

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第4期

Vol.38 No.4

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

西宁近郊大气氮干湿沉降研究	许稳, 金鑫, 罗少辉, 冯兆忠, 张霖, 潘月鹏, 刘学军 (1279)
兰州春夏季 PM ₁₀ 碳组分昼夜变化特征与来源分析	马丽, 余晔, 王博, 赵素平, 李刚 (1289)
海南三亚大气颗粒物中水溶性无机离子浓度及其粒径分布特征	王璐, 刘子锐, 温天雪, 苗红妍, 王跃思 (1298)
2015年北京城区大气 PM _{2.5} 中 NH ₄ ⁺ 、NO ₃ ⁻ 、SO ₄ ²⁻ 及前体气体的污染特征	丁萌萌, 周健楠, 刘保献, 王焱, 张博韬, 石爱军, 杨懂艳, 常森 (1307)
北京市某垃圾焚烧厂周边大气二噁英污染特征及暴露风险	齐丽, 任玥, 刘爱民, 黄业茹, 赵震, 王江, 李泓 (1317)
北京和保定地区大气细颗粒物中可培养细菌的种群特征	胡亚东, 马安周, 吕鹏翼, 张扬, 庄国强 (1327)
基于实时交通数据的南京市主次干道机动车排放特征分析	李笑语, 吴琳, 邹超, 张意, 毛洪钧, 荆博宇 (1340)
过渡金属掺杂对铜锡烧绿石催化碳烟燃烧性能的影响	李曦峰, 孙宇琦, 王仲鹏, 牟宗刚, 崔兆杰 (1348)
南水北调中线北京段水质状况分析	徐华山, 赵磊, 孙昊苏, 任玉芬, 丁涛, 常帅, 王海东, 李森, 果钊 (1357)
三峡前置库汉丰湖试运行年水文水质变化特征	杨兵, 何丙辉, 王德宝 (1366)
基于偏最小二乘模型的河流水质对土地利用的响应	李琳琳, 张依章, 唐常源, 郑磊, 孟伟, 卢少勇, 敦宇 (1376)
抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征	王琳杰, 余辉, 牛勇, 牛远, 张有林, 刘倩, 吉正元 (1384)
千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素	俞焰, 刘德富, 杨正健, 张佳磊, 徐雅倩, 刘晋高, 严广寒 (1393)
高通量测序技术研究辽河真核浮游藻类的群落结构特征	王靖淇, 王书平, 张远, 林佳宁, 高欣, 臧小苗, 赵茜 (1403)
三门湾近海有机污染对浮游细菌群落的影响	戴文芳, 郭永豪, 郁维娜, 熊金波 (1414)
沉积物-水界面氮的源解析和硝化反硝化	金赞芳, 龚嘉临, 施伊丽, 金漫彤, 李非里 (1423)
广州南沙红树林湿地水体和沉积物中有机氯农药的残留特征	丁洋, 黄焕芳, 李绘, 罗杰, 郑煌, 孙焰, 杨丹, 张原, 祁士华 (1431)
太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价	边博, 周燕, 张琴 (1442)
锁磷剂对杭州西湖底泥磷释放的控制效果	朱广伟, 李静, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军, 张运林, 秦伯强 (1451)
超滤处理东江水不可逆膜污染物的识别和活性炭对其吸附去除	杨海燕, 王灿, 鄢忠森, 李冬平, 赵焱, 瞿芳术, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1460)
UV/SPS 降解水中三氯生的效能及动力学	李青松, 李学艳, 姚宁波, 骆靖宇, 李国新, 陈国元, 高乃云 (1467)
真空紫外-亚硫酸盐法降解 PFOS 影响因素	韩慧丽, 王宏杰, 董文艺 (1477)
g-C ₃ N ₄ 协同光催化还原 Cr(VI) 及氧化磺基水杨酸	李莉莉, 陈翠柏, 兰华春, 刘菲, 安晓强 (1483)
锆改性硅藻土吸附水中磷的研究	范艺, 王哲, 赵连勤, 吴德意 (1490)
3 种常规消毒方法对磺胺类抗性基因削减效果的比较	郑吉, 周振超, 陈芳, 陈涛, 魏媛媛, 韩玥, 陈红 (1497)
典型生活污水处理工艺对雌激素效应的去除	张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1506)
SRT 对酵母-SBR 处理油脂废水稳定性的影响	吕文洲, 张树林, 乔宇祥, 刘英 (1513)
分散染料 neocron black (NB) 的生物降解特性	杨波, 丁凤友, 徐辉, 李方, 田晴, 马春燕 (1520)
多聚磷酸盐激酶基因在污水生物除磷中的功能	南亚萍, 周国标, 袁林江 (1529)
生物膜短程硝化系统的恢复及其转化为 CANON 工艺的过程	付昆明, 周厚田, 苏雪莹, 王会芳 (1536)
厌氧氨氧化反应器脱氮性能及细菌群落多样性分析	曹雁, 王桐屿, 秦玉洁, 韩彬, 任君怡 (1544)
内环境调节层对厌氧生物反应器填埋场中氮转化的影响	何正坤, 宋博宇, 朱南文, 董军 (1551)
矿化垃圾中 Fe(III) 还原耦合 CH ₄ 厌氧去除特性	王立立, 何婷, 龙焰, 刘常宝 (1558)
应用铅同位素示踪研究泉州某林地垂直剖面土壤中重金属污染及来源解析	孙境蔚, 于瑞莲, 胡恭任, 苏光明, 王晓明 (1566)
畜禽粪便有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异	何梦媛, 董同喜, 茹淑华, 苏德纯 (1576)
山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析	葛蔚, 程琪琪, 柴超, 曾路生, 吴娟, 陈清华, 朱祥伟, 马东 (1587)
江汉平原典型土壤环境中有机磷农药的分布特征及影响因素	王建伟, 张彩香, 潘真真, 廖小平, 刘媛, 吕曲, 汤蜜 (1597)
基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析	蔡观, 胡亚军, 王婷婷, 袁红朝, 王久荣, 李巧云, 葛体达, 吴金水 (1606)
秸秆还田对外源氮在土壤中转化及其微生物响应的影响	陈珊, 丁咸庆, 祝贞科, 王娟, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (1613)
生物炭输入对城郊农业区农田地表反照率及土壤呼吸的影响	张阳阳, 胡学玉, 邹娟, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (1622)
淹水水稻土消耗 N ₂ O 能力及机制	王玲, 邢肖毅, 秦红灵, 刘毅, 魏文学 (1633)
不同污水处理工艺非二氧化碳温室气体的释放	李惠娟, 彭党聪, 刘文博, 姚倩, 卓杨 (1640)
施用不同污泥堆肥品对土壤温室气体排放的影响	杨雨滢, 易建婷, 张成, 陈宏, 木志坚 (1647)
不同镉水平下纳米沸石对土壤 pH、CEC 及 Cd 形态的影响	迟苏琳, 徐卫红, 熊仕娟, 王卫中, 秦余丽, 赵婉伊, 张春来, 李彦华, 李桃, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1654)
不同作物对外源硒动态吸收、转运的差异及其机制	彭琴, 李哲, 梁东丽, 王梦柯, 郭璐 (1667)
褪黑素对水稻幼芽镍胁迫的缓解作用	刘仕翔, 黄益宗, 罗泽娇, 黄永春, 蒋航 (1675)
不同形态磺胺类药物在根-土界面的空间分布及毒性评价	金彩霞, 司晓薇, 王万峰, 王春峰, 王子英, 张琴文, 王婉 (1683)
三峡库区消落带沉积物对鱼体富集率的影响	孙松, 李楚娴, 张成, 王永敏, 王定勇 (1689)
重庆市居民头发重金属富集特征及相关性分析	何明靖, 李琦, 王登祥, 赵佳渊, 杨婷 (1697)
16S rRNA 高通量测序研究集雨窖水中微生物群落结构及多样性	杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (1704)
石墨烯掺杂聚苯胺阳极提高微生物燃料电池性能	黄力华, 李秀芬, 任月萍, 王新华 (1717)
美国污染场地清理的风险评估简介及政策制定	容跃 (1726)
《环境科学》征稿简则 (1505) 《环境科学》征订启事 (1682) 信息 (1339, 1459, 1612)	

太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价

边博^{1,2}, 周燕^{1,3}, 张琴^{1,3}

(1. 江苏省环境科学研究院, 南京 210036; 2. 江苏省环境工程重点实验室, 南京 210036; 3. 河海大学环境学院, 南京 210098)

摘要: 为研究太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险, 调查了丰-平-枯3个水期19个点位8种重金属的含量, 结果表明, 沉积物中重金属浓度顺序为 $Zn > Cr > Cu > Pb > Ni > As > Cd > Hg$, 其中 Cd 、 Cu 、 Zn 、 Pb 、 Ni 明显高于其环境背景值, 除 As 外, 其余7种重金属平水期含量高于丰水和枯水期。地累积指数(I_{geo})和潜在生态指数(RI)评价表明, 研究区沉积物中 Cd 属于中等污染程度和中等生态风险, Cd 对 RI 贡献率为35%, 重金属生物毒性不利影响评价值($mPEC-Q$)范围为0.12~0.76, 平均值0.30, 表明研究区发生生物毒性不利影响的可能性为15%~29%, 工业与生活混合区点位S2从污染程度、生态风险、生物毒性不利影响和主成分评价的污染及风险均最大, 表现出多种重金属的协同污染, 这与其周围污染排放特征一致, 为该区域河流沉积物中重金属污染控制提供依据。

关键词: 河流沉积物; 重金属; 不同水期; 污染特征; 风险评价

中图分类号: X52; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)04-1442-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201608078

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals from River Network Sediment in Western Area of Taihu Lake

BIAN Bo^{1,2}, ZHOU Yan^{1,3}, ZHANG Qin^{1,3}

(1. Jiangsu Academy of Environmental Science, Nanjing 210036, China; 2. Jiangsu Province Key Laboratory of Environmental Engineering, Nanjing 210036, China; 3. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: River sediments is a valuable environmental medium for characterizing contamination of heavy metals in the western areas of Taihu Basin and the associated risks to human health. We collected samples of typical inflow river sediments from nineteen sites during different water periods. The results showed that the concentrations of heavy metals in the river sediments followed the order of $Zn > Cr > Cu > Pb > Ni > As > Cd > Hg$. Compared to the background concentrations, the mean concentrations of Zn , Cd , Cu , Ni and Pb seriously exceeded the standard values. Except for As , the highest concentrations of heavy metals (Zn , Cr , Cu , Pb , Ni , Cd , Hg) were found in the samples from normal water period. The metal (Cd) presented moderate pollution degree and ecological risks, and the RI value of Cd accounted for about 47% of the total RI value. The $mPEC-Q$ values of the sediments were in the range of 0.12-0.76, and the mean value was 0.3, indicating that the sediments in all of the sampling sites had a 15%-29% probability of toxicity. In terms of the highest value of the heavy metals, higher concentrations, I_{geo} , $mPEC-Q$ and PCA values were found at the S2 sampling sites. The results showed that effects of synergism of heavy metals pollutants on the point were found in the paper, which will provide scientific basis for control of heavy metal pollution in the Taihu Basin.

Key words: river sediment; heavy metals; different water periods; pollution characteristics; risk assessment

河流沉积物是环境中重金属主要存储介质, 水体中一些重金属也以各种形态被沉积物所吸附存储^[1,2], 使得重金属长期在沉积物中累积, 当外界条件发生改变时, 沉积物中所吸附的重金属有可能重新释放到水环境中而被生物体所利用。沉积物中重金属为多种重金属的复合污染, 特别重金属 Cd 、 Cu 、 Pb 、 Zn 、 Cr 、 Hg 、 As 、 Ni 等具有持久性和生物毒性, 且伴随其他类型污染物形成混合型沉积物污染, 若这些污染通过食物链可能会影响人体健康^[3], 因此研究河湖系统沉积物中重金属的污染行为并开展相关风险评价已成为研究热点^[4~8]。研究河流沉积物中重金属污染特征及风险, 特别是城镇化水平很高的太湖流域西岸区域, 将对于该区域河

流沉积物中重金属污染控制具有重要意义。

太湖流域西北部地区宜兴和武进城镇化水平高, 区域内工业企业较多, 涉及到重金属的如电镀、制造等行业, 其尾水携带着大量重金属排入河流水污染尤为严重, 该区域基本涵盖了太湖流域上游主要入湖河流, 占太湖入湖污染物通量的80%左右, 是影响太湖湖体, 特别是梅梁湾、竺山湾污染主要区域, 是太湖流域的重污染区^[4], 研究发现, 该区域部分入湖河流河湖交界处以及入湖湖湾处重金属污

收稿日期: 2016-08-11; 修订日期: 2016-11-06

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK20151596); 江苏省“333”工程科研项目(BRA2015524)

作者简介: 边博(1977~), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为污染控制及废弃物资源化, E-mail: bianbo1@163.com

染状况不容乐观,目前关于该区域河网区重金属污染现状、污染迁移和分布的研究并不多^[9~11].近年来,国内外众多学者从沉积学角度提出了水体中沉积物重金属多种污染评价方法,比如: I_{geo} 法、平均可能影响浓度商法(mPEC-Q)和潜在生态风险评价法(RI)等,这几种方法评价目不一样, I_{geo} 法是评价污染程度,RI是评价生态风险的,mPEC-Q是评价生物毒性,避免单一评价方法无法系统综合评价沉积物中重金属污染特征,采用几种评价方法结合的方式,准确、科学、综合的评价沉积物中重金属的污染特征及风险等级是尤为重要的^[12~16].因此,本研究针对太湖西岸河网区域水系复杂,重金属污染源较为复杂的太湖流域典型河流,采用多种评价方法相结合的方式,探讨该区域河网沉积物中重金属时空分布特征,确定重金属污染程度及风险等级,以期

为该区域河流沉积物中重金属污染提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于江苏省境内太湖西岸无锡宜兴、常州武进区,东经 119°40′~120°10′,北纬 31°10′~31°40′范围内 18 条河流,共 19 个监测点环境特征和空间分布图(见表 1 和图 1).该研究区污染物排放强度是太湖流域污染物排放强度的 1.3 倍以上,研究区内企业较多,多数企业在乡镇工业集中区,共有 4 个省级工业园区:武进高新区、武进经发区、宜兴经发区、宜兴环保产业园,主要涉及重金属的工业行业钢铁、黑色金属冶炼及压延、金属品制造、电机电器行业、铜材加工、机械铸件、电线电缆等特色产业.

表 1 采样点环境特征
Table 1 Environmental characteristics of sampling locations

编号	点位名称	坐标	水功能区类型、污染特征
S1	遥观宋剑湖桥	E120°3′, N31°42′	生活区,浆纱厂
S2	礼嘉双桥	E120°1′, N31°38′	生活区,电子、化工
S3	雪堰蒋庄大桥	E120°2′, N31°35′	城市生活区
S4	湍里埠新桥	E119°42′, N31°38′	农业和种植业
S5	前黄蒋排桥	E119°55′, N31°35′	精细化工,食品加工
S6	雪堰太漚运河桥	E120°1′, N31°32′	生活区,建材五金
S7	雪堰桥	E120°6′, N31°31′	城市生活区,装潢材料
S8	新建中干河桥	E119°40′, N31°34′	水产养殖,高新技术产业
S9	和桥静堂大桥	E119°52′, N31°28′	城市生活区,服装
S10	芳桥惠农新桥	E119°55′, N31°23′	生活区,旅游业
S11	徐舍文定大桥	E119°38′, N31°23′	城市生活区
S12	宜兴市荆邑大桥	E119°50′, N31°21′	城市生活区
S13	丁蜀陈东港大桥	E119°55′, N31°18′	城市生活区
S14	丁蜀大浦桥	E119°55′, N31°17′	生活区
S15	西渚新桥	E119°34′, N31°17′	纺织机械
S16	胡埭一里桥	E119°48′, N31°14′	教学区
S17	横山水库	E119°34′, N31°14′	高级酒店,旅游度假
S18	太华云湖桥	E119°35′, N31°12′	城市生活区
S19	丁蜀大港桥	E190°55′, N31°12′	生活区

1.2 样品采集与分析

于 2012 年 12 月(枯水期)、2013 年 4 月(平水期)、2013 年 9 月(丰水期)分别采集这 19 个监测断面表层底泥样品.所有采样点均使用全球卫星定位系统进行定位采集,每次用不锈钢抓斗式采样器采集表层 0~5 cm 沉积物 1~2 kg 共 19 个,装入聚乙烯塑料袋,并现场放入装有冰袋的保温箱暂存,经冷冻干燥机干燥后,用玻璃棒压散,剔除大小砾石、贝壳及动植物残体等杂质,四分法取其 1/4 作为实验样品,经玛瑙研钵研细过 200 目尼龙筛后,储存于聚乙烯瓶中待测,预处理及监测方法见文献[17].

测定过程中使用沉积物标准物质(GBW-07309)进行质量控制,设置 3 个平行样,沉积物参考物质回收率基本在 89%~109%之间,相对标准偏差均在 10%以内.

样品预处理:称取 0.5 g(精确至 0.002 g)土置于 50 mL 聚四氟乙烯坩埚中,用水湿润后加入 10 mL 浓盐酸,放于通风橱内的电热板上低温加热,使样品初步分解,待蒸发至约剩 3 mL 左右时,取下稍冷,然后加入 5 mL 硝酸、5 mL 氢氟酸、3 mL 高氯酸加盖后于电热板上中温加热 1 h 左右,然后开盖,电热板温度控制在 150℃,继续加热.当加热至冒浓

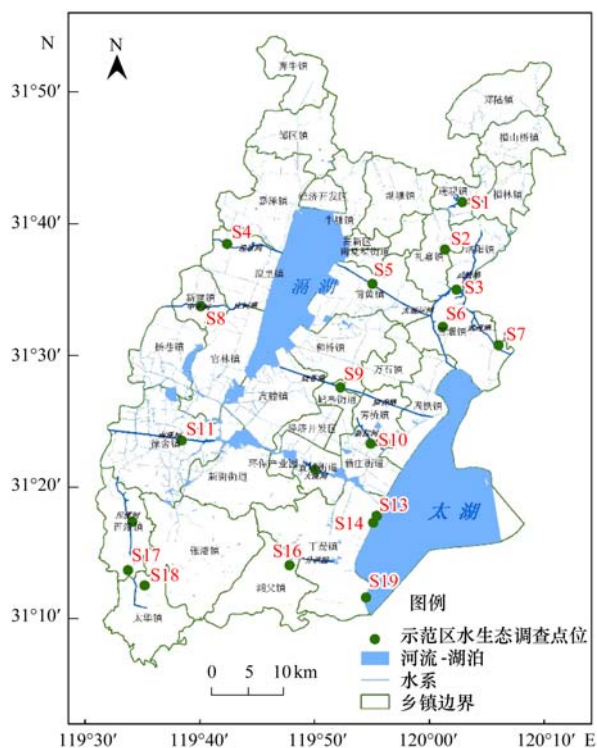


图1 研究区域与样品采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of study areas and sampling locations

厚高氯酸白烟时,加盖,使黑色有机碳化物分解,若是有机物分解不完全可再补加 3 mL 硝酸、3 mL 氢氟酸、1 mL 高氯酸,重复以上消解过程。取下坩埚稍冷,全量转移至 50 mL 溶液瓶中,冷却后用去离子水定容,摇匀。测定沉积物中 Hg 的试样预处理如下:在 40℃ 干燥至少 12 h,研磨并过 250 目筛子。称取约 0.5 g 试样在高压消解罐中,加入 2.0 mL 去离子水和 3.0 mL 硝酸,关闭罐子并放入在不锈钢罐套中,在烘箱 140℃ 加热过夜。冷却后,转移至 50 mL 容量瓶中,加 1 mL 1% 盐酸羟胺溶液,混匀,用去离子水稀释至刻度。Cd、Cr、Cu、Hg、Pb、Zn、As、Ni 8 种重金属采用电感耦合等离子体质谱法测定(ICP-MS, Agilent 7500a)。沉积物中的全氮测定使用半微量开氏法;硝酸盐氮测定使用紫外-分光光度法;采用氯化钾提取-纳氏试剂比色法分析测定铵态氮;全磷测定采用硫酸-高氯酸消化钼锑抗比色法;有机碳测定使用重铬酸钾容量法。

1.3 河流沉积物中重金属污染、生态风险和生物毒性不利影响评价

(1) 地累积指数(I_{geo})

$$I_{geo} = \log_2 [C_n / (K \times B_n)] \quad (1)$$

式中, C_n 为重金属 n 在沉积物中的实际含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), K 为考虑地域差异可能会引起背景值的变动而采取的修正系数,常取 1.5; B_n 为沉积物

中重金属元素 n 地球化学背景 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 由于全球沉积页岩的平均含量远大于区域背景值, 本研究针对太湖西岸沉积物重金属污染评价, 由于太湖沉积物受周围下蜀黄土类的沉积物影响较大, 所以下蜀黄土的重金属的本底值可以作为太湖沉积物重金属的背景值, 具体分别为 (单位: $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$): Cd (0.27)、Cr (79.3)、Cu (18.9)、Hg (0.11)、Pb (19.5)、Zn (59.2)、As (9.4) 和 Ni (15.7) [18]。污染程度分级见表 2。

(2) 潜在生态风险评价 (RI)

确定毒性响应系数, 计算重金属潜在生态指数, 是综合反映重金属对生态环境影响指标, 以下蜀黄土重金属的本底值作为重金属背景值 [18], 计算公式如下:

$$C_f^i = C^i / C_n^i \quad (2)$$

式中, C_f^i 为某一重金属 i 的污染系数; C^i 为沉积物中重金属 i 实测含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); C_n^i 为重金属 i 的区域背景值。单种重金属污染物潜在生态风险系数参见公式 (3):

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \quad (3)$$

式中, T_r^i 表示重金属 i 的毒性响应系数, 揭示了重金属对人体的危害和对水生生态系统的危害, 总风险参数之和 RI 参见公式:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_f^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{C^i}{C_n^i} \quad (4)$$

本研究中 8 种重金属毒性系采用 Hakanson 数值, 毒性顺序为: Hg > Cd > As > Pb > Ni = Cu > Cr > Zn, 毒性响应系数值分别为: Hg = 40, Cd = 30, As = 10, Pb = Cu = Ni = 5, Zn = 1, Cr = 2 [19], 潜在生态风险指数 RI 分级见表 2 所示。

(3) 生物毒性不利影响评价 (mPEC-Q)

本研究采用 Ingersoll 等 [20] 提出生物毒性不利影响 (mPEC-Q, 无量纲) 评价沉积物沉积物中 8 种重金属的混合生物效应。计算公式为:

$$\text{mPEC-Q} = \sum_{i=1}^n (C_i / \text{PEC}_i) / n \quad (5)$$

式中, C_i 为沉积物中重金属 i 的实测浓度 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); PEC_i 为重金属 i 可能效应浓度; n 代表重金属种类。为了更深入评价沉积物中重金属潜在生态危害, 将单个重金属含量与相应的阈值效应浓度 (TEC) 和可能效应浓度 (PEC) 相比较, 若低于 TEC, 表示生态毒性不会发生; 若高于 PEC 则表示生态毒性会频繁发生 [21]。重金属 Cd、Cr、Cu、Hg、Pb、Zn、As 和 Ni 的 TEC 值分别为 0.99、43.3、

31.6、0.18、35.8、121、9.79 和 227, PEC 值分别为 4.98、111、149、1.06、128、459、33 和 486, 根据可
能效应浓度的值, 把生物毒性分为 4 个等级, 如表 2 所示(PTP 表示发生生物毒性效应可能性).

表 2 沉积物中重金属污染评价方法及程度分级

Table 2 Risk assessment methods and grading of heavy metals contamination in sediment			
方法名称	地累积指数(I_{geo})	潜在生态风险指数(RI) ^[19]	平均可能影响浓度商(mPEC-Q) ^[20]
方法特点	单一重金属的污染评价	多种重金属综合的 = 生态风险评价	重金属生物毒性不利影响评价
评价等级	(-∞, 0], 无污染 (0, 1] 轻污染 (1, 2], 偏中度 (2, 3], 中度 (3, 4], 偏重度 (4, 5], 重度 (5, +∞] 极重度	RI ≤ 55, 低风险 55 < RI ≤ 110, 中风险 110 < RI ≤ 220, 高风险 RI > 220, 很高风险	mPEC-Q ≤ 0.1, PTP < 14% 0.1 < mPEC-Q ≤ 1, 15% < PTP ≤ 29% 1 < mPEC-Q ≤ 5, 33% < PTP ≤ 58% 5 < mPEC-Q, 75% < PTP ≤ 81%

2 结果与讨论

2.1 研究区河流沉积物中重金属含量空间变化

研究区域沉积物重金属空间分布特征如图 2 所示,除了 Cr 中值、均值及 75% 样品数含量均低于太湖平原沉积物背景值外,与该区域的其他研究结果一致^[22],可能因为该区域废水中 Cr 含量很少有关,其它 7 种重金属均值、中值均高于相应的背景值,Cr、Cu、Zn、As、Ni 最大值都出现在礼嘉双桥(S2),该地区周围环境复杂,属于城市生活区,生活污水直排进入水体,另有一工业园区排污口直接进入河道,使得区域沉积物受重金属污染较严重. 研究区河流沉积物 8 种重金属浓度值及季节变化特征如图 3, Cd、Cu、Pb、Zn、Ni 明显高于环境背景值, Cd 均值是背景值 1.72 倍, Cu 均值是背景值 3.82 倍, Pb 均值是背景值 2.17 倍, Zn 均值是背景值 2.43 倍, Ni 均值是背景 2.50 倍. 其中 Cu、Zn、Pb、Ni 均超过世界湖泊沉积物中微量金属的毒性参考值(TRV, 其中 Cu、Zn、Pb、Ni 和 Cr 的数值分别为 16、110、31、16 和 26 mg·kg⁻¹^[23], Cu 超标达 4.51 倍,这与在太湖湖体及重要湖湾沉积物研究报道中发现的结果相类似^[24]. Cu、Zn 在武宜运河沉积物污染水平远高于湖体重金属污染水平,但在梅梁湾和竺山湾 Cu、Zn 污染水平基本一致,且 Cu 为武宜运河重金属生态风险的主要贡献因子^[22],这说明重金属通过入湖河流进入湖体是湖体重金属污染的重要途径. 从不同水期沉积物重金属分布来看,除了 As 外,其它 7 种重金属含量平水期均值高于枯水期和丰水期,分析认为平水期各采样河段水流相对平稳,底泥含沙量较少,周边区域电镀、有色金属工业废水的排放导致沉积物重金属累积.

2.2 研究区河流沉积物重金属污染评价

研究区各重金属地累积指数污染评价排序为 2

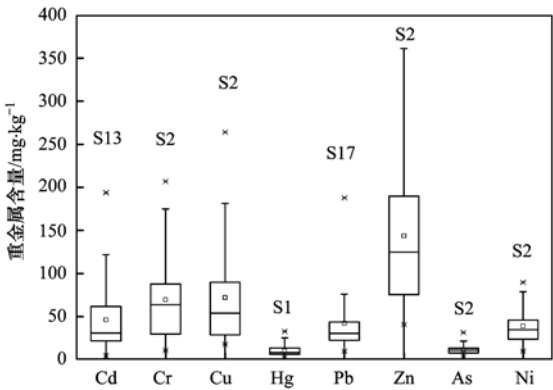


图 2 研究区不同采样点沉积物重金属箱式图

Fig. 2 Concentration of heavy metals in the bottom sediments in different sampling sites collected from the study area

> Cd > 1 > Cu > 0 > Pb > Zn > Hg > Ni > As > Cr, 研究区 Cd 属于中度污染程度, Cu 属于轻污染, 其余重金属评价结果小于零, 属于无污染状态, 由图 4 不同样点重金属 I_{geo} 可以看出, 研究区重金属沉积物中 Cd 在 S6、S13、S14 点 I_{geo} 在 2~3 之间, 属于中度污染, S13 处达到最大值 2.87, 其他点位均属于偏中等程度或轻度污染. Cr、As、Hg、Ni 的 I_{geo} 值均小于 0 或接近 0, 属于未污染状态, 局部点位属于轻污染, 在 S2 处 Cr、Cu、Hg、Zn、As、Ni 6 种沉积物重金属 I_{geo} 均达到最大值, 表明该处沉积物多种重金属富集程度较高. Cu、Pb、Zn 在研究区 78.94% 的样点为无污染或轻污染, 其余为偏中度或中度污染.

2.3 研究区河流沉积物重金属生态风险及生物毒性不利影响评价

图 5 为 Cd、Cr、Cu、Hg、Pb、Zn、As、Ni 等 8 种重金属综合生态风险效应值 RI 计算结果. 从中可知, 从单种重金属潜在生态风险来看, 这 8 种重金属 E_r^i 计算值从大到小顺序为: Cd > Hg > Cu > As > Ni > Pb > Zn > Cr, 其中潜在生态危害最大的重金属为 Cd, 68% 的样点受到中等及其以上的生态危害,

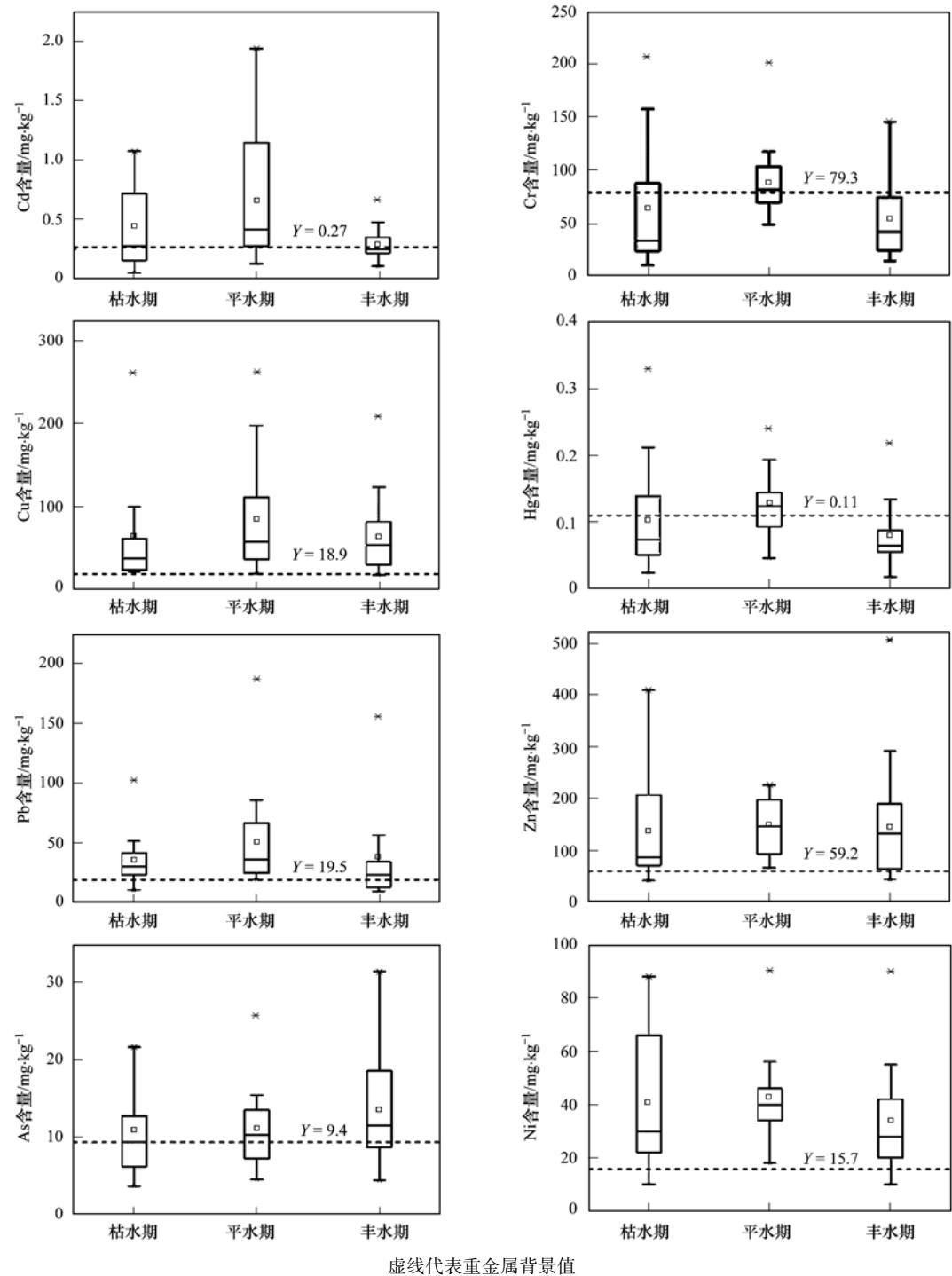


图 3 研究区不同水期河流沉积物重金属箱式图

Fig. 3 Concentration of heavy metals in the bottom sediments during different water periods

其最大值(124.8)出现在丁蜀陈东港大桥(S13),属于较强生态危害。研究区沉积物中Cd对RI贡献率最大为35%,与该区域高度城镇化,工业发达,特别区域涉及重金属工业行业钢铁、金属品制造、电机电器行业和电线电缆等特色产业工业废水排放有关,使得区域河流沉积物中的Cd污染应予以重视。其次Hg对RI贡献率为26%,其它6种重金属对RI

累加贡献率为41%左右,RI最大值(252.3)出现在S2点位,其次为S1,S13和S14,它们的RI数值均大于200,S4,S5,S6和S7的RI数值均大于150,以上8个点均为高生态风险,其余点位的沉积物重金属污染均为中等生态风险,RI最小值(66.3)为S15点,位于宜兴西部山区,周边环境非常好,人为活动干扰小。

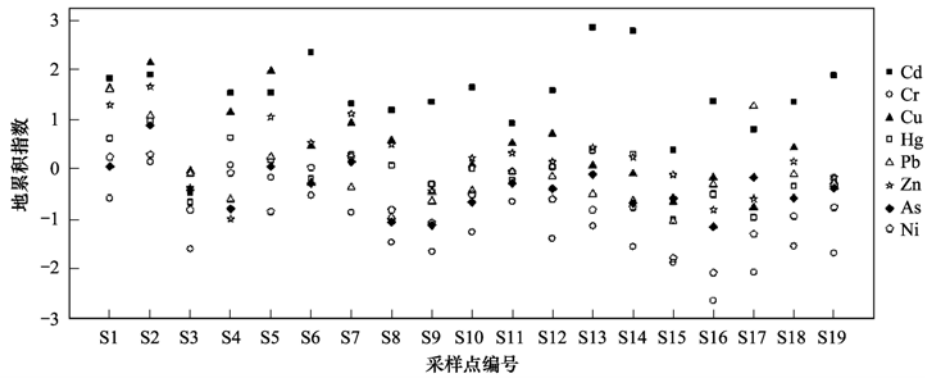


图4 研究区河流沉积物重金属 I_{geo} 分布

Fig. 4 The I_{geo} values of heavy metals in the bottom sediments collected from the study area during different water periods

本研究可知,当重金属含量低于 TEC (阈值效应浓度) 时,对底栖动物不产生危害,当污染物含量介于 TEC 与 PEC (可能效应浓度) 之间时,可能对部分底栖动物产生危害,当污染物含量超过 PEC 值时,对底栖动物产生危害作用. 由各种金属含量与对应 TEC (阈值效应浓度) 比值可以看出,除了 Ni 浓度数值低于 TEC 值外,Cr 浓度与 TEC 比值最大,表示沉积物中底栖生物可能受到 Cr 危害作用较大,各重金属元素污染程度由强到弱的顺序依次为:Cr > Cu > As > Zn > Pb > Hg > Cd > Ni. 由图 5 可知,研究区沉积物重金属 mPEC-Q 值在 0.16 ~ 0.66 之间,平均值为 0.30,表明该研究区域发生生物毒性不利影响可能性在 15% ~ 29% 之间,各个点位 mPEC-Q 值均在 0.1 ~ 1 之间,表明整体受生物毒性不利影响可能性在 15% ~ 29% 之间,mPEC-Q 的最大值出现在 S2 处,表明该点位沉积物重金属生物毒性不利影响程度最大,S15、S16 两点位 mPEC-Q 值最低,表明该点位沉积物重金属生物毒性不利影响程度最小,mPEC-Q 和 RI 值整体变化趋势基本一致,都在 S2 采样点出现陡增,在 S15、S16 点出现明显突减,这与不同点位沉积物重金属评价结果与其周边的环境

特征密切相关.

综上所述,地累积指数可以直观地看出某样点重金属超标情况,侧重单一金属,无法反映研究区河网区域整体污染水平. 潜在生态指数从重金属生态风险出发,综合考虑重金属毒性和浓度,反映沉积物中单一重金属生态影响,也体现多种重金属的综合潜在生态风险,但忽略了多种金属复合污染时金属间的协同影响^[25~27]. 生态毒性不利影响评价反映了沉积物重金属的相互作用,评价数值与相应沉积物毒性发生率高度相关^[28,29],反映沉积物中重金属的综合毒性优势,也反映了沉积物中重金属对潜在生物的不利影响情况. 本文中地累积指数、生物毒性不利影响评价 Hg 属于无污染状态,局部位点属于轻度污染,对底栖动物不利影响小,在承受范围之内,而潜在生态风险系数评价研究区 32% 样点为中等生态风险,不同评价方法的评价结果的差异性与评价方法本身和评价对象相关,因此,采用不同评价方法从不同角度评价沉积物中重金属污染及风险,可为有效制定重金属污染防控方案提供更为科学的依据.

2.4 研究区河流沉积物重金属可能来源分析

对研究区域 19 个采样点的 8 种重金属含量进

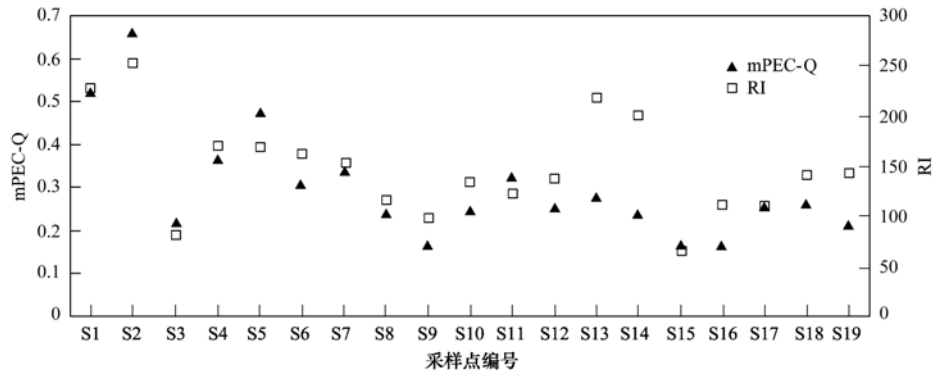


图5 研究区域沉积物重金属潜在风险指数 (RI) 和平均可能影响浓度商 (mPEC-Q)

Fig. 5 RI and mPEC-Q values of heavy metals in the bottom sediments from the study area

行聚类,将数据标准化到 $[0,1]$ 范围,对距离的测度方法选取平方 Euclidean 距离法,以离差平方和法(Ward method)进行变量 Q 型聚类,结果如图 6 所示,可以看出,Cd、Hg、As 属于第一类,Cr、Cu、Pb、Ni 属于第二类,Zn 为第三类.若将距离定位“5”以内,则第二类中的 Cr、Cu 为一类,Pb、Ni 为另外一类,故可以定性的认为 Cd、Hg、As、Cr、Cu、Pb、Ni 各自两组重金属含量空间变化规律较为一致,分析认为这是因为 20 世纪 70 年代末期以来,太湖流域西岸黑色、有色金属冶炼工业及电镀工业发展较快,大量污水排入河网,其中包含大量重金属,比如许多生产合成橡胶的工厂用稳定剂产生的 Cd、Pb 和 Zn,金属电镀过程中产生的 Cu、Ni 和 Zn,以及皮革生产企业产生的 Cr.其中 Hg 污染程度较低,可能是岩石风化进入水体. Cr、Cu、Pb、Ni 污染除了沿岸工业生产废水排入河道外,大气沉降也是其主要来源,其中大气沉降带来的 Pb 达 $6.36 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ [30].

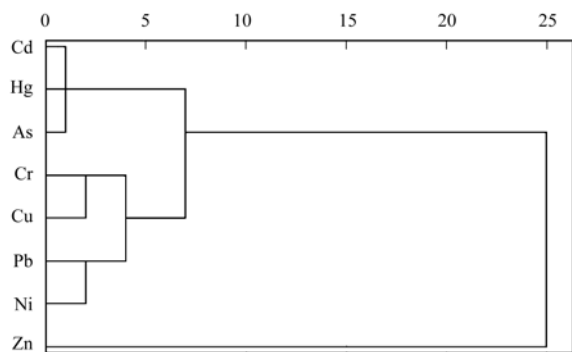


图 6 基于不同沉积物重金属的聚类分析树状图(组间连接)

Fig. 6 Dendrogram for cluster analysis (CA) of heavy metals in the bottom sediments collected from the study area during different water periods

应用多元统计类方法中的主成分分析法(principal component analysis, PCA)运用降维的思想,对研究区 19 个样点分析关键因子及主要污染物来源.由图 7 可知,特征值 $\lambda > 1$ 时有 4 个主成分, $\lambda_1 = 4.261$, $\lambda_2 = 3.293$, $\lambda_3 = 1.306$, $\lambda_4 = 1.059$, 这 4 个主成分解释了沉积物中 14 种污染物 72.28% 的影响因素,分别解释总污染比例的 30.44%、23.52%、9.33%、8.99%. Cr、Zn、Hg、Cu、Ni 在第一主成分上有较高荷载,说明研究区域河流沉积物中主要为这 5 种重金属污染,也说明了重金属之间具有较强的相关性,全氮、硝酸盐氮、总有机碳、全磷在第二主成分上具有较高荷载,说明第二主成分主要代表沉积物营养盐,氮磷之间相关性显著,铵态氮和

As 在第三主成分上具有荷载值,说明沉积物中 As 和铵态氮之间具有一定相关性,磷酸盐和氨氮在第四主成分上具有荷载值.主成分分析将多个指标或实测变量转换成几个较少的互不相关的综合指标,判断河流沉积物污染更直观,从沉积物污染指标三维载荷图及因子载荷矩阵可以看出不同主成分中包含的变量以及它们之间聚集度,为了了解每个采样点综合污染程度则需要通过计算主成分得分.初始因子载荷矩阵可由 SPSS 直接得到,而主成分载荷矩阵需用初始因子载荷矩阵数据除以主成分相对特征值的平方根得到相应的主成分载荷值.根据综合评价函数计算各个样点沉积物污染综合得分,并将污染定量化,由图 8 可知,19 个点各个主成分得分及综合得分情况,可以看出,S1 和 S2 均第一主成分得分占优,表明这两处沉积污染物以重金属为主;S8 处第二主成分得分占优,表明该处沉积物污染物以全氮、硝酸盐氮、总有机碳、全磷等营养物为主;S6 处在第三主成分占优,表明该处沉积物污染物以氨氮和 As 为主,S13 处第四主成分占优,表明该处沉积物污染物以氨氮和磷酸盐为主.从第一主成分 F1 得分来看,礼嘉双桥(S2)得分明显高于其它采样点,表明该处 Cr、Zn、Hg、Cu、Ni 这 5 种重金属含量较高,沉积物重金属组成相对复杂,且含量较高.从第二主成分 F2 得分来看,前黄蒋排桥(S5)、雪堰桥(S7)、新建中干河桥(S8)得分明显高于其它采样点,表明这三处沉积物中全氮、硝酸盐氮、总有机碳、全磷含量较高.从第三主成分 F3 得分来看,礼嘉双桥(S2)得分最高,表明该处沉积物中重金属和氨氮污染严重,从第四主成分 F4 得分来看,丁蜀陈东港大桥(S13)得分最高,表明该处氨氮和磷酸盐沉积物中污染严重.

对 19 个点按照各污染指标进行相似聚类结合不同点位的水环境功能区划要求,确定某些点位具有相似的污染物,由聚类可知,S10、S12、S8、S18、S19 为第一类,S9、S16、S3、S15 为第二类,S6、S11、S7 为第三类,S13、S14 为第四类,S17 为第五类,S4、S5 为第六类,S1、S2 为第七类,这 19 个采样点共分为 7 类.属于同一类的采样点有相似的污染物来源,不属于同一类采样点之间污染物来源存在差异^[31],其中第一类有 5 个采样点,地域上较为分散,S8 位于武进区,其余 4 个点都在宜兴境内,这一类水环境功能区主要为生活区,第二类中雪堰镇(S3)、宜兴氾亭(S9)、西渚镇(S15)这 3 个地区生活区和局部的纺织机械加工,工业废水中可能

有某类重金属;第三类主要集中在农作区和餐饮密集区,污染来源于农业面源及生活垃圾;第四类 S13 和 S14 均在丁蜀镇内,属于集农业观光与农业生产为一体,污染源主要来自农业废水;第五类为旅游区,其主要污染源为垃圾污染;第六类交通便利,蔬菜生产基地,因此其主要污染源由交通和农业活动排放的废水,第七类污染源组成较为复杂,既有电子和化工工业集中区,也是生活集聚区,污染源比较复杂,属于多种污染排放协同作用的结果。

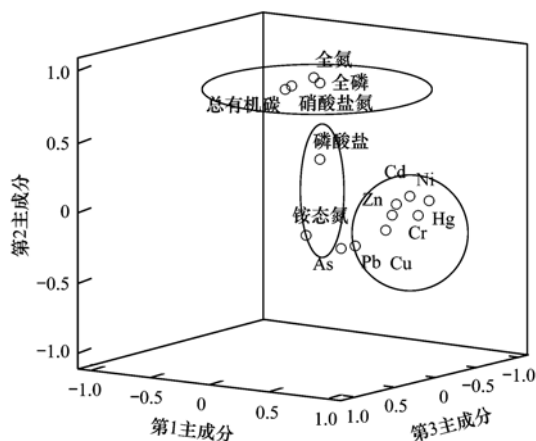


图7 研究区沉积物中各污染物主成分分析三维载荷图

Fig. 7 Principal component analysis (PCA) of the pollutants in the sediments of the study area

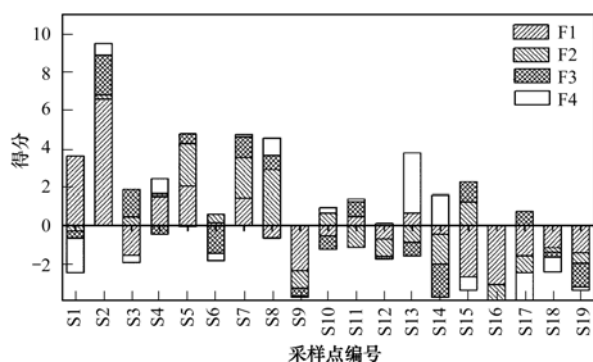


图8 不同点位沉积物主要污染物各主成分得分

Fig. 8 PCA analysis of heavy metals in the sediments of different points collected from the study area

3 结论

(1)研究区沉积物中 Cd、Cu、Zn、Pb、Ni 含量最高,明显高于环境背景值,Cu 是环境背景值的 3.82 倍。

(2)研究区沉积物中重金属 I_{geo} 评价可知,Cd 属于中等污染程度,Cr、As、Hg、Ni 属于未污染,RI 值从大到小顺序为: Cd > Hg > Cu > Pb > As > Ni > Zn > Cr, Cd 的 RI 值是 Cr 的 27 倍,重金属的 mPEC-Q 值范围为 0.12 到 0.76,,均值为 0.30,表明该区域

发生生物毒性不利影响的可能性为 15% ~ 29%。

(3)点位 S2 位于工业与生活混合区域,依据 I_{geo} 、RI、mPEC-Q 和主成分评价结果的数值均最大,表现为多种重金属的复合污染,生物毒性不利影响也大,这与其周围污染排放特征一致,应该采取相应管理和治理措施。

参考文献:

- [1] Fu J, Hu X, Tao X C, *et al.* Risk and toxicity assessments of heavy metals in sediments and fishes from the Yangtze River and Taihu Lake, China[J]. *Chemosphere*, 2013, **93**(9): 1887-1895.
- [2] Niu Y, Niu Y, Pang Y, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in sediments of inflow rivers to lake Taihu, China[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2015, **95**(5): 618-623.
- [3] Zoumis T, Schmidt A, Grigorova L, *et al.* Contaminants in sediments: remobilisation and demobilisation[J]. *Science of the Total Environment*, 2001, **266**(1-3): 195-202.
- [4] 边博,夏明芳,王志良,等. 太湖流域重污染区主要水污染物总量控制[J]. *湖泊科学*, 2012, **24**(3): 327-333.
Bian B, Xia M F, Wang Z L, *et al.* Total amount control of main water pollutants in seriously polluted area of Taihu Basin[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, **24**(3): 327-333.
- [5] 黄莹,李永霞,高甫威,等. 小清河表层沉积物重污染区重金属赋存形态及风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(6): 2046-2053.
Huang Y, Li Y X, Gao F W, *et al.* Speciation and risk assessment of heavy metals in surface sediments from the heavily polluted area of Xiaoqing River[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(6): 2046-2053.
- [6] 王瑞霖,程先,孙然好. 海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价[J]. *环境科学*, 2014, **35**(10): 3740-3747.
Wang R L, Cheng X, Sun R H. Ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments in the southern and central Haihe River Basin[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(10): 3740-3747.
- [7] 张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清. 艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 490-496.
Zhang Z Y, Jilili A, Jiang F Q. Sources, pollution statue and potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of Aibi Lake, Northwest China[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 490-496.
- [8] 周晓红,刘龙梅,陈曦,等. 金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4127-4134.
Zhou X H, Liu L M, Chen X, *et al.* Heavy metals distribution characteristics and ecological risk evaluation in surface sediments of dammed Jinshan Lake[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4127-4134.
- [9] Wang X L, Ding S M, Zhang Q, *et al.* Assessment on contaminations in sediments of an intake and the inflow canals in Taihu Lake, China[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2015, **9**(4): 665-674.
- [10] Cai Y, Zhang W G, Zhou M C, *et al.* Comprehensive assessment

- of heavy metal contamination in surface sediments from the inflow rivers of Taihu Basin[J]. *Clean-Soil Air Water*, 2015, **43**(12): 1582-1591.
- [11] 陈春霄, 姜霞, 战玉柱, 等. 太湖表层沉积物中重金属形态分布及其潜在生态风险分析[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(11): 1842-1848.
- Chen C X, Jiang X, Zhan Y Z, *et al.* Speciation distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Taihu Lake[J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(11): 1842-1848.
- [12] 徐争启, 倪师军, 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.
- [13] Yin H B, Gao Y N, Fan C X. Distribution, sources and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments from Lake Taihu, China[J]. *Environmental Research Letters*, 2011, **6**(4): 044012.
- [14] Kumar R N, Solanki R, Kumar J I N. Seasonal variation in heavy metal contamination in water and sediments of river Sabarmati and Kharicut canal at Ahmedabad, Gujarat [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(1): 359-368.
- [15] Akbal F, Gürel L, Bahadır T, *et al.* Multivariate statistical techniques for the assessment of surface water quality at the mid-black sea coast of turkey [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2011, **216**(1-4): 21-37.
- [16] Pejman A, Bidhendi G N, Ardestani M, *et al.* A new index for assessing heavy metals contamination in sediments; a case study [J]. *Ecological Indicators*, 2015, **58**: 365-373.
- [17] 夏新. 土壤和沉积物中有机物和重金属监测新方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011. 38-52.
- Xia X. Organic matter and heavy metals in soli and sediment monitoring and analysis methods [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2011. 38-52.
- [18] 张于平, 瞿文川. 太湖沉积物中重金属的测定及环境意义[J]. *岩矿测试*, 2001, **20**(1): 34-36.
- Zhang Y P, Qu W C. Determination of heavy metal contents in the sediments from Taihu lake and its environmental significance [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2001, **20**(1): 34-36.
- [19] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [20] Ingersoll C G, MacDonald D D, Wang N, *et al.* Predictions of sediment toxicity using consensus-based freshwater sediment quality guidelines[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2001, **41**(1): 8-21.
- [21] Lacey E M, King J W, Quinn J G, *et al.* Sediment quality in Burlington harbor, lake champlain, U. S. A. [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2001, **126**(1-2): 97-120.
- [22] 牛勇, 余辉, 张敏, 等. 太湖流域典型河流沉积物重金属污染特征及生态风险评价[J]. *环境工程*, 2013, **31**(5): 151-155, 38.
- Niu Y, Yu H, Zhang M, *et al.* Distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals of typical river in Taihu lake watershed[J]. *Environmental Engineering*, 2013, **31**(5): 151-155, 38.
- [23] Mohiuddin K M, Zakir H M, Otomo K, *et al.* Geochemical distribution of trace metal pollutants in water and sediments of downstream of an urban river [J]. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2010, **7**(1): 17-28.
- [24] 陈修报, 苏彦平, 刘洪波, 等. 基于“标准化”背角无齿蚌 (*Anodonta woodiana*) 对太湖五里湖重金属污染的主动监测[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(6): 857-863.
- Chen X B, Su Y P, Liu H B, *et al.* Active biomonitoring of heavy metal pollution level of Wulihu area, Lake Taihu using “standardized” *Anodonta woodiana* [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(6): 857-863.
- [25] Chen C X, Zheng B H, Xia J, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of mercury in sediments of Lake Taihu, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(2): 316-325.
- [26] 陈明, 蔡青云, 徐慧, 等. 水体沉积物重金属污染风险评价研究进展[J]. *生态环境学报*, 2015, **24**(6): 1069-1074.
- Chen M, Cai Q Y, Xu H, *et al.* Research progress of risk assessment of heavy metals pollution in water body sediments[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(6): 1069-1074.
- [27] El-Sayed S A, Moussa E M M, El-Sabagh M E I. Evaluation of heavy metal content in Qaroun Lake, El-Fayoum, Egypt. Part I: Bottom sediments[J]. *Journal of Radiation Research & Applied Sciences*, 2015, **8**(3): 276-285.
- [28] Chen L, Song C W, Yin Y Y, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in sediments of Shuangtaizi estuary, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, **98**(1-2): 358-364.
- [29] Yu G B, Liu Y, Yu S, *et al.* Inconsistency and comprehensiveness of risk assessments for heavy metals in urban surface sediments [J]. *Chemosphere*, 2011, **85**(6): 1080-1087.
- [30] 余辉, 张璐璐, 李焕利, 等. 太湖流域重金属湿沉降特征[J]. *环境科学研究*, 2011, **24**(12): 1331-1338.
- Yu H, Zhang L L, Li H L, *et al.* Wet deposition characteristics of heavy metals in Taihu lake watershed [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, **24**(12): 1331-1338.
- [31] Muller G. Index of geo accumulation in sediments of the Rhine River[J]. *GeoJournal*, 1969, **2**(3): 108-118.

CONTENTS

Dry and Bulk Nitrogen Deposition in Suburbs of Xining City	XU Wen, JIN Xin, LUO Shao-hui, <i>et al.</i> (1279)
Day-Night Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in PM ₁₀ During Spring and Summer of Lanzhou	MA Li, YU Ye, WANG Bo, <i>et al.</i> (1289)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions in Sanya, Hainan	WANG Lu, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1298)
Pollution Characteristics of NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ in PM _{2.5} and Their Precursor Gases During 2015 in an Urban Area of Beijing	DING Meng-meng, ZHOU Jian-nan, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1307)
Pollution Characteristics of PCDD/Fs in Ambient Air and Exposure Risk Assessment Around a Municipal Solid Waste Incinerator in Beijing	QI Li, REN Yue, LIU Ai-min, <i>et al.</i> (1317)
Community Characteristics of Cultivable Bacteria in Fine Particles (PM _{2.5}) of Beijing and Baoding	HU Ya-dong, MA An-zhou, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (1327)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Artery and Collector Roads in Nanjing Based on Real-time Traffic Data	LI Xiao-yu, WU Lin, ZOU Chao, <i>et al.</i> (1340)
Catalytic Combustion of Soot Particulates over Rare Earth Pyrochlore Oxides Doped with Transition Metals	LI Xi-feng, SUN Yu-qi, WANG Zhong-peng, <i>et al.</i> (1348)
Water Quality Analysis of Beijing Segment of South-to-North Water Diversion Middle Route Project	XU Hua-shan, ZHAO Lei, SUN Hao-su, <i>et al.</i> (1357)
Hanfeng Pre-reservoir Commissioning Time Variation Feature of the Hydrology and Water Quality in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (1366)
Modeling of Water Quality Response to Land-use Patterns in Taizi River Basin Based on Partial Least Squares	LI Lin-lin, ZHANG Yi-zhang, TANG Chang-yuan, <i>et al.</i> (1376)
Distribution Characteristics of Water Temperature and Water Quality of Fuxian Lake During Thermal Stratification Period in Summer	WANG Lin-jie, YU Hui, NIU Yong, <i>et al.</i> (1384)
Vertical Stratification Characteristics of Dissolved Oxygen and Phytoplankton in Thousand-Island Lake and Their Influencing Factors	YU Yan, LIU De-fu, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (1393)
Community Structure Characteristics of Eukaryotic Planktonic Algae in Liaoh River Through High-throughput Sequencing	WANG Jing-qi, WANG Shu-ping, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1403)
Effects of Coastal Organic Pollution on Bacterioplankton Community in Sanmen Bay	DAI Wen-fang, GUO Yong-hao, YU Wei-na, <i>et al.</i> (1414)
Nitrate Source Identification and Nitrification-denitrification at the Sediment-water Interface	JIN Zan-fang, GONG Jia-lin, SHI Yi-li, <i>et al.</i> (1423)
Residues of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Water and Sediments from Nansha Mangrove Wetland	DING Yang, HUANG Huan-fang, LI Hui, <i>et al.</i> (1431)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals from River Network Sediment in Western Area of Taihu Lake	BIAN Bo, ZHOU Yan, ZHANG Qin (1442)
Efficacy of Phoslock® on the Reduction of Sediment Phosphorus Release in West Lake, Hangzhou, China	ZHU Guang-wei, LI Jing, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (1451)
Identification and PAC Adsorption of Foulants Responsible for Irreversible Fouling During Ultrafiltration of Dongjiang River Water	YANG Hai-yan, WANG Can, YAN Zhong-sen, <i>et al.</i> (1460)
Efficiency and Kinetics of Triclosan Degradation in Aqueous Solution by UV/Sodium Persulfate	LI Qing-song, LI Xue-yan, YAO Ning-bo, <i>et al.</i> (1467)
Influencing Factors on the Degradation of PFOS Through VUV-SO ₃ ²⁻	HAN Hui-li, WANG Hong-jie, DONG Wen-yi (1477)
Simultaneous Photocatalytic Reduction of Cr(VI) and Oxidation of SSA by Carbon Nitride	LI Li-li, CHEN Cui-hai, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (1483)
Modification of Diatomite by Zirconium and Its Performance in Phosphate Removal from Water	FAN Yi, WANG Zhe, ZHAO Lian-qin, <i>et al.</i> (1490)
Reducing Effect of Three Disinfection Technologies for Sulfonamides Resistance Genes	ZHENG Ji, ZHOU Zhen-chao, CHEN Fang, <i>et al.</i> (1497)
Removal of Estrogenic Effect by Typical Domestic Wastewater Treatment Processes	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1506)
Effect of SRT on Stability of Yeast-SBR in Treating Oil-containing Wastewater	LÜ Wen-zhou, ZHANG Shu-lin, QIAO Yu-xiang, <i>et al.</i> (1513)
Degradation of the Disperse Dye Neocron Black(NB) by Biological Treatment	YANG Bo, DING Feng-you, XU Hui, <i>et al.</i> (1520)
Function of Polyphosphate Kinase Gene in Biological Phosphate Removal During the Wastewater Treatment Process	NAN Ya-ping, ZHOU Guo-biao, YUAN Lin-jiang (1529)
Short-cut Nitrification Recovery and Its Transformation into CANON Process in a Biofilm Reactor	FU Kun-ming, ZHOU Hou-tian, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (1536)
Nitrogen Removal Characteristics and Diversity of Microbial Community in ANAMMOX Reactor	CAO Yan, WANG Tong-yu, QIN Yu-jie, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Environment Adjustment Layers on Nitrogen Transformation in Anaerobic Bioreactor Landfills	HE Zheng-kun, SONG Bo-yu, ZHU Nan-wen, <i>et al.</i> (1551)
Characteristics of Anaerobic Methane Removal Coupled to Fe(III) Reduction in Aged Refuse	WANG Li-li, HE Ting, LONG Yan, <i>et al.</i> (1558)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Tracing Sources by Pb & Sr Isotope in the Soil Profile of Woodland in Quanzhou	SUN Jing-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1566)
Accumulation and Migration Characteristics in Soil Profiles and Bioavailability of Heavy Metals from Livestock Manure	HE Meng-yuan, DONG Tong-xi, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (1576)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soils from Shandong	GE Wei, CHENG Qi-qi, CHAI Chao, <i>et al.</i> (1587)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Organophosphorus Pesticides in Typical Soil Environment of Jiangnan Plain	WANG Jian-wei, ZHANG Cai-xiang, PAN Zhen-zhen, <i>et al.</i> (1597)
Characteristics and Influencing Factors of Biologically-based Phosphorus Fractions in the Farmland Soil	CAI Guan, HU Ya-jun, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Straw Application on the Dynamics of Exogenous Nitrogen and Microbial Activity in Paddy Soil	CHEN Shan, DING Xian-qing, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (1613)
Effects of Biochar on Surface Albedo and Soil Respiration in Suburban Agricultural Soil	ZHANG Yang-yang, HU Xue-yu, ZOU Juan, <i>et al.</i> (1622)
N ₂ O Consumption Ability of Submerged Paddy Soil and the Regulatory Mechanism	WANG Ling, XING Xiao-yi, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (1633)
Non-CO ₂ Greenhouse Gas Release from Different Biological Wastewater Treatment Processes	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, LIU Wen-bo, <i>et al.</i> (1640)
Effect of Application of Sewage Sludge Composts on Greenhouse Gas Emissions in Soil	YANG Yu-han, YI Jian-ting, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1647)
Effect of Nano Zeolites on pH, CEC in Soil and Cd Fractions in Plant and Soil at Different Cadmium Levels	CHI Sun-lin, XU Wei-hong, XIONG Shi-juan, <i>et al.</i> (1654)
Dynamic Differences of Uptake and Translocation of Exogenous Selenium by Different Crops and Its Mechanism	PENG Qin, LI Zhe, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (1667)
Alleviation Effects of Exogenous Melatonin on Ni Toxicity in Rice Seedlings	LIU Shi-xiang, HUANG Yi-zong, LUO Ze-jiao, <i>et al.</i> (1675)
Forms Distribution and Ecotoxicity of Three Forms of Sulfonamides in Root-Soil Interface of Maize	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Wan-feng, <i>et al.</i> (1683)
Effect of Sediments on Bioaccumulation of Mercury in Fish Body in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	SUN Song, LI Chu-xian, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1689)
Bioaccumulation and Correlation of Heavy Metals in Human Hairs From Urban and Rural Areas of Chongqing	HE Ming-jing, LI Qi, WANG Deng-xiang, <i>et al.</i> (1697)
Microbial Community Structure and Diversity in Cellar Water by 16S rRNA High-throughput Sequencing	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (1704)
Performance Improvement of Microbial Fuel Cell with Polyaniline Doped Graphene Anode	HUANG Li-hua, LI Xiu-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i> (1717)
Brief Introduction of Pollution Sites Remediation and Risk Assessment and Its Policy Making in United States	RONG Yue (1726)