

目次

复合污染条件下人为源 VOCs 的 SOA 生成研究进展	陈天增, 刘俊, 马庆鑫, 楚碧武, 张鹏, 刘永春, 刘昌庚, 贺泓 (1201)
全氟和多氟烷基化合物微生物降解与转化研究进展	孙红文, 方博, 陈浩, 赵茂森, 张耀之, 乔碧汀, 喻蒙 (1214)
湖泊水质参数遥感监测研究进展	王思梦, 秦伯强 (1228)
淡水环境中微塑料与重金属的“木马效应”研究进展	赵伟高, 田一梅, 赵鹏, 赵令铨, 金超 (1244)
长江经济带二氧化碳净排放时空演变特征及脱钩效应	吴一帆, 许杨, 唐洋博, 贾宁, 李玮, 李翀, 殷国栋 (1258)
中国土地利用碳排放变化及协调分区	李缘缘, 魏伟, 周俊菊, 郝瑞军, 陈帝伯 (1267)
基于 STIRPAT 模型天津减污降碳协同效应多维度分析	刘茂辉, 岳亚云, 刘胜楠, 李婧, 刘佳泓, 孙猛 (1277)
基于燃料生命周期的中国铁路排放趋势	佟惠, 范朝阳, 梁晓宇, 孙露娜, 门正宇, 赵肖阳, 毛洪钧 (1287)
浙江省大气颗粒物 PM _{2.5} 化学组分污染特征分析	周菁清, 余磊, 陈书鑫, 陆佳峰, 许亚璐, 季海冰, 张柳芳, 刘劲松, 王静 (1297)
南京亚微米级颗粒物化学组成的季节变化、粒径分布和来源	徐振麒, 尚玥, 丁峰, 谢鸣捷, 王勤耕 (1310)
洛阳地区碳质组分季节特征及来源解析: 棕碳的重要贡献	闫广轩, 侯明阳, 张朴真, 王洁琦, 王虎, 李崇浩, 王跃思 (1319)
江苏省 2019 年 S/IVOCs 排放清单及分布特征	宋童艾, 张佳颖, 关璐, 胡建林, 于兴娜 (1328)
珠三角典型工业区挥发性有机物 (VOCs) 组成特征: 含氧挥发性有机物的重要性	宋鑫, 袁斌, 王思行, 何贤俊, 李小兵, 彭钰雯, 陈钰彬, 齐吉朋, 蔡嘉骅, 黄山, 胡丹, 魏文, 刘可旋, 邵敏 (1336)
2000 ~ 2020 年天津市机动车全过程 VOCs 排放特征及演变	孙露娜, 仲崇智, 孙世达, 刘妍, 佟惠, 吴亚君, 宋鹏飞, 张丽娜, 黄旭, 吴琳, 毛洪钧 (1346)
港口自有移动源大气污染物排放清单	徐小凡, 王宝庆, 吴俊成, 李怡诺 (1357)
基于改进水资源生态足迹模型的中国水资源可持续利用仿真及调控	欧阳兴涛, 廖浩宇, 姜秋香, 王子龙 (1368)
黄河流域入海口典型区域有机磷酸酯分布特征和风险评估	曹渺, 郭昌胜, 张恒, 刘士清, 陈苗, 吕佳佩, 侯嵩, 尤新军, 徐建 (1378)
桂林会仙岩溶湿地水体与沉积物中有机氯农药污染特征	余悦, 邢新丽, 程铖, 刘威杰, 张标, 孔祥胜, 李森, 余海阔, 罗为群, 祁士华 (1387)
广东茂名主要水系表层沉积物重金属风险评估及源解析	陈小霞, 张敏, 李蓓, 温鹏翀, 丁平, 姚玲爱, 马千里, 李廷真, 蔡丹, 胡国成 (1397)
宁波市地表水重金属时空分布特性和健康风险评价	徐美娟, 杨佳, 任晓景, 赵红燕, 高夫燕, 蒋跃军 (1407)
典型西北山地-绿洲系统不同水体水化学特征及其水力关系分析	王诗语, 孙从建, 陈伟, 周思捷, 张鑫 (1416)
牟汶河中上游孔隙水化学特征及控制因素	刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 邓启军, 郑一迪, 李常锁 (1429)
石河子-昌吉地区地下水水质时空变化及污染源解析	丁启振, 周金龙, 季彦桢, 杨方源, 张淑霞 (1440)
北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制及其阈值分析	温成成, 黄廷林, 孔昌昊, 张志刚, 田鹏飞 (1452)
拉林河流域底栖硅藻群落结构特征及水生态健康评价	单涛, 袁安龙, 黄子芮, 周静怡, 陆欣鑫, 范亚文 (1465)
南昌市湖泊丰水期浮游细菌群落结构及影响因素	高鹏飞, 王鹏, 黄伟, 丁明军, 张华, 聂明华, 黄高翔 (1475)
调蓄水库细菌群落季节变化特征与影响因素	丁宁, 杨莹莹, 万年新, 徐爱玲, 葛建华, 宋志文 (1484)
典型城市内河细菌群落组成与氮循环功能垂直分布及溯源分析	谭秋阳, 吕金燕, 白献宇, 程莉蓉, 李晓艳, 郭蕾 (1497)
滇中高原水库外源污染负荷贡献解析与环境容量核算	郭玉静, 李红兵, 王树明, 白乙娟, 任良锁, 丁爱中 (1508)
窄孔径含磷棉秆生物质炭的制备及对四环素的吸附机制	曾少毅, 李坤权 (1519)
高比表面疏脲改性花生壳炭的制备及对四环素和铜的吸附	闵炳坤, 李坤权 (1528)
不同供水管材生物膜抗生素抗性基因分布特征	刘晨旭, 白晓慧 (1537)
水蚀环境植被恢复对土壤有机碳固存和团聚体稳定的影响: Meta 分析	杨睿哲, 杨世龙, 翁希哲, 徐灵颖, 刘雪健, 杜运田, 张雪辰, 郑伟, 翟丙年, 王朝辉, 李紫燕 (1542)
增温施肥对稻麦农田土壤有机碳及其活性组分的影响	邓旭哲, 韩晨, 薛利祥, 侯朋福, 薛利红, 杨林章 (1553)
三江源地区高寒草地土壤功能的水平分异特征及其沿发生层的垂直变化	李柏键, 申聪聪, 刘四义, 吴华勇, 王继琛, 赵冬辉, 葛源 (1562)
鄱阳湖平原直播稻 CH ₄ 通量及其与 CO ₂ 通量的综合温室效应	时元智, 崔远来, 时硕, 洪大林, 程婕 (1572)
不同土地利用类型土壤多环芳烃的纵向污染特征及来源解析	周芷嫣, 张秀秀, 王飞, 朱昌达, 潘剑君 (1583)
石家庄道路灰尘中全氟/多氟化合物及其新型替代品的污染特征及健康风险评估	李鹏飞, 王媛, 杨晨, 史亚利, 崔建升 (1593)
南方典型矿区农业小流域耕地土壤重金属空间分布特征及污染评价	杨宇, 郭婷婷, 刘孝利, 铁柏清 (1602)
三峡库区(重庆段)菜地土壤重金属污染特征、潜在生态风险评估及源解析	石雨佳, 方林发, 方标, 叶莘莘, 范晓霞, 高坤鹏, 陈征, 肖然 (1611)
兰州市耕地表层土壤重金属的积累特征及其影响因素分析	康乐, 彭鑫波, 马延龙, 张利瑞, 张妍娥, 王泉灵, 张松林 (1620)
粤北典型工矿区土壤重金属富集特征、来源解析及风险评价	王越, 莫莉, 余新晓, 师华定, 费杨 (1636)
三门峡某铝业厂遗留场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	卢小慧, 余方中, 范一鸣, 杨阳 (1646)
某试验场土壤重金属分布特征及其污染评价	王诗雨, 李淳, 赵洪伟, 陈希, 张慧君, 朱勇兵, 赵三平, 计超, 刘晓东 (1657)
化学淋洗联合电动技术修复重金属污染土壤的效果及其机制	马强, 卫泽斌, 吴启堂 (1668)
再生铜冶炼过程中重金属排放特征和控制	林炳丞, 吴广龙, 郑明辉, 刘国瑞 (1678)
长江流域(安徽段)土壤-作物系统重金属污染特征及健康风险评价	刘海, 魏伟, 黄健敏, 赵国红 (1686)
稻-麦轮作模式下不同钝化材料对镉污染农田土壤的原位钝化效应	张路, 唐婵, 余海英, 李廷轩, 张锡洲, 黄化刚 (1698)
巯基化蒙脱石用于镉污染农田安全生产的效果及其持久性	冯先翠, 陈亚刚, 焦洪鹏, 曹鹏, 朱凤榕, 李媛媛, 江海燕 (1706)
蚯蚓、秸秆和柠檬酸对少花龙葵与韭菜修复铅镉污染土壤的影响	陈敏妮, 袁小奇, 张金峰, 何川黔, 高波 (1714)
地质高背景区富 Se 耕地可利用性研究及区划建议	王锐, 李瑜, 余京, 周蛟, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (1727)
张家口市北新屯地区蔬菜种植区锆元素富集特征及成因分析	安永龙, 殷秀兰, 金爱芳, 李文娟, 鲁青原 (1735)
三峡库区消落带落叶杉人工林土壤细菌群落结构多样性及动态变化	谭雪, 董智, 张丽苗, 袁中勋, 李昌晓 (1748)
黄土丘陵区退耕还林对土壤真菌群落的影响	张蕾, 王强, 杨新月, 吕俊平 (1758)
化肥减量配施有机肥对土壤功能微生物和柠檬产量及品质的影响	王蕊燕, 熊子怡, 罗东海, 王子芳, 高明 (1768)
鸡粪和猪粪生物发酵过程中抗生素抗性基因的动态变化	张丹, 彭双, 王丹青, 王一鸣, 林先贵 (1780)
牛粪还田对土壤微生物群落特征的影响	张雅丽, 郭晓明, 胡慧, 郭暖, 徐小涛, 李建林 (1792)
《环境科学》征订启事(1406) 《环境科学》征稿简则(1592) 信息(1635, 1667, 1677)	

广东茂名主要水系表层沉积物重金属风险评估及源解析

陈小霞^{1,2}, 张敏^{1,2}, 李蓓^{2,3}, 温鹏翀², 丁平², 姚玲爱², 马千里², 李廷真¹, 蔡丹², 胡国成^{1,2*}

(1. 重庆三峡学院环境与化学工程学院, 重庆 404130; 2. 生态环境部华南环境科学研究所, 国家环境保护环境污染健康风险评估重点实验室, 广州 510535; 3. 锦州医科大学公共卫生学院, 锦州 121000)

摘要: 为了解广东茂名主要水系表层沉积物重金属的空间分布特征及其污染来源, 合理评价研究区域沉积物重金属的生态风险, 对茂名市 8 条河流和 3 座水库表层沉积物中重金属 (As、Hg、Cd、Co、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb 和 Zn) 含量进行分析. 采用地累积指数、潜在生态风险指数和潜在生物毒性效应评估重金属的生态风险; 使用主成分分析和正定矩阵因子分解模型解析重金属的来源. 结果表明, 表层沉积物中 $\omega(\text{Zn})$ ($147.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和 $\omega(\text{Hg})$ ($0.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 水平较高, 分别超背景值 3.72 倍和 2.25 倍. Cd、Co、Cu、Mn、Ni 和 Zn 含量水平在空间分布上表现为: 北部 > 中部 > 西部 > 东南部. 地累积指数结果显示 Zn 为偏中度污染, 76.6% 采样点的 Hg 为轻度-偏重度污染, 其余元素整体为无-轻度污染. 潜在生态风险和潜在生物毒性评估结果均表明高州水库潜在生态风险指数和毒性效应较其他水系高, 且 Hg 为主要贡献元素. 主成分分析和正定矩阵因子分解模型提取的 3 个因子分别代表自然源、农业面源和工业源. 因此, 为降低沉积物中重金属带来的健康危害, 应注重对 Hg 的防控治理.

关键词: 茂名; 沉积物; 重金属; 污染特征; 生态风险评估; 源解析

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)03-1397-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202204250

Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments from Major River Systems in Maoming City, Guangdong Province

CHEN Xiao-xia^{1,2}, ZHANG Min^{1,2}, LI Bei^{2,3}, WEN Peng-chong², DING Ping², YAO Ling-ai², MA Qian-li², LI Ting-zhen¹, CAI Dan², HU Guo-cheng^{1,2*}

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404130, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Pollution Health Risk Assessment, South China Institute of Environmental Science, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510535, China; 3. School of Public Health, Jinzhou Medical University, Jinzhou 121000, China)

Abstract: In order to understand the spatial distribution and sources of heavy metals in surface sediments of Maoming city and to reasonably evaluate the ecological risk of heavy metals in sediments of the study area, the contents of heavy metals (As, Hg, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, and Zn) in surface sediments of eight rivers and three reservoirs were detected, and the risks of heavy metals were assessed using the geo-accumulation index (I_{geo}), potential ecological risk index (RI), and potential adverse biological impacts ($\sum \text{TUs}$). The sources of heavy metals were analyzed via correlation, principal component analysis (PCA), and positive matrix factorization (PMF).

The results showed that the $\omega(\text{Zn})$ ($147.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) and $\omega(\text{Hg})$ ($0.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) were 3.72 and 2.25 times the background value, respectively, and the spatial distributions of Cd, Co, Cu, Mn, Ni, and Zn were in the order of northern > central > western > southeast. The geo-accumulation index results showed that Zn was at a moderate pollution level, 76.6% of the sampling sites of Hg were at a light-heavy pollution level, and other heavy metals were at a non-light pollution level. The results of potential ecological risk and potential adverse biological impacts indicated that the potential ecological risk index and toxicity effect of Gaozhou Reservoir were higher than those of other rivers, and Hg was the major contributor to heavy metal pollution. The three factors extracted from principal component analysis and positive matrix factorization represented natural sources, agricultural sources, and industrial sources, respectively. Therefore, in order to reduce the health hazards caused by heavy metals in sediments, a prevention and control system for the Hg element should be established.

Key words: Maoming; sediments; heavy metals; pollution characteristics; risk evaluation; source analysis

广东省茂名市是以工业化为标志的城市, 20 世纪 50 年代发现的油页岩促进了当地经济发展^[1], 工业在提升社会经济水平的同时, 产生的重金属污染严重影响着人类生存的环境^[2]. 通过陆上内循环过程, 重金属被输送到水环境中^[3], 被水生生物利用、悬浮于水体, 最终在沉积物中平衡^[4,5]. 当重金属含量水平到达一定阈值, 会危害水资源利用者的健康^[6]. Ma 等^[7]评估茂名市油页岩露天矿区重金属的生物利用度, 发现修复后的矿区对人体健康风险依然很高; 胡国成等^[8]评估了高州水库 15 个采样点位的重金属风险, 发现地累积指数和生物效应浓

度评价法更能精确反映研究区重金属污染特征, 结果显示 Zn 和 Cr 属于中度污染, 对底栖生物影响较大; 王妙等^[9]分析了粤西三座水库重金属污染, 表明 Zn 和 Pb 的生态危害较高与当地发达的农业有关, 大量农药化肥累积在土壤中并随雨水冲刷进入水库. 目前, 研究仅针对茂名市个别水库或典型矿

收稿日期: 2022-04-21; 修订日期: 2022-06-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1801505); 广州市科技计划项目(201707010220)

作者简介: 陈小霞(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为沉积物中有害有毒物质环境行为和效应, E-mail: 1399041719@qq.com

* 通信作者, E-mail: huguocheng@scies.org

区,对全方位表层沉积物的重金属分析报道较少。

基于以上情况,本研究选择了茂名市的 8 条重点河流(鉴江、小东江、袂花江、罗江、黄华江、罗定江、寨头河、杨梅河)和 3 座典型水库(高州水库、罗坑水库、名湖水库)为研究区域,分析表层沉积物中 10 种重金属(As、Hg、Cd、Co、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb 和 Zn)的含量水平和空间分布特征,解析其污染来源,评价其潜在生态风险及潜在生物毒性效应,以期为今后相关的研究提供数据支持和理论参考。

1 材料与方法

1.1 样点设置与样品采集

根据流域的不同断面、周边工业布局和采集样品时的难易度,在 8 条重点河流和 3 个典型水库共设置了 128 个采样点位,具体分布如图 1 所示。2021 年 11 月,前往广东省茂名市进行沉积物样品采集。使用木铲采集可涉水河流的表层沉积物,使用抓泥斗采集不可涉水河流和水库中的沉积物,每次进行样品采集时,用采样点位对应的水体润洗采样工具。

将沉积物中较大体积的石块、残叶和底栖生物体剔除,混匀样品后装入铝箔袋中,放入 -20°C 的冰箱中保存^[10]。

1.2 样品实验分析

取适量的沉积物样品冷冻干燥,研磨后过 100 目筛网,保存在聚乙烯自封袋中放置阴凉干燥处。采用《土壤和沉积物 12 种金属元素的测定 王水提取-电感耦合等离子体质谱法》(HJ 803-2016)^[11] 中电热板消解法对沉积物样品进行前处理分析,使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS-NexION 2000, Perkin Elmer, 美国)测定样品 Cd。使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES-700, Agilent, 美国)测定样品中的 Co、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb 和 Zn; 采用《土壤和沉积物 汞、砷、硒、铋、锑的测定 微波消解原子荧光法》(HJ 680-2013)^[12] 对沉积物样品进行前处理,使用原子荧光光度计(AFS-8230, 北京吉天仪器有限公司, 中国)测定 As 和 Hg。实验所用试剂均为优级纯(上海国药集团, 中国)。利用空白、平行和国家标准沉积物样品(GBW07309 GSD-9)进行质量控制。空白样品符合质量控制和质量保证要求,

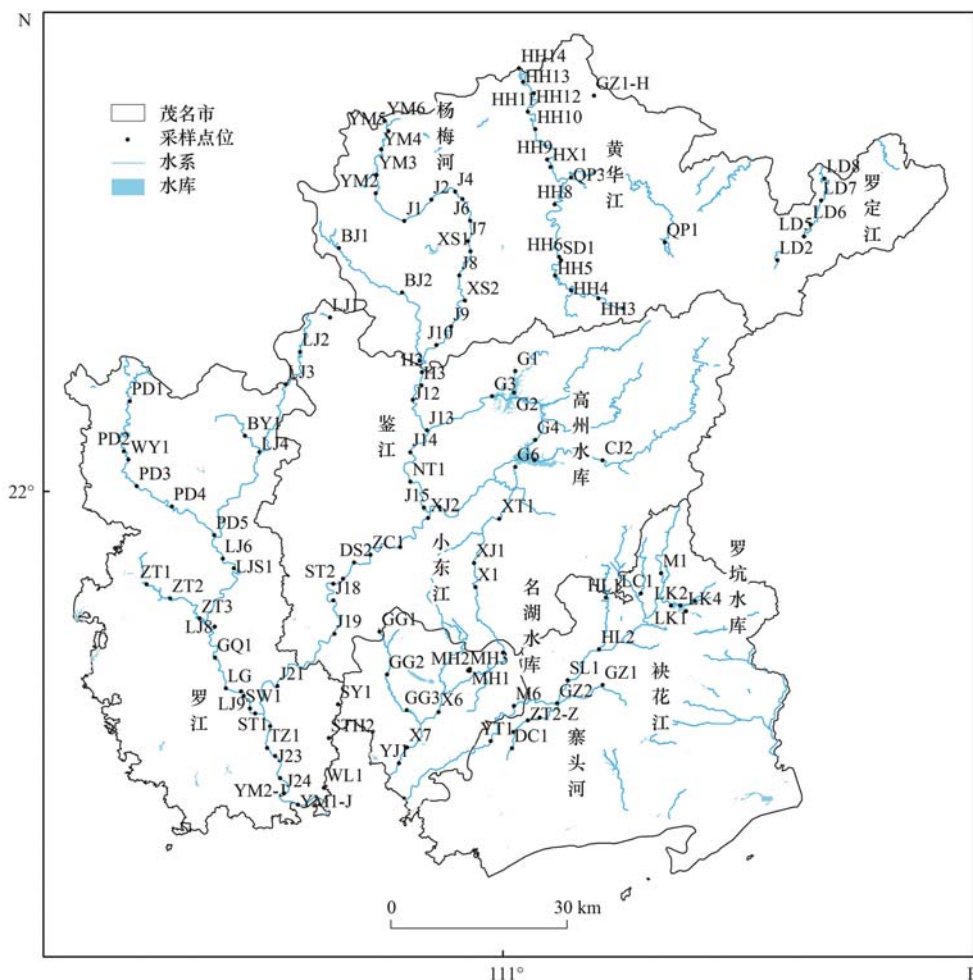


图1 广东省茂名市表层沉积物采样点位示意

Fig. 1 Sampling sites of surface sediments in Maoming City, Guangdong province

平行样品标准差均小于 9%, 样品回收率为 80% ~ 114%。

1.3 地累积指数

地累积指数(Geo-accumulation Index, I_{geo})通过结合当地重金属背景值可以直观地体现重金属对沉积物的污染程度. 其计算公式^[13]:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_i}{k \times B_i} \right)$$

表 1 地累积指数污染等级划分
Table 1 The I_{geo} pollution classification

I_{geo}	<0	0 ~ 1	1 ~ 2	2 ~ 3	3 ~ 4	4 ~ 5	>5
分级	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	无	轻度	偏中度	中度	偏重度	重度	严重

1.4 重金属风险

1.4.1 潜在生态风险指数 (potential ecological risk index)

潜在生态风险指数法分为单项潜在生态风险(E_r^i)和综合潜在生态风险(RI), 是结合金属元素的毒性响应系数来评价重金属对生态环境造成的潜在风险. 其计算公式为^[16]:

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i = \sum_{i=1}^m \left(T_r^i \times \frac{C_i}{B_i} \right)$$

式中, RI 为多种重金属的综合潜在生态风险指数; E_r^i 为某一重金属元素的潜在生态风险指数; T_r^i 某一重金属元素的毒性响应系数; C_i 为沉积物中实际测出的重金属含量水平 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); B_i 为沉积物中重金属的背景值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).

根据 RI 和 E_r^i , 可将重金属潜在生态风险分为表 2 中的等级.

表 2 潜在生态风险等级划分
Table 2 Potential ecological risk classification

E_r^i	等级	RI	等级
<40	低	<150	低
40 ~ 80	中	150 ~ 300	中
80 ~ 160	偏高	300 ~ 600	高
160 ~ 320	高	>600	极高
>320	极高		

1.4.2 潜在生物毒性效应 (potential adverse biological impacts)

本研究选用了 MacDonald 等^[17] 和 Long 等^[18] 的沉积物环境质量基准 (sediment quality guidelines, SQGs) 评价方法 (ERL/ERM 和 TEL/PEL), 评价茂名水系表层沉积物重金属的潜在生物毒性效应. 重金属含量低于效应范围低值 (effects range low, ERL) 或临界效应浓度 (threshold effect level, TEL), 生物毒性效应几乎不发生; 大于效应范围中值 (effects range

式中, C_i 为沉积物中实际测出的重金属含量水平 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); B_i 为沉积物中重金属的背景值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 本研究中元素背景值来自于广东茂名土壤背景值的算数平均值^[14]; 考虑到各地岩石差异可能会引起背景值的变动, 一般设定 $k = 1.5$ ^[15].

根据 I_{geo} , 可将重金属污染程度分为表 1 中的等级.

median, ERM) 或必然效应浓度 (probable effect level, PEL), 则生物毒性效应发生频繁; 处于两者中值, 则生物毒性效应偶尔会发生^[19].

毒性 (toxic units, TUs) 是结合化学物含量与其对应的 PEL 值之比来表征潜在生物毒性 (表 3). 其计算公式为^[20]:

$$\sum TUs = C_i / \text{PEL}$$

式中, C_i 为沉积物中实际测出的重金属含量水平 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); PEL 为重金属对应的必然效应浓度.

表 3 潜在生物毒性等级划分
Table 3 Potential biological toxic classification

$\sum TUs$	<4	4 ~ 6	>6
毒性等级	无毒	中等毒	高等毒

1.5 正定矩阵因子分解模型

正定矩阵因子分解 (positive matrix factorization, PMF) 模型是基于多元统计技术的定量化污染源因子的分析方法. 本文研究 128 个沉积物样品中 10 种重金属, 符合 PMF 的应用条件^[21]. 其计算公式为^[22]:

$$\mathbf{x}_{ij} = \sum_{k=1}^p \mathbf{g}_{ik} \mathbf{f}_{kj} + \mathbf{e}_{ij}$$

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{\mathbf{e}_{ij}}{\mathbf{u}_{ij}} \right)^2$$

$$\text{Unc} = \sqrt{(pC)^2 + (\text{MDL})^2}$$

式中, $\mathbf{x}_{ij}$ 为样本 i 中金属 j 的含量; $\mathbf{g}_{ik}$ 为污染源 k 在样本 i 中的贡献率; $\mathbf{f}_{kj}$ 为污染源 k 对重金属 j 含量的特征值; $\mathbf{e}_{ij}$ 为残差矩阵; $\mathbf{u}_{ij}$ 和 Unc 样本 i 中金属 j 的不确定度; p 为相对标准偏差; C 为重金属的实测含量; MDL 方法检出限.

1.6 数据分析

使用 ArcGIS 10.7 绘制采样点位图; 利用

Origin 2018 绘制重金属含量水平和风险评价图;使用 SPSS 25.0 完成正态分布、显著性差异、相关性分析和主成分分析. 采用地累积指数、潜在生态风险指数和潜在生物毒性效应对沉积物重金属潜在风险进行评价. 采用 EPA PMF 5.0 进行重金属来源验证分析.

2 结果与讨论

2.1 重金属污染特征

广东省茂名市表层沉积物中重金属含量水平如表 4 所示,重金属存在不同程度的污染,除 Pb 外,其余 9 种重金属(As、Hg、Cd、Co、Cr、Cu、Mn、Ni 和

Zn)含量平均值(5.96、0.20、0.12、9.62、58.73、18.82、388.61、13.16 和 147.56 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)均超过了区域土壤背景值的 1.27、2.25、1.50、2.24、1.71、1.34、2.43、1.32 和 3.72 倍. 变异系数是重金属含量受空间分布的差异程度,受人为活动影响^[23],Cd 的变异系数为 1.32,说明沉积物中该元素的地域分布差异程度高,Pb 和 Zn 的变异系数小于 0.5,地域分布差异属于中等程度. 与国内外表层沉积物中重金属含量相比,本研究 As、Cd、Mn 和 Ni 含量水平较低,Cr 和 Pb 含量处于中等水平. Zn 含量水平与珠江的相当,Cu 和 Cd 含量水平与长江口的相当.

表 4 广东省茂名市表层沉积物中重金属含量¹⁾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 4 Concentrations of heavy metals in surface sediments from Maoming City, Guangdong province/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	As	Hg	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
最小值	0.58	0.01	0.005 7	0.87	9.53	2.80	66.06	1.57	4.35	82.41
中位数	4.23	0.19	0.089	8.73	54.56	18.47	314.76	12.32	25.20	146.63
最大值	44.4	1.18	1.56	36.74	166.40	54.59	2 379.18	37.84	73.71	251.71
平均值	5.96	0.20	0.12	9.62	58.73	18.82	388.61	13.16	27.29	147.56
标准差	5.84	0.12	0.16	5.76	29.11	9.74	319.19	6.86	12.83	31.28
变异系数	0.98	0.62	1.32	0.60	0.50	0.52	0.82	0.52	0.47	0.21
PEL	41.60	0.08	4.21	—	160	108	—	42.80	112	271
ERM	70	0.71	9	—	370	270	—	51.60	218	410
ERL	8.20	0.15	1.20	—	81	34	—	20.90	46.70	150
背景值	4.70	0.089	0.08	4.30	34.30	14	160	10	29.50	39.70
黄河(泮河) ^[24]	21.36	—	0.25	—	68.90	31.53	807.18	28.82	31.04	96.40
珠江(西江) ^[25]	28.70	0.13	1.39	—	67.00	30.20	—	29.30	44.50	144.30
长江口 ^[26]	—	—	0.13	—	82.30	17.16	0.05	23.48	15.24	58
印第安南部 ^[27]	—	—	5	—	—	41	485	24	27	194
埃及苏伊士湾 ^[28]	—	0.07	0.96	—	26.42	4.11	—	46.47	31.11	47.59

1) 背景值为广东茂名土壤背景的算术平均值^[14]; “—”表示无数据

基于水系的连通性,本研究把茂名市水系分为西部(鉴江和罗江)、北部(黄华江)、中部(高州水库)和东南部(袂花江、寨头河和罗坑水库)进行分析,结果如图 2 所示. 结果表明:As 在西部和北部无显著性差异($P > 0.05$),中部显著高于西部和东南部($P < 0.01$); Co 在北部含量显著高于西部和东南部($P < 0.01$),Cu、Cd 和 Mn 与 Co 有相同的显著性差异,均为北部显著高于西部和东南部; Pb 在中部含量显著高于北部和西部($P < 0.01$); Hg 在中部含量显著高于西部和北部($P < 0.01$),与东南部含量相当,无显著性差异($P > 0.05$). 由于中部(高州水库)的 Pb 和 Hg 显著较高,将高州水库各采样点的含量水平进行单独分析. 如图 2 所示, Hg 在 G3 点位达到最大值, Pb 在 G5 点位的含量水平最高,两金属元素在高州水库支流 CJ2 点位含量均有不同程度下降,可能是由于水库中水体流动性小,污染物易于沉降富集且不易释放,入库支流流速较大,污染物易从沉积物中解吸且释放^[29,30],除了水动力因素对沉积

物中重金属影响之外,沉积物中重金属含量还与其质地有关. 水库中沉积物为黏粒质地,入库支流沉积物多为粉-砂粒质地,黏粒质地的沉积物更容易吸附水体中的重金属,砂粒沉积物对重金属的富集效应较弱^[7,31,32].

2.2 地累积指数(I_{geo})

茂名表层沉积物重金属地累积指数如图 3 所示,10 种重金属地累积指数从高到低顺序依次为: $\text{Zn} > \text{Mn} > \text{Hg} > \text{Co} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Cd} > \text{As} > \text{Pb}$. 根据表 1 的等级划分,在所有沉积物样品中 Pb 整体处于无污染等级; 7.8% 的沉积物样品中 As 的污染程度偏中度, XS1(鉴江)和 J8(鉴江)采样点为重度污染; Cd 整体处于无-轻度污染; 28.9% 的沉积物样品中 Ni 处于轻度污染, XS1 和 X1(小东江)这两个采样点为偏中度污染; 对 Cu 而言, PD5(罗江)、X1 和 QP1(黄华江)这 3 个采样点为偏中度污染; 7% 的沉积物样品中 Cr 处于偏中度污染; XS1 和 PD5 两个采样点的 Co 为重度污染; 76.6% 的沉积物样

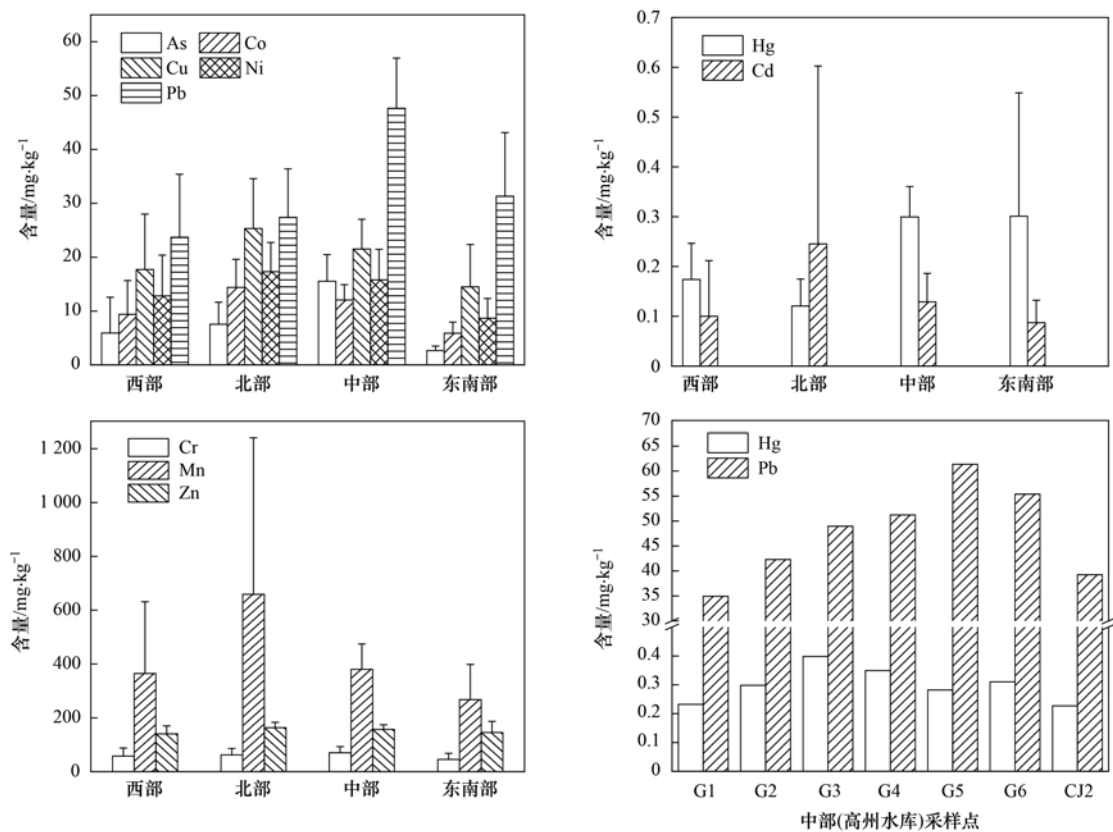


图2 广东省茂名市表层沉积物重金属分布特征

Fig. 2 Spatial distribution characteristics of heavy metals in surface sediments from Maoming City, Guangdong province

品中 Hg 处于轻度污染以上；Zn 整体处于偏中度污染。茂名市沉积物中各金属元素虽有不同程度的污染，但地累积指数平均值均小于 2，处于无污染-偏中度污染。XS1 点位存在 Ni 和 Co 复合污染，X1 点位存在 Ni 和 Cu 复合污染，PD5 点位存在 Cu 和 Co 复合污染。

Mn。其平均值分别为 87.97、45.43、12.69、11.21、6.74、6.52、4.64、3.72、3.43 和 2.44。Hg 的生态风险为偏高度风险，Cd 为中度风险，其他金属元素无生态风险。Hg 和 Cd 评价结果与前人的研究结果一致^[33]，由于 Hg(40) 和 Cd(30) 的毒性响应系数较高，且含量平均值均超过当地土壤背景值。按流域来分析，茂名市所有水系的沉积物重金属综合生态风险(RI)均在 150~300 之间，处于中风险。Hg 是流域和水库沉积物中污染最严重的重金属，对部分流域和 3 个水库的生态风险处于偏高水平。因此，Hg 应列为茂名市水生态管理的重点污染物。高州水库的风险指数为 264，与其他流域相比风险较高，其中 Hg 的贡献率较高，可能由于化石燃料燃烧^[34~37]产生的大气污染沉降进入水体。

2.3.2 潜在生物毒性 (∑TUs)

从表 4 可得重金属含量平均值与 ERL 的比值从高到低依次为：Hg (1.33) > Zn (0.98) > As (0.73) = Cr (0.73) > Ni (0.63) > Pb (0.58) > Cu (0.55) > Cd (0.1)，除 Hg 以外其它元素的含量平均值均小于 ERL，不构成生物毒性。Hg 的含量平均值介于 ERL 和 ERM 之间，生物毒性效应偶尔发生。从区域分布来看，As、Hg、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 中有 18.75%、65.6%、0.78%、23.43%、

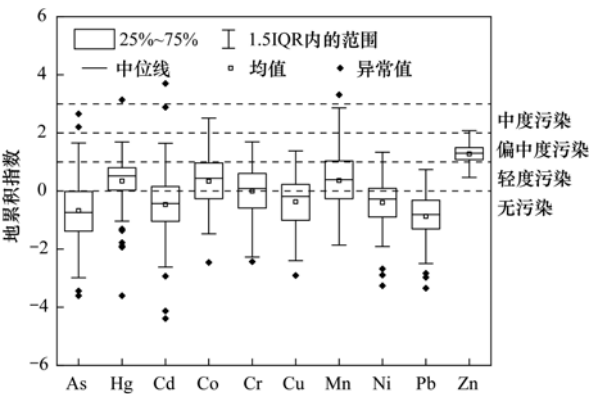


图3 广东省茂名市表层沉积物重金属地累积指数

Fig. 3 Geo-accumulation index of heavy metals in surface sediments from Maoming City, Guangdong province

2.3 重金属风险评估

2.3.1 潜在生态风险(RI)

茂名市表层沉积物重金属生态风险评价结果如图 4 所示，单因子生态风险指数(E_r^i)平均值大小顺序为：Hg > Cd > As > Co > Cu > Ni > Pb > Zn > Cr >

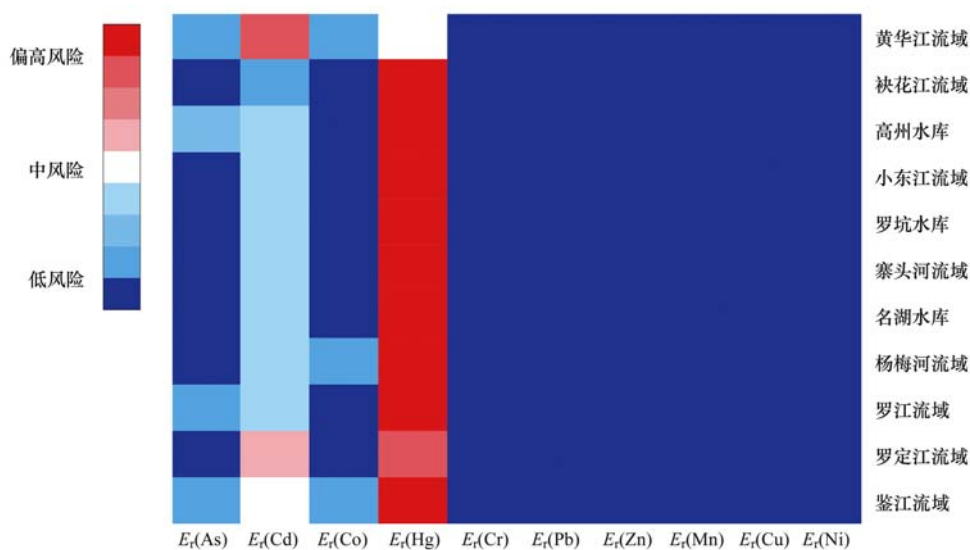


图4 广东省茂名市表层沉积物重金属综合生态风险等级

Fig. 4 Integrated ecological risk classification of heavy metals in surface sediments from Maoming City, Guangdong province

5.47%、14.06%、7.81%和46.09%的采样点重金属含量水平介于ERL和ERM之间,可能会发生生物毒性效应.值得注意的是,虽然Zn含量平均值未超过ERL,但有46.09%的采样点生物毒性效应偶发.图5所示为不同流域重金属生物毒性单位总和,鉴江、华黄江和罗定江无生物毒性,高州水库表现为高毒性,其他流域处于低毒.各个流域或水库沉积物中,Hg为生物毒性的主要贡献因素,其次是Zn.

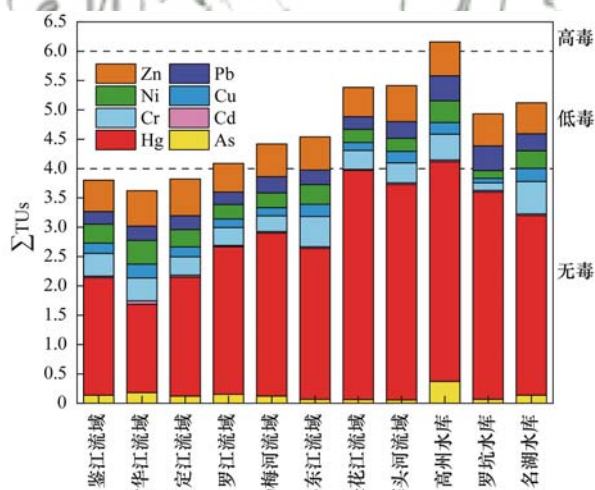


图5 广东省茂名市表层沉积物重金属毒性单位总和

Fig. 5 Estimated sum of toxic units ($\sum TUs$) of heavy metals in surface sediments from Maoming City, Guangdong province

综上所述,3种评价所得结果略有差异.地累积指数和潜在生物毒性评价结果相似,均认为Hg和Zn对沉积物污染贡献较大,潜在生态风险评价结果显示Hg和Cd生态风险较高.地累积指数和潜在生物毒性评价基于重金属含量与基准值(当地土壤背景值、ERL、ERM和PEL)的对比,侧重于重金属含

量水平;潜在生态风险评价结果受毒性响应系数影响较大.

2.4 重金属来源分析

主成分分析(principal component analysis, PCA)解析重金属成分(表5),结果显示KMO = 0.687,大于0.5;Batlet小于0.05.说明变量之间存在相关性且可以进行因子分析^[38].用正定矩阵因子分解模型(PMF)对PCA结果进行验证,图6所示,PMF的分析结果与PCA在整体上具有一致性.

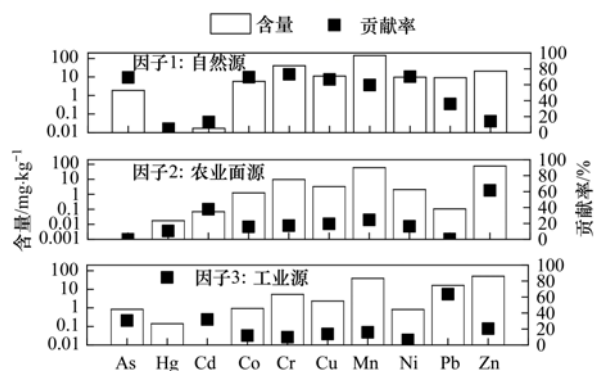


图6 广东省茂名市表层沉积物重金属元素的PMF源解析结果

Fig. 6 PMF source analysis of heavy metal elements in surface sediments from Maoming City, Guangdong province

主成分分析结果所示,共提取了3个主成分,累计方差为71.14%.成分1中的元素有As、Co、Cr、Mn和Ni,方差贡献率为46.25%;成分2元素有Cd、Cu和Zn,方差贡献率为12.64%,且根据相关性分析(表6),Cd与Cu和Zn之间显著相关;成分3的元素为Hg和Pb,方差贡献率为12.25%,且相关性分析显示Hg仅与Pb显著相关,可能存在共同污染源.

因子1中主要负荷元素为As、Co、Cr、Mn、Cu和Ni,贡献率为77.12%、72.31%、70.70%、

66.23%、64.54%和75.65%。PCA分析的Cu属于成分2,这可能是因为Cu在PCA分析中成分1(0.63)和成分2(0.67)的载荷相似。其中As载荷较高,在含量水平分析显示As、Ni和Cd低于国内外其他地区,地累积指数和潜在风险较低,考虑其污染较轻或无污染,且Co、Cr和Ni的变异系数在0.5左右,空间分布变异性低,且为亲Fe元素,受成土母质影响较大^[39,40],因此将因子1认定为自然源。

因子2负荷元素为Cd和Zn,贡献率为32.12%和46.64%。主要富集在上游(北部)区域。Cd是农药化肥的标志性元素^[41,42],残留的农药和化肥在降水和径流冲刷作用下,可通过地表径流进入流域,聚

集沉积物中^[43]。同时水产养殖业中的鱼饲料一定程度上会影响Cd和Zn的富集^[36,44],所以因子2代表农业面源。

因子3Hg和Pb的贡献率为87.45%和69.09%。其中Hg为代表元素,Hg和Pb在中部(高州水库)中含量较高,高州水库易受周边乡镇村民和外来游客的人类活动影响,且茂名石化产业链中家具、建材、电子和汽车加工工厂在当地分布较多^[45],考虑Pb由煤炭燃烧^[37]、交通运输或游船的尾气^[46,47]以及铅锌矿相关活动^[48]产生,Hg来源于化石燃烧^[49,50],两者随大气沉降和地表径流作用进入水体,所以因子3可能是工业源。

表5 主成分分析结果和重金属来源贡献率

Table 5 Results of the principal component analysis and contribution ratio of heavy metal sources						
元素	成分1	成分2	成分3	贡献率/%		
				因子1 (自然源)	因子2 (农业面源)	因子3 (工业源)
As	0.670	-0.089	0.228	77.12	1.76	21.12
Hg	-0.163	-0.055	0.861	5.57	6.97	87.45
Cd	-0.041	0.857	-0.095	28.43	32.12	39.45
Co	0.855	0.294	-0.010	72.31	11.77	15.92
Cr	0.787	0.208	0.079	70.70	15.37	13.93
Cu	0.625	0.674	0.110	64.54	18.27	17.19
Mn	0.644	0.064	-0.024	66.23	15.00	18.77
Ni	0.885	0.286	-0.028	75.65	13.39	10.96
Pb	0.373	0.190	0.683	30.91	0.00	69.09
Zn	0.367	0.764	0.236	20.26	46.64	33.10
特征值	4.63	1.26	1.23			
方差占比/%	46.25	12.64	12.25			
累计方差/%	46.25	58.89	71.14			

表6 广东省茂名市表层沉积物中重金属含量的相关分析¹⁾

Table 6 Correlation analysis of heavy metal content in surface sediments from Maoming City, Guangdong province										
	As	Hg	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
As	1									
Hg	0.022	1								
Cd	0.079	-0.101	1							
Co	0.431 **	-0.120	0.187 *	1						
Cr	0.442 **	-0.012	0.100	0.620 **	1					
Cu	0.371 **	0.011	0.468 **	0.722 **	0.702 **	1				
Mn	0.363 **	-0.094	0.149	0.611 **	0.289 **	0.366 **	1			
Ni	0.477 **	-0.098	0.182 *	0.858 **	0.849 **	0.748 **	0.455 **	1		
Pb	0.373 **	0.268 **	0.116	0.386 **	0.318 **	0.362 **	0.308 **	0.298 **	1	
Zn	0.205 *	0.054	0.444 **	0.540 **	0.441 **	0.756 **	0.275 **	0.537 **	0.444 **	1

1) *表示 $P<0.05$, **表示 $P<0.01$

3 结论

(1)茂名市主要表层沉积物检出的10种重金属(As、Hg、Cd、Co、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb和Zn)含量平均值为5.96、0.20、0.12、9.62、58.73、18.82、388.61、13.16、27.29和147.56 mg·kg⁻¹,除Pb外,其它元素含量平均值均超过广东省土壤背

景值;重金属含量整体呈现出北部>中部>西部>东南部的趋势,Cd、Co、Cu、Mn、Ni和Zn含量有相同的空间分布趋势,其它元素在各采样点位均有不同程度污染。

(2)重金属地累积指数显示Zn为偏中度污染,其余金属为无-轻度污染,采样点存在重金属复合污染的情况;潜在生态风险指数显示高州水库综合风

险指数较高,为中风险,Hg 是主要贡献元素,为偏高度风险;潜在生物毒性评价显示高州水库的潜在生物毒性等级为高等毒性,Hg 是主要贡献元素,偶会发生生物毒性效应,评估结果与潜在生态风险评价相同。

(3)重金属来源解析结果表明,沉积物重金属 As、Co、Cr、Mn、Cu 和 Ni 源于自然背景,Cd 和 Zn 来自农-渔业所使用的化肥、农药和饲料等,Hg 和 Pb 源于燃煤及交通尾气。

参考文献:

- [1] 陈雪,周汉杰.论茂名工业精神的传承与发展[J].南方论刊,2020,(1):37-39,45.
- [2] Noli F, Tsamos P. Concentration of heavy metals and trace elements in soils, waters and vegetables and assessment of health risk in the vicinity of a lignite-fired power plant[J]. Science of the Total Environment, 2016, **563-564**: 377-385.
- [3] 李星谕,李朋,苏业旺,等.汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价[J].环境科学,2022, **43**(2): 859-866.
Li X Y, Li P, Su Y W, *et al.* Pollution and potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Tangxun Lake[J]. Environmental Science, 2022, **43**(2): 859-866.
- [4] Yuan H Z, Shen J, Liu E F, *et al.* Assessment of nutrients and heavy metals enrichment in surface sediments from Taihu Lake, a eutrophic shallow lake in China[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2011, **33**(1): 67-81.
- [5] Han D M, Cheng J P, Hu X F, *et al.* Spatial distribution, risk assessment and source identification of heavy metals in sediments of the Yangtze River Estuary, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, **115**(1-2): 141-148.
- [6] Cui L, Wang X N, Li J, *et al.* Ecological and health risk assessments and water quality criteria of heavy metals in the Haihe River[J]. Environmental Pollution, 2021, **290**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117971.
- [7] Ma T F, Luo H J, Huang K B, *et al.* Hierarchical health risk assessment and influence factors of an ecological post-restoration oil shale mining area based on metal bioavailability[J]. Science of the Total Environment, 2022, **821**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153480.
- [8] 胡国成,许振成,赵学敏,等.高州水库表层沉积物重金属污染特征及生态风险评价[J].环境科学研究,2011, **24**(8): 949-957.
Hu G C, Xu Z C, Zhao X M, *et al.* Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments from Gaozhou Reservoir, Guangdong province[J]. Research of Environmental Sciences, 2011, **24**(8): 949-957.
- [9] 王妙,王胜,唐鹤辉,等.粤西三座重要供水水库沉积物营养盐负荷与重金属污染特征[J].生态环境学报,2014, **23**(5): 834-841.
Wang M, Wang S, Tang Q H, *et al.* Characteristics of sediment nutrients loading and heavy metals pollution in three important reservoirs from the west coast of Guangdong province, South China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23**(5): 834-841.
- [10] HJ/T 91-2002,地表水和污水监测技术规范[S].
- [11] HJ 803-2016,土壤和沉积物 12 种金属元素的测定 王水提取-电感耦合等离子体质谱法[S].
- [12] HJ 680-2013,土壤和沉积物 汞、砷、硒、铋、锑的测定 微波消解/原子荧光法[S].
- [13] Zhao Q Q, Bai J H, Gao Y C, *et al.* Heavy metal contamination in soils from freshwater wetlands to salt marshes in the Yellow River Estuary, China[J]. Science of the Total Environment, 2021, **774**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145072.
- [14] 罗思亮.广东省阳江-茂名地区土壤地球化学背景值与基准值分析[J].云南化工,2018, **45**(6): 89-92.
Luo S L. Analysis of soil geochemical background values and reference values in Yangjiang Maoming area of Guangdong province[J]. Yunnan Chemical Technology, 2018, **45**(6): 89-92.
- [15] 刘佳伟.鄱阳湖边缘地带沉积物-土壤重金属污染评价[D].南昌:南昌大学,2021.
Liu J W. Assessment of heavy metal pollution in sediments and soils of Poyang Lake marginal zone[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021.
- [16] Xia P H, Ma L, Sun R G, *et al.* Evaluation of potential ecological risk, possible sources and controlling factors of heavy metals in surface sediment of Caohai Wetland, China[J]. Science of the Total Environment, 2020, **740**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140231.
- [17] MacDonald D D, Ingersoll C G, Berger T A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2000, **39**(1): 20-31.
- [18] Long E R, MacDonald D D, Smith S L, *et al.* Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments[J]. Environmental Management, 1995, **19**(1): 81-97.
- [19] 詹咏,韦婷婷,叶汇彬,等.三亚河沉积物 PAHs 和 PCBs 的分布、来源及风险评价[J].环境科学,2021, **42**(4): 1830-1838.
Zhan Y, Wei T T, Ye H B, *et al.* Distribution, source, and ecological risk evaluation of the PAHs and PCBs in the sediments from Sanya River[J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1830-1838.
- [20] Chai M W, Li R L, Ding H, *et al.* Occurrence and contamination of heavy metals in urban mangroves: a case study in Shenzhen, China[J]. Chemosphere, 2019, **219**: 165-173.
- [21] 庞阔,李敏,刘璐,等.基于蒙特卡洛模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析[J].环境科学,2022, **43**(8): 4008-4017.
Pang K, Li M, Liu L, *et al.* Evaluation and source analysis of heavy metal pollution in sediments of the Yellow River Basin based on Monte Carlo simulation and PMF model[J]. Environmental Science, 2022, **43**(8): 4008-4017.
- [22] Li Y Z, Chen H Y, Teng Y G. Source apportionment and source-oriented risk assessment of heavy metals in the sediments of an urban river-lake system[J]. Science of the Total Environment, 2020, **737**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140310.
- [23] 赵晓亮,李响,卢洪斌,等.东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价[J].环境科学,2022, **43**(6): 3048-3057.
Zhao X L, Li X, Lu H B, *et al.* Analysis of heavy metal pollution characteristics and potential ecological risks of surface sediments in Dongjiang Lake[J]. Environmental Science, 2022, **43**(6): 3048-3057.
- [24] 康舒欣.沔河流域水体和沉积物重金属元素的风险评估和污染源解析[D].长安:长安大学,2020.
Kang S X. Risk assessment and analysis of pollution sources of water and sediment heavy metal elements in Fenghe River Basin

- [D]. Chang'an: Chang'an University, 2020.
- [25] 韦彬, 侯青叶, 唐志敏, 等. 珠江水系沉积物重金属元素背景值估算及污染特征分析[J]. 现代地质, 2019, **33**(2): 293-304.
- Wei B, Hou Q Y, Tang Z M, *et al.* Estimation of background values and contamination characteristics of heavy metals in sediments of the Pearl River, China[J]. Geoscience, 2019, **33**(2): 293-304.
- [26] Wang X, Liu B L, Zhang W S. Distribution and risk analysis of heavy metals in sediments from the Yangtze River Estuary, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, **27**(10): 10802-10810.
- [27] Sankarappan R, Gopalakrishnan G, Shanmugam R, *et al.* Diffusion, textural characteristics, and source identification of the heavy metals in the Karankadu mangrove sediments, South India [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, **14**(4), doi: 10.1007/s12517-021-06673-8.
- [28] Ibrahim M I A, Mohamed L A, Mahmoud M G, *et al.* Potential ecological hazards assessment and prediction of sediment heavy metals pollution along the Gulf of Suez, Egypt[J]. The Egyptian Journal of Aquatic Research, 2019, **45**(4): 329-335.
- [29] 余杨, 鲁婧, 王世亮, 等. 不同水流速度下重金属 Cd、Cr 在上覆水-间隙水-沉积物体系中的迁移特征[A]. 见: 中国水利学会. 中国水利学会 2021 学术年会论文集第二分册[C]. 郑州: 黄河水利出版社, 2021. 30-35.
- [30] 骆丽珍, 朱志雄, 陈石泉, 等. 万宁小海潟湖表层沉积物时空分布特征与污染评价[J]. 海洋湖沼通报, 2022, **44**(2): 103-111.
- Luo L Z, Zhu Z X, Chen S Q, *et al.* Spatial distribution and contamination evaluation of surface sediment in Xiaohai, Wanning[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2022, **44**(2): 103-111.
- [31] 方志青, 王永敏, 王训, 等. 三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1338-1345.
- Fang Z Q, Wang Y M, Wang X, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in sediments of the Ruxi tributary of the Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1338-1345.
- [32] 李小林, 刘恩峰, 于真真, 等. 异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险[J]. 环境科学, 2019, **40**(2): 614-624.
- Li X L, Liu E F, Yu Z Z, *et al.* Contamination and potential ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of Yilong Lake, Southwest China [J]. Environmental Science, 2019, **40**(2): 614-624.
- [33] Rao K, Tang T, Zhang X, *et al.* Spatial-temporal dynamics, ecological risk assessment, source identification and interactions with internal nutrients release of heavy metals in surface sediments from a large Chinese shallow lake[J]. Chemosphere, 2021, **282**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131041.
- [34] 赵德文. 巢湖表层沉积物汞污染风险评估及磁学诊断[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- Zhao D W. Risk assessment of mercury pollution and magnetic diagnosis in surface sediments of Chaohu Lake[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2019.
- [35] Hu W Y, Wang H F, Dong L R, *et al.* Source identification of heavy metals in Peri-urban agricultural soils of Southeast China: an integrated approach [J]. Environmental Pollution, 2018, **237**: 650-661.
- [36] 董驷睿, 胡文友, 黄标, 等. 基于正定矩阵因子分析模型的城郊农田土壤重金属源解析[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(7): 2103-2111.
- Dong L R, Hu W Y, Huang B, *et al.* Source appointment of heavy metals in suburban farmland soils based on positive matrix factorization[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(7): 2103-2111.
- [37] 车凯, 陈崇明, 郑庆宇, 等. 燃煤电厂重金属排放与周边土壤中重金属污染特征及健康风险[J]. 环境科学, 2022, **43**(10): 4578-4589.
- Che K, Chen C M, Zheng Q Y, *et al.* Heavy metal emissions from coal-fired power plants and heavy metal pollution characteristics and health risks in surrounding soils [J]. Environmental Science, 2022, **43**(10): 4578-4589.
- [38] Bhardwaj R, Gupta A, Garg J K. Evaluation of heavy metal contamination using environmetrics and indexing approach for River Yamuna, Delhi stretch, India[J]. Water Science, 2017, **31**(1): 52-66.
- [39] 张富贵, 彭敏, 贺灵, 等. 贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素 (PTEs) 物源甄别、生态风险评价及控制因素[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 2081-2093.
- Zhang F G, Peng M, He L, *et al.* Sources identification, ecological risk assessment, and controlling factors of potentially toxic elements in typical lead-zinc mine area, Guizhou province, Southwest China [J]. Environmental Science, 2022, **43**(4): 2081-2093.
- [40] 余楚, 李剑锋, 吕敦玉. 大兴安岭南段某矿区河流表层沉积物重金属污染及风险评价[J]. 生态环境学报, 2021, **30**(11): 2223-2231.
- Yu C, Li J F, Lv D Y. Heavy metal pollution and risk assessment in river surface sediments of mining area in the South of the Da Hinggan Mountains[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, **30**(11): 2223-2231.
- [41] 任杰, 白莉, 李军, 等. 太湖表层沉积物重金属污染评价与来源分析[J]. 地球与环境, 2021, **49**(4): 416-427.
- Ren J, Bai L, Li J, *et al.* Pollution evaluation and source apportionment of heavy metals in surface sediments of the Taihu Lake[J]. Earth and Environment, 2021, **49**(4): 416-427.
- [42] Kang D J, Zheng G Y, Yu J H, *et al.* Hydropower reservoirs enhanced the accumulation of heavy metals towards surface sediments and aggravated ecological risks in Jiulong River Basin, China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2021, **21**(10): 3479-3492.
- [43] Dong B, Zhang R Z, Gan Y D, *et al.* Multiple methods for the identification of heavy metal sources in cropland soils from a resource-based region [J]. Science of the Total Environment, 2019, **651**: 3127-3138.
- [44] Luo H T, Wang Q, Liu Z W, *et al.* Potential bioremediation effects of seaweed *Gracilaria lemaneiformis* on heavy metals in coastal sediment from a typical mariculture zone [J]. Chemosphere, 2020, **245**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125636.
- [45] 周怀瑞, 黄敏, 滕俊江. 关于茂名石化下游产业开发的思考[J]. 广东化工, 2014, **41**(22): 79-80.
- Zhou H R, Huang M, Teng J J. Thinking of downstream of Maoming petrochemical industry development [J]. Guangdong Chemical Industry, 2014, **41**(22): 79-80.
- [46] Cheng W, Lei S G, Bian Z F, *et al.* Geographic distribution of heavy metals and identification of their sources in soils near large, open-pit coal mines using positive matrix factorization[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, **387**(1), doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121666.

- [47] 代静, 赵玉强, 李欣, 等. 小清河济南段表层沉积物重金属和营养盐污染现状评价与来源分析[J]. 环境化学, 2021, **40**(6): 1795-1807.
- Dai J, Zhao Y Q, Li X, *et al.* Pollution assessment and source analysis of heavy metals and nutrients in surface sediments of Jinan section of Xiaoqing River[J]. Environmental Chemistry, 2021, **40**(6): 1795-1807.
- [48] Chen Y Z, Ning Y Q, Bi X Y, *et al.* Pine needles as urban atmospheric pollution indicators; Heavy metal concentrations and Pb isotopic source identification[J]. Chemosphere, 2022, **296**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134043.
- [49] 林承奇, 陈枫桦, 胡恭任, 等. 基于 PMF 模型解析九龙江河口表层沉积物重金属来源[J]. 地球与环境, 2020, **48**(4): 443-451.
- Lin C Q, Chen F H, Hu G R, *et al.* Source apportionment of heavy metals in surface sediments of the Jiulong River Estuary based on positive matrix factorization [J]. Earth and Environment, 2020, **48**(4): 443-451.
- [50] 郭杰, 王珂, 于琪, 等. 长江中游近岸表层沉积物重金属污染特征分析及风险评估[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(11): 4625-4636.
- Guo J, Wang K, Yu Q, *et al.* Pollution characteristics of the heavy metals and their potential ecological risk assessment in nearshore sediments of the middle reaches of the Yangtze River [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(11): 4625-4636.

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》在国内外公开发行人,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:hjks@rcees.ac.cn;网址:www.hjks.ac.cn

CONTENTS

Research Progress of SOA Formation from Anthropogenic VOCs Under Complex Pollution Condition	CHEN Tian-zeng, LIU Jun, MA Qing-xin, <i>et al.</i>	(1201)
Advances in Microbial Degradation and Transformation of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs)	SUN Hong-wen, FANG Bo, CHEN Hao, <i>et al.</i>	(1214)
Research Progress on Remote Sensing Monitoring of Lake Water Quality Parameters	WANG Si-meng, QIN Bo-qiang	(1228)
Research Progress on Trojan-horse Effect of Microplastics and Heavy Metals in Freshwater Environment	ZHAO Wei-gao, TIAN Yi-mei, ZHAO Peng, <i>et al.</i>	(1244)
Temporal and Spatial Characteristics of Net CO ₂ Emissions and Decoupling Analysis in Yangtze River Economic Belt	WU Yi-fan, XU Yang, TANG Yang-bo, <i>et al.</i>	(1258)
Changes in Land Use Carbon Emissions and Coordinated Zoning in China	LI Yuan-yuan, WEI Wei, ZHOU Jun-ju, <i>et al.</i>	(1267)
Multi-dimensional Analysis of the Synergistic Effect of Pollution Reduction and Carbon Reduction in Tianjin Based on the STIRPAT Model	LIU Mao-hui, YUE Ya-yun, LIU Sheng-nan, <i>et al.</i>	(1277)
Railway Emission Trends in China Based on Fuel Life Cycle Analysis	TONG Hui, FAN Zhao-yang, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i>	(1287)
Pollution Characteristics of PM _{2.5} Chemical Composition in Zhejiang Province	ZHOU Jing-qing, YU Lei, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(1297)
Seasonal Variations, Size Distributions, and Sources of Chemical Components of Submicron Particulate Matter in Nanjing	XU Zhen-qi, SHANG Yue, DING Feng, <i>et al.</i>	(1310)
Seasonal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Components in Luoyang: Implication for Brown Carbon Contribution	YAN Guang-xuan, HOU Ming-yang, ZHANG Pu-zhen, <i>et al.</i>	(1319)
Establishment and Spatial Distribution of S/IVOCs Emission Inventory in Jiangsu Province in 2019	SONG Tong-ai, ZHANG Jia-ying, GUAN Lu, <i>et al.</i>	(1328)
Compositional Characteristics of Volatile Organic Compounds in Typical Industrial Areas of the Pearl River Delta: Importance of Oxygenated Volatile Organic Compounds	SONG Xin, YUAN Bin, WANG Si-hang, <i>et al.</i>	(1336)
Evolution and Characteristics of Full-process Vehicular VOCs Emissions in Tianjin from 2000 to 2020	SUN Lu-na, ZHONG Chong-zhi, SUN Shi-da, <i>et al.</i>	(1346)
Port-owned Mobile Source Air Pollutant Emission Inventory	XU Xiao-fan, WANG Bao-qing, WU Jun-cheng, <i>et al.</i>	(1357)
Simulation and Regulation of Sustainable Utilization of Water Resources in China Based on Improved Water Resources Ecological Footprint Model	OUYANG Xing-tao, LIAO Hao-yu, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i>	(1368)
Occurrence Distribution and Risk Assessment of Organophosphate Esters in A Typical Area of the Estuary in the Yellow River Basin	CAO Miao, GUO Chang-sheng, ZHANG Heng, <i>et al.</i>	(1378)
Pollution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Sediments of Huixian Karst Wetland in Guilin	YU Yue, XING Xin-li, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(1387)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments from Major River Systems in Maoming City, Guangdong Province	CHEN Xiao-xia, ZHANG Min, LI Bei, <i>et al.</i>	(1397)
Temporal-spatial Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Water of Ningbo	XU Mei-juan, YANG Jia, REN Xiao-jing, <i>et al.</i>	(1407)
Analysis of Water Chemistry Characteristics and Hydraulic Relationships of Different Water Bodies in Typical Mountain-oasis Systems in the Northwest Inland Area	WANG Shi-yu, SUN Cong-jian, CHEN Wei, <i>et al.</i>	(1416)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Pore-water in the Middle and Upper Reaches of Muwen River	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(1429)
Spatial-temporal Variation in Groundwater Quality and the Contamination Source Analysis in Shihezi-Changji Area	DING Qi-zhen, ZHOU Jin-long, JI Yan-zhen, <i>et al.</i>	(1440)
Analysis of Mechanism and Start-up Thresholds of Seasonal Algal Blooms in a Northern Eutrophic Stratified Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, KONG Chang-hao, <i>et al.</i>	(1452)
Characteristics of Benthic Diatom Community Structure and Water Ecological Health Evaluation in the Lalin River Basin	SHAN Tao, YUAN An-long, HUANG Zi-rui, <i>et al.</i>	(1465)
Bacterioplankton Communities and Assembly Mechanisms in Wet Season of Lakes, Nanchang	GAO Peng-fei, WANG Peng, HUANG Yi, <i>et al.</i>	(1475)
Seasonal Variation and Influencing Factors of Bacterial Communities in Storage Reservoirs	DING Ning, YANG Ying-ying, WAN Nian-xin, <i>et al.</i>	(1484)
Vertical Distribution and Source Tracking Analysis of Bacteria Composition and Nitrogen Metabolism Function of a Typical Urban Inland River	TAN Qiu-yang, LÜ Jin-yan, BAI Xian-yu, <i>et al.</i>	(1497)
Contribution Analysis of External Source Pollution Load and Environmental Capacity Estimation of Reservoirs in Central Yunnan Plateau	GUO Yu-jing, LI Hong-bing, WANG Shu-ming, <i>et al.</i>	(1508)
Preparation of Narrow Pore Diameter Phosphorus Containing Cotton Stalk Carbon and Its Adsorption Mechanism for Tetracycline	ZENG Shao-yi, LI Kun-quan	(1519)
Preparation of High Specific Surface Thiourea Modified Peanut Shell Carbon and Adsorption of Tetracycline and Copper	MIN Bing-kun, LI Kun-quan	(1528)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes on Different Water Supply Pipes	LIU Chen-xu, BAI Xiao-hui	(1537)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Sequestration and Aggregate Stability in Water-Eroded Environment: A Meta-analysis	YANG Rui-zhe, YANG Shi-long, WENG Xi-zhe, <i>et al.</i>	(1542)
Effects of Warming and Fertilization on Soil Organic Carbon and Its Labile Components in Rice-wheat Rotation	DENG Xu-zhe, HAN Chen, XUE Li-xiang, <i>et al.</i>	(1553)
Horizontal Variation Characteristics of Alpine Grassland Soil Function and Vertical Changes Along Soil Genetic Horizons in the Three-River Headwaters Region	LI Bo-jian, SHEN Cong-cong, LIU Si-yi, <i>et al.</i>	(1562)
CH ₄ Fluxes and Their Comprehensive Greenhouse Effects with CO ₂ Fluxes in Direct-seeded Rice in Poyang Lake Plain	SHI Yuan-zhi, CUI Yuan-lai, CAI Shuo, <i>et al.</i>	(1572)
Vertical Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil PAHs in Different Land Use Types	ZHOU Zhi-yan, ZHANG Xiu-xiu, WANG Fei, <i>et al.</i>	(1583)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Per- and Polyfluoroalkyl Substances and Emerging Alternatives in Road Dust, Shijiazhuang	LI Peng-fei, WANG Yuan, YANG Chen, <i>et al.</i>	(1593)
Spatial Distribution Characteristics and Assessment of Heavy Metal Pollution in Cultivated Soil of Agricultural Small Watershed in Typical Mining Area in South China	YANG Yu, GUO Ting-ting, LIU Xiao-li, <i>et al.</i>	(1602)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Vegetable Field in the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section)	SHI Yu-jia, FANG Lin-fa, FANG Biao, <i>et al.</i>	(1611)
Accumulation Characteristics and Influencing Factors of Heavy Metals in Cultivated Land Surface Soil in Lanzhou	KANG Le, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i>	(1620)
Enrichment Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Industrial and Mining Area of Northern Guangdong Province	WANG Yue, MO Li, YU Xin-xiao, <i>et al.</i>	(1636)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soil of a Lead Plant in Sanmenxia	LU Xiao-hui, YU Fang-zhong, FAN Yi-ming, <i>et al.</i>	(1646)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soils of a Testing Range	WANG Shi-yu, LI Chun, ZHAO Hong-wei, <i>et al.</i>	(1657)
Effectiveness and Mechanisms of Chemical Leaching Combined with Electrokinetic Technology on the Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil	MA Qiang, WEI Ze-bin, WU Qi-tang	(1668)
Emission Characteristics and Control of Heavy Metals in Secondary Copper Smelting Process	LIN Bing-cheng, WU Guang-long, ZHENG Ming-hui, <i>et al.</i>	(1678)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Soil-crops System in Anhui Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, WEI Wei, HUANG Jian-min, <i>et al.</i>	(1686)
In-situ Remediation Effect of Cadmium-polluted Agriculture Land Using Different Amendments Under Rice-wheat Rotation	ZHANG Lu, TANG Chan, YU Hai-ying, <i>et al.</i>	(1698)
Effect and Persistent Effect of Thiolated Montmorillonite on Safe Production in Cadmium-contaminated Cropland	FENG Xian-cui, CHEN Ya-gang, JIAO Hong-peng, <i>et al.</i>	(1706)
Effects of Earthworm, Straw, and Citric Acid on the Remediation of Zn, Pb, and Cd Contaminated Soil by <i>Solanum photeinocarpum</i> and <i>Pterocypselia indica</i>	CHEN Min-ni, NIE Xiao-qi, ZHANG Xing-feng, <i>et al.</i>	(1714)
Availability of Se-rich Arable Land in High Geological Background Area and Suggestions for Zoning	WANG Rui, LI Yu, YU Jing, <i>et al.</i>	(1727)
Characteristics and Causes of Ge Enrichment in Vegetable Growing Areas of Beixintun Town, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, JIN Ai-fang, <i>et al.</i>	(1735)
Structural Diversity and Its Temporal Variation in the Soil Bacterial Community Under Plantations of <i>Taxodium distichum</i> in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir Area	TAN Xue, DONG Zhi, ZHANG Li-miao, <i>et al.</i>	(1748)
Effect of the Process of Returning Farmland to Forest in the Loess Hilly Area on Soil Fungal Communities	ZHANG Lei, WANG Qiang, YANG Xin-yue, <i>et al.</i>	(1758)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Substitute with Organic Fertilizer on Soil Functional Microbes and Lemon Yield and Quality	WANG Ying-yan, XIONG Zi-yi, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(1768)
Dynamic Changes in Antibiotic Resistance Genes During Biological Fermentation of Chicken Manure and Pig Manure	ZHANG Dan, PENG Shuang, WANG Dan-qing, <i>et al.</i>	(1780)
Effects of Cow Manure Application on Soil Microbial Community in Farmland	ZHANG Ya-li, GUO Xiao-ming, HU Hui, <i>et al.</i>	(1792)