil erosion governance and runoff-sediment variation of Yellow River [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, **51**(1): 1-11.
- [11] 宁建凤, 邹献中, 杨少海, 等. 广东大中型水库底泥重金属含量特征及潜在生态风险评价 [J]. *生态学报*, 2009, **29**(11): 6059-6067.
- Ning J F, Zou X Z, Yang S H, *et al.* Heavy metal contents analysis and potential ecological risk appraisal to sediments of large and medium -scaled reservoirs in Guangdong Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(11): 6059-6067.
- [12] Chen Y, Li S, Zhang Y, *et al.* Assessing soil heavy metal pollution in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **191**(1-3): 366-372.
- [13] 吴斌, 宋金明, 李学刚. 黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1324-1332.
- Wu B, Song J M, Li X G. Environmental characteristics of heavy metals in surface sediments from the Huanghe estuary [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1324-1332.
- [14] 夏修杰, 郑军, 万强. 黄河中下游泥沙重金属污染现状及原因分析 [J]. *人民黄河*, 2018, **40**(8): 19-21, 26.
- Xia X J, Zheng J, Wan Q. Analysis of the heavy metal pollution of sediment in middle and lower Yellow River [J]. *Yellow River*, 2018, **40**(8): 19-21, 26.
- [15] Cuo L, Zhang Y X, Gao Y H, *et al.* The impacts of climate change and land cover/use transition on the hydrology in the upper Yellow River Basin, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, **502**: 37-52.
- [16] Molinas A, Wu B S. Transport of sediment in large sand-bed rivers [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2001, **39**(2): 135-146.
- [17] 陈怡平, 傅伯杰. 黄河流域不同区段生态保护与治理的关键问题 [N]. *中国科学报*, 2021-03-02(007).
- [18] 丁一桐, 潘保柱, 赵耿楠, 等. 黄河干流全河段浮游植物群落特征与水质生物评价 [J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(2): 891-901.
- Ding Y T, Pan B Z, Zhao G N, *et al.* Phytoplankton in the mainstem of the Yellow River: community characteristics and bioassessment of water quality [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(2): 891-901.
- [19] Jiang Z G, Xu N, Liu B X, *et al.* Metal concentrations and risk assessment in water, sediment and economic fish species with various habitat preferences and trophic guilds from Lake Caizi, Southeast China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **157**: 1-8.
- [20] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [21] 徐争启, 倪树军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算 [J]. *环境科学与技术*, 2008, **31**(2): 112-115.
- Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, *et al.* Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **31**(2): 112-115.
- [22] 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. 330-492.
- [23] 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.
- [24] 辛成林, 任景玲, 张桂玲, 等. 黄河下游水体悬浮颗粒物中金属元素的地球化学行为 [J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(10): 3127-3134.
- Xin C L, Ren J L, Zhang G L, *et al.* Geochemistry of metals in the suspended particles in the lower reach of the Huanghe [J].

- China Environmental Science, 2015, **35**(10): 3127-3134.
- [25] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *GeoJournal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [26] Tian M J, Ma X L, Jia J, *et al.* The exposure level of heavy metals at four different locations near Gan-Ning-Meng reaches of the Yellow River, China [J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2016, **22**(8): 1620-1635.
- [27] 戴彬, 吕建树, 战金成, 等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 507-515.
- Dai B, Lv J S, Zhan J C, *et al.* Assessment of sources, spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in a typical industry-based city of Shandong Province, Eastern China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 507-515.
- [28] 何佳, 时迪, 王贝贝, 等. 10 种典型重金属在八大流域的生态风险及水质标准评价[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(7): 2970-2982.
- He J, Shi D, Wang B B, *et al.* Ecological risk assessment and water quality standard evaluation of 10 typical metals in eight basins in China [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(7): 2970-2982.
- [29] 朱青青, 王中良. 中国主要水系沉积物中重金属分布特征及来源分析[J]. *地球与环境*, 2012, **40**(3): 305-313.
- Zhu Q Q, Wang Z L. Distribution characteristics and source analysis of heavy metals in sediments of the main river systems in China [J]. *Earth and Environment*, 2012, **40**(3): 305-313.
- [30] 王岚, 王亚平, 许春雪, 等. 长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价[J]. *环境科学*, 2012, **33**(8): 2599-2606.
- Wang L, Wang Y P, Xu C X. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the surface sediments of the Yangtze River [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(8): 2599-2606.
- [31] 谢文平, 王少冰, 朱新平, 等. 珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价[J]. *环境科学*, 2012, **33**(6): 1808-1815.
- Xie W P, Wang S B, Zhu X P, *et al.* Residues and potential ecological risk assessment of metal in sediments from lower reaches and estuary of Pearl River [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(6): 1808-1815.
- [32] 马丽, 田华征, 康蕾. 黄河流域矿产资源开发的生态环境影响与空间管控路径[J]. *资源科学*, 2020, **42**(1): 137-149.
- Ma L, Tian H Z, Kang L. Eco-environmental impact and spatial control of mineral resources exploitation in the Yellow River Basin [J]. *Resources Science*, 2020, **42**(1): 137-149.
- [33] 宋梅, 郝旭光, 李丹丹, 等. 黄河流域采矿业集聚的时空演化特征与驱动力研究[J]. *煤炭工程*, 2021, **53**(9): 165-172.
- Song M, Hao X G, Li D D, *et al.* Spatiotemporal evolution characteristics and driving forces of mining industry agglomeration in the Yellow River Basin [J]. *Coal Engineering*, 2021, **53**(9): 165-172.
- [34] 陈三雄, 周春坚, 谢江松, 等. 广东大宝山矿区堆积土水土流失对重金属迁移量的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, **35**(1): 16-21.
- Chen S X, Zhou C J, Xie J S, *et al.* Effects of soil erosion of accumulative soil on the migration of heavy metals in Dabaoshan mining area, Guangdong Province [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, **35**(1): 16-21.
- [35] 方志青, 陈秋禹, 尹德良, 等. 三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2607-2614.
- Fang Z Q, Chen Q Y, Yin D L, *et al.* Distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in the sediments of the estuary of the tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2607-2614.
- [36] 敖亮, 单保庆, 张洪, 等. 三门峡库区河流湿地沉积物重金属赋存形态和风险评价[J]. *环境科学*, 2012, **33**(4): 1176-1181.
- Ao L, Shan B Q, Zhang H, *et al.* Heavy metals distribution and risk assessment of sediments in the riverine wetland of Sanmenxia Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(4): 1176-1181.
- [37] Gao L, Gao B, Xu D Y, *et al.* Multiple assessments of trace metals in sediments and their response to the water level fluctuation in the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **648**: 197-205.
- [38] Tang A K, Liu R H, Ling M, *et al.* Distribution characteristics and controlling factors of soluble heavy metals in the Yellow River Estuary and adjacent sea [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, **2**: 1193-1198.
- [39] 黄建平, 张国龙, 于海鹏, 等. 黄河流域近 40 年气候变化的时空特征[J]. *水利学报*, 2020, **51**(9): 1048-1058.
- Huang J P, Zhang G L, Yu H P, *et al.* Characteristics of climate change in the Yellow River basin during recent 40 years [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, **51**(9): 1048-1058.
- [40] 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.
- [41] 李强坤, 李怀恩, 胡亚伟, 等. 黄河干流潼关断面非点源污染负荷估算[J]. *水科学进展*, 2008, **19**(4): 460-466.
- Li Q K, Li H E, Hu Y W, *et al.* Estimation of non-point source pollution loading on Tongguan section of the Yellow River [J]. *Advances in Water Science*, 2008, **19**(4): 460-466.
- [42] 徐小玲, 延军平, 梁煦枫. 三江源区径流量变化特征与人为影响程度[J]. *干旱区研究*, 2009, **26**(1): 88-93.
- Xu X L, Yan J P, Liang X F. Evaluation of changes in runoff and the effect of human activities in the Source area of Three Rivers [J]. *Arid Zone Research*, 2009, **26**(1): 88-93.
- [43] 田莉萍, 孙志高, 王传远, 等. 调水调沙工程黄河河口近岸沉积物重金属和砷含量的空间分布及其生态风险评估[J]. *生态学报*, 2018, **38**(15): 5529-5540.
- Tian L P, Sun Z G, Wang C Y, *et al.* Spatial distribution of heavy metals and As concentrations and assessment of their ecological risk in inshore sediments, affected by the flow-sediment regulation scheme in the Yellow River estuary [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(15): 5529-5540.
- [44] 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 Wuliangsu [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, **25**(4): 143-148.
- [45] 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.

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Urban Area of Beijing	AN Xin-xin, CAO Yang, WANG Qin, <i>et al.</i> (2251)
Modeling of PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Using a Space-time Linear Mixed Effects Model	FAN Li-hang, YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, <i>et al.</i> (2262)
Spatio-temporal Evolution Patterns of PM _{2.5} and Relationship with Urban Expansion in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2018	ZHAO An-zhou, XIANG Kai-zheng, LIU Xian-feng, <i>et al.</i> (2274)
Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} in Qingdao in Winter Under the Action of Sea-Land-Atmosphere Convergence	TUO Xiong, YANG Ling-xiao, ZHANG Wan, <i>et al.</i> (2284)
Impacts of Heterogeneous Uptake Pathway on Sulfate Formation: A Case Study in Shanghai Based on WRF-Chem	ZHANG Ru-han, ZHANG Hao-ran, FENG Wei-hang, <i>et al.</i> (2294)
Source Apportionment and Seasonal Changes in PM _{2.5} Chemical Components from Different Functional Areas of a Provincial Capital City	SUN You-min, FAN Jing, XU Biao, <i>et al.</i> (2304)
Chemical Compositions, Light Extinction Effect, and Oxidative Potential of PM _{2.5} Under Different Pollution Levels During Winter in Taiyuan	REN Jiao, ZHAO Rong-rong, WANG Ming, <i>et al.</i> (2317)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Metal Elements in Ambient PM _{2.5} in the Winter of Zhengzhou	YAO Sen, WANG Qian-heng, XUE Yan, <i>et al.</i> (2329)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Zibo City	BAI Wen-yu, XU Bo, GUO Li-yao, <i>et al.</i> (2336)
Seasonal Distribution Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Evaluation of PAHs in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, LI Yi-lin, <i>et al.</i> (2343)
Pollution Level and Regional Migration of PCDD/Fs in Ambient Air from Pearl River Delta, China	FU Jian-ping, XIE Dan-ping, HUANG Jin-qiong, <i>et al.</i> (2355)
Concentrations and Sources of Black Carbon Aerosols in Rural Areas of Southern North China Plain	ZHANG Ling, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2363)
Research on Causes of Severely Polluted Weather in Tianjin Based on Process Analytical Technology	HAO Jian, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (2373)
Classification Control of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Pollution Sources Based on Emission Amounts and Atmospheric Reactivity	CHEN Peng, ZHANG Yue, XING Min, <i>et al.</i> (2383)
Complex Networks Reveal the Characteristics of Ozone in China	YING Na, CHEN Jian-hua, LI Dong, <i>et al.</i> (2395)
Ozone Simulation of Lanzhou City Based on Multi-scenario Emission Forecast of Ozone Precursors in the Summer of 2030	CHEN Tian-lei, WU Min, PAN Cheng-ke, <i>et al.</i> (2403)
Improvement of Environmental Model Prediction Based on Inversion and Aerosol Assimilation	CAI Zi-ying, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (2415)
Method of Identifying Air Pollution from Iron and Steel Industry Based on Ambient Air Quality Monitoring Data Analysis	SHI Yao-peng, HU Jing-nan, CHU Yang-xi, <i>et al.</i> (2427)
Assessment of "Differentiated Response Requirement Based on Performance Grading" Policy During Heavy Air Pollution Alert	ZENG Jing-hai, WANG Can (2436)
Risk Zoning of Water Pollution in the Yellow River Basin	ZHOU Xia-fei, CAO Guo-zhi, YU Fang, <i>et al.</i> (2448)
Emission Characteristics of Industrial Water Pollutants in Gansu Section of the Yellow River Basin	LI Xue-ying, YANG Xi, QIAO Qi, <i>et al.</i> (2459)
Spatial-temporal Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Yellow River	WANG Tao-yi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (2467)
APCS-MLR Combined with PMF Model to Analyze the Source of Metals in Sediment of Xinglin Bay Suburban Watershed, Xiamen	SHEN Chen-yu, YAN Yu, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2476)
Spatial Differentiation Characteristics and Response Relationship of DOM, Nutrients, and Heavy Metals in River Sediments	XIAO Yan-chun, YU Hui-bin, SONG Yong-hui (2489)
Distribution Characteristics, Evaluation, and Source Analysis of Heavy Metals in Soils of Fenhe Riparian Zone in Taiyuan City	HU Jie, ZHAO Xin-yu, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (2500)
Binding Affinity Between Heavy Metal Hg and Dissolved Organic Matter in Hongze Lake	HU Bin, WANG Pei-fang, ZHANG Nan-nan, <i>et al.</i> (2510)
Ecosystem Evolutionary Trajectory of Lake Xiliang over the Past Century Driven by Eutrophication	ZHENG Jia-nan, XU Min, ZHENG Wen-xiu, <i>et al.</i> (2518)
Sediment Release and Pollution Source Analysis of Typical Reservoirs in the Upper Reaches of the Yellow River Based on DGT Technology	MA Yu-shen, ZHU Xiang, PANG Qing-qing, <i>et al.</i> (2527)
Differential Characteristics and Source Identification of Water Quality of the Rivers in Northern Henan Before and After Rainstorm	ZHANG Yan, ZOU Lei, LIANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2537)
Adsorption and Interception Effects of <i>Eichhornia crassipes</i> on Microplastics in Water of the Poyang Lake Basin	LI Wen-gang, WU Xi-en, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2548)
Spatiotemporal Distribution and Ecological Risk Assessment of Plastic Additives in Taihu Lake	LIU Shu-jiao, DING Jian-nan, SHI Jun-zhe, <i>et al.</i> (2557)
Distribution Characteristics, Sources, and Storage of Microplastics in Surface Sediments of Luoma Lake	YAO Ming-xuan, BAI Xue, XU Zhen-jia, <i>et al.</i> (2566)
Pollution Characteristics of Phosphorus in Different Media in Taihu Lake and Its Treatment Enlightenment	CAI Mei, LU Zhi-hua, WANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (2575)
Analysis on Diversity and Structure of Microbial Community in River Sediment of Siping Section of Liaohe River	LI Peng-yang, AN Qi-rui, WANG Xin-hao, <i>et al.</i> (2586)
Non-point Source Pollution (NPSP) Induces Structural and Functional Variation in Bacterial Communities in Sediments of Jialing River	XUE Yu-qin, XU Fei, LIU Kun-he, <i>et al.</i> (2595)
Effects of Microplastics on Bacterial Community Composition and Diversity in Sediments	LI Wen-lu, WANG Zhi-chao, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (2606)
Vertical Distribution Characteristics and Community Construction of Aerobic Denitrification Bacteria from the Sediments of Baiyangdian Lake During the Winter Freezing Period	ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, <i>et al.</i> (2614)
Effect of Induced Mixing on Bacterial Community Structure and Metabolic Activity in Reservoir	GAO Yue, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in <i>Bellamyia aeruginosa</i> in Typical Area of Poyang Lake	JIANG Wei-qun, HU Qi-wu, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2633)
Electrocatalytic Oxidation of Bisphenol A by Porous Ti/SnO ₂ -Sb-Ni Electrode Loaded with Multi-wall Carbon Nanotubes	FU Yuan-hang, LIU An-di, HUANG Wei-bin, <i>et al.</i> (2640)
Efficiency and Mechanism of Degradation of Methylene Blue with H ₂ O ₂ Catalyzed by Magnetic Mn _{0.4} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄ @SiO ₂	XU Dong-ying, YU Jing, HAO Qi, <i>et al.</i> (2650)
Effect of Two Types of Nanoparticles on the Adsorption of Ciprofloxacin on Zeolite	JIANG Lan-cui, MENG Zhao-fu, LIU Xian, <i>et al.</i> (2662)
Adsorption Mechanisms and Effect Factors of As(V) by AMD Sludge Composite Material	ZHANG Ya-hui, ZHANG Rui-xue, WU Pan, <i>et al.</i> (2673)
Shifts in Microbial Community and Variation in Functional Genes for Nitrification and Denitrification in Activated Sludge Affected by Triclosan and Its Transformed Intermediates	LU Ying-yuan, DONG Xiao-qi, PENG Xing-xing, <i>et al.</i> (2685)
Construction of Sustainability Evaluation Index System for Contaminated Site Risk Management and Analysis on Key Influential Factors	LI Xiao-nuo, YI Shi-yi, CHEN Wei-ping (2699)
Construction and Empirical Analysis of a Comprehensive Evaluation Method of Coastal Wetland Soil Quality Based on Ecological Functions	ZHANG Xue, KONG Fan-long, JIANG Zhi-xiang (2709)
Source Analysis and Pollution Assessment of Heavy Metals in Farmland Soil Around Tongshan Mining Area	CHEN Hang, WANG Ying, WANG Shu (2719)
Effects of Typical Iron and Manganese Minerals on Arsenic Speciation and Enzyme Activities in Paddy Soil	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Kai, <i>et al.</i> (2732)
Phytoremediation Efficiency of Two Cultivars of <i>Brassica napus</i> L. Under Water-soluble Chitosan Treatment in Typical Pb-contaminated Farmland Soils	MENG Xiao-fei, ZHENG Guo-di, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2741)
Risk Prediction of Cadmium and Lead in Wheat Grains Based on Bayes Theorem	WANG Tian-qi, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (2751)
Interannual Variation Characteristics of Nitrogen Loss Under Rapeseed/Maize Rotation in Purple Soil Sloping Field	XU Man, GAO Ming, YU Luo, <i>et al.</i> (2758)
Physicochemical Properties of Biochars Prepared from Different Feedstocks and Evaluation of Its Potential as A Slow-release Carriers for Biochar-based Fertilizers	XING Li-bin, CHENG Jie, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (2770)
Effects of Combined Application of Wood Vinegar-Acidified Biochar and Nitrogen on Active Nitrogen and Ammonia Volatilization in Saline Soil	SHEN Shu-wei, ZHANG Dan-dan, WANG Min-ge, <i>et al.</i> (2779)
Effects of Biodegradable Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions Under Wheat-Maize Rotation System in the Guanzhong Plain	GUO Yi-ting, LUO Xiao-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (2788)
Forest Soil Microbial Community Structure Characteristics and Its Influencing Factors at Different Elevations on the Southern Slope of Daiyun Mountain	HE Zhong-sheng, WANG Zi-wei, ZHU Jing, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Simulated Warming and Increased Precipitation on Soil Extracellular Enzyme Activity and Enzymatic Stoichiometry of Abandoned Grassland	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, JIAN Jun-nan, <i>et al.</i> (2812)
Contribution of Urbanization to Local Warming in Major Cities of China	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei, <i>et al.</i> (2822)