

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.11

第40卷 第11期

目次

2018年中国长江三角洲地区气溶胶的垂直分布特征	沈吉, 曹念文(4743)
2018年石家庄市秋冬季典型霾污染特征	宿文康, 鲍晓磊, 倪爽英, 赵卫凤(4755)
武汉市PM _{2.5} 化学组分时空分布及聚类分析	张会涛, 田瑛泽, 刘保双, 杨佳美, 郁佳, 官攀, 吴建会, 张裕芬(4764)
郑州市某生活区大气PM _{2.5} 中重金属污染特征及生态、健康风险评估	何瑞东, 张轶舜, 陈永阳, 靳孟洁, 韩士杰, 赵金帅, 张瑞芹, 燕启社(4774)
厦门市降水中金属元素含量分布特征及来源解析	王珊珊, 程奕枫, 颜金培, 胡恭任(4783)
2015~2017年上海郊区大气新粒子生成特征	霍俊涛, 王新宁, 段玉森, 伏晴艳, 陈冰怡(4791)
太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析	闫世明, 王雁, 郭伟, 李莹, 张逢生(4801)
东北区域空气质量时空分布特征及重度污染成因分析	陈卫卫, 刘阳, 吴雪伟, 鲍秋阳, 高枳亭, 张学磊, 赵红梅, 张世春, 修艾军, 程天海(4810)
艾比湖流域气溶胶光学厚度时空演变及影响因素	陈香月, 丁建丽, 王敬哲, 葛翔宇, 梁静(4824)
中国住宅室内BTEX浓度水平及其影响因素	侯贝贝, 尹奕卉, 裴晶晶, 刘俊杰(4833)
石家庄地区芳香族化合物的污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 刘永桥, 杨玉磊, 赵清, 陈曦, 徐静(4841)
郑州市碳素行业无组织VOCs排放特征分析及健康风险评估	张轶舜, 王佳, 韩士杰, 何瑞东, 陈永阳, 靳孟洁, 赵庆炎, 张瑞芹, 燕启社(4847)
典型化工行业有害VOCs排放清单及长三角地区应用	鲁君, 黄奕玮, 黄成(4856)
2013~2017年江苏省人为源氨排放清单的建立及特征	侯新红, 于兴娜, 沈丽, 赵睿东, 王国祯, 张毓秀(4862)
焦化厂建构筑物和生产设施表面PAHs的赋存特征及健康风险	赵一澍, 廖晓勇, 李尤, 罗俊鹏, 龚雪刚, 侯艺璇(4870)
中国南海流沙湾中雄激素、糖皮质激素和孕激素的污染特征及其生态风险评价	杨雷, 张晋娜, 徐敏, 彭涛, 史文俊, 石义静, 应光国(4879)
岩溶流域洪水过程水化学动态变化及影响因素	原雅琼, 孙平安, 苏钊, 于爽, 钟丽华, 何师意, 徐茜(4889)
长江水体常量和微量元素的来源、分布与向海输送	吴文涛, 冉祥滨, 李景喜, 王昊, 李梦露, 刘军, 臧家业(4900)
望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价	徐晨, 王沛芳, 陈娟, 袁秋生, 胡斌(4914)
不同雨强对太湖河网河道入湖营养盐负荷影响	陈洁, 朱广伟, 许海, 詹旭, 朱梦圆, 宣文怡, 黄亚文(4924)
合肥市十八联圩湿地表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价	陈娜, 许凡, 谢三桃, 郭天星, 彭久赞, 雷琦, 张玮, 王丽卿(4932)
三峡库区不同河段支流丰水期叶绿素a和营养盐的空间分布特征	杨凡, 杨正健, 纪道斌, 苏青青, 龙良红, 刘心愿, 王耀耀, 赵冲(4944)
丹江口水库氮磷内源释放对比	王志齐, 刘新星, 姚志宏, 姚伦广, 常跃, 刘卓初, 曹连海(4953)
不同沉水植物净水能力与植株体细菌群落组成相关性	李琳, 岳春雷, 张华, 李贺鹏, 杨乐, 王琚(4962)
纳米氧化锌粒径对人工湿地性能及微生物群落的影响	王森, 任伶, 刘琳琳, 李颖, 张振, 孔范龙(4971)
水生植物生物炭去除水体中氮磷性能	刘舒蕾, 彭慧君, 杨佳怡, 肖琳(4980)
MgO改性莲蓬壳生物炭的制备及其磷吸附特性	王盛华, 朱丹晨, 邵敬爱, 向家涛, 杨海平, 易娟, 张世红, 陈汉平(4987)
微塑料对短流程膜工艺中膜污染的影响	王博东, 薛文静, 吕永涛, 苗瑞, 马百文(4996)
基于铁锰泥的除硝颗粒吸附剂制备及其比较	曾辉平, 于亚萍, 吕赛赛, 李冬, 张杰(5002)
氯氧铁非均相催化过氧化氢降解罗丹明B	张少朋, 陈瑞, 白淑琴, 刘锐平(5009)
天津市规模化奶牛养殖场废水中典型抗生素处理效果及生态风险评估	陈乾, 赵润, 牟美睿, 白鸽, 史宏伟, 刘海学, 吴惠惠(5015)
废水处理系统中抗生素抗性基因分布特征	姚鹏城, 陈嘉瑜, 张永明, 温东辉, 陈吕军(5024)
全程自养脱氮耦合反硝化除磷的启动及稳定运行	印雯, 陈亚, 张钰, 徐乐中, 吴鹏, 刘文如(5032)
FeCl ₃ -生化耦合技术调控未知诱因的污泥膨胀	魏东洋, 肖才林, 周雯, 李睿华, 曹茜(5040)
污泥龄对除磷亚硝化颗粒系统的影响	李冬, 刘博, 王文琪, 曹美忠, 李帅, 张杰(5048)
厌氧氨氧化耦合反硝化工艺的启动及微生物群落变化特征	宋壮壮, 吕爽, 刘哲, 时兴东, 潘傲, 张智(5057)
基质暴露水平对ANAMMOX微生物活性及生物量的影响	陈方敏, 高佳琦, 黄勇, 胡羽婷, 李祥, 顾澄伟, 谈新伟, 殷记强, 方文辉, 倪敏(5066)
太浦河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析	李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 朱永青, 彭月, 王凯, 李士俊(5073)
土壤重金属污染风险筛选值划分方法:以Cd为例	王锐, 张风雷, 徐姝姝, 张永文(5082)
半壁山金矿矿业活动区砷赋存的矿物特征及其对农田土壤砷累积的影响	温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 李鸣凤(5090)
土壤调理剂对镉污染稻田修复效果	周利军, 武琳, 林小兵, 王惠明, 刘晖, 张鸿燕, 胡敏, 石利萍, 张云, 黄欠如(5098)
改性蒙脱土对稻田土壤甲基汞的阻控修复	韩怡新, 何天容, 王祖波(5107)
铈锰改性生物炭对土壤As的固定效应	梁婷, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧(5114)
温和预氧化提高后续生物修复石油污染土壤	徐金兰, 王慧芳, 王荣, 章秋菊, 王杰(5124)
重金属污染农田生菜根际重金属固定细菌群落组成及其阻控效应	王铁军, 苏楠楠, 雷鹏, 邱明洋, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉(5133)
双氰胺和3,4-二甲吡唑磷酸盐对蔬菜种植土壤氨氧化细菌和古菌的影响	郭俊丽, 刘毅, 魏文学, 葛体达, 王光军(5142)
不同再生水灌溉方式对土壤-辣椒系统中细菌群落多样性及病原菌丰度的影响	崔丙健, 高峰, 胡超, 李中阳, 樊向阳, 崔二革(5151)
黄土高原地区两种土地利用方式CO ₂ 和N ₂ O排放特征	韩佳乐, 郝珊, 刘振杰, 张曼, 张阿凤(5164)
生物炭对华北平原4种典型土壤N ₂ O排放的影响	张秀玲, 孙贇, 张水清, 岳克, 曹红亮, 林杉(5173)
优化施肥模式对我国热带地区水稻-豇豆轮作系统N ₂ O和CH ₄ 排放的影响	胡玉麟, 汤水荣, 陶凯, 何秋香, 田伟, 秦兴华, 伍延正, 孟磊(5182)
《环境科学》征订启事(4995)	
《环境科学》征稿简则(5039)	
信息(4782, 4979, 5056)	

望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价

徐晨^{1,2}, 王沛芳^{1,2*}, 陈娟^{1,2}, 袁秋生^{1,2}, 胡斌^{1,2}

(1. 河海大学环境学院, 南京 210098; 2. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 南京 210098)

摘要: 为探明望虞河西岸河网区的重金属污染特征及生态风险, 于2018年3月调查了望虞河西岸5条河流的水体及表层沉积物中重金属(Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb和Hg)的含量及形态分布, 利用多元统计分析方法研究了重金属元素的污染来源并对其进行污染水平给予评价。结果表明, 河网区水体重金属污染较轻, 除Hg外其余金属质量浓度均低于《地表水环境质量标准》的Ⅰ类标准。而表层沉积物中重金属含量较高, 除Hg外其余均高于江苏省土壤环境背景值。重金属在水体-沉积物中的分配系数显示Cd、As和Hg具有较强的二次释放潜力。地累积指数法(I_{geo})显示沉积物中Cu、Zn和Cd的污染程度较高, 局部属于偏重度污染; 潜在生态危害指数法(RI)显示Cd为研究区域主要的生态风险因子; 而考虑重金属赋存形态的潜在生态风险评价(RRSP)表明, Ni、Zn和As主要以残渣态形式存在, 生态风险较低, 而Cd多为酸溶态, 具有极高的潜在危害。多种评价结果表明, 应格外重视重金属Cd的污染治理。而重金属来源分析显示望虞河西岸的重金属污染主要源于周围机械制造和金属冶炼类工厂的人为输入, 这为望虞河西岸河网的重金属污染控制提供依据。

关键词: 望虞河; 重金属; 污染评估; 形态分析; 分配系数

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)11-4914-10 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201903082

Contaminant Characteristics and Ecological Risk Assessments of Heavy Metals from River Networks in the Western Area of the Wangyu River

XU Chen^{1,2}, WANG Pei-fang^{1,2*}, CHEN Juan^{1,2}, YUAN Qiu-sheng^{1,2}, HU Bin^{1,2}

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To study the pollution characteristics and ecological risks of heavy metals in the western area of the Wangyu River, water and surface sediment samples of five rivers were investigated. The concentration and chemical fractions of eight heavy metals (Ni, Cu, Cr, Zn, As, Cd, Pb, and Hg) were analyzed, the pollution sources of heavy metals were studied using multivariate statistical analysis, and various ecological risk assessments were applied to identify the level of heavy metal contaminants. The results showed that the concentration of heavy metals in water was low, except for Hg, which was lower than the Class I standard of Surface Water Environmental Quality Standard. The content of heavy metals in surface sediments was high, except for Hg, which was significantly higher than the environmental background values. The partition coefficient of heavy metals in water-sediments showed that Cd, As, and Hg had strong re-emission potential. The I_{geo} indicated that Cu, Zn, and Cd were in a high pollution state as a whole. The RI showed that Cd was the main ecological risk factor in the study area. The RRSP indicated that the degree of pollution by Ni, Zn, and As was low because of its high residual fraction ratio, which was difficult to release under natural conditions. However, the degree of pollution by Cd was high because it had the highest content of weak acid extractable fraction among all the heavy metals. Therefore, it is necessary to pay more attention to Cd contamination. The source analysis of heavy metals showed that the western area of the Wangyu River was mainly affected by the pollution emissions from the surrounding machinery factories.

Key words: Wangyu River; heavy metals; risk assessments; chemical fraction analysis; partition coefficient

由于工业、采矿和农业生产等活动造成的重金属污染十分严重, 在制约经济发展的同时也危及人类的生命安全。环境中排放的重金属通过多种方式进入水体后迅速被水中悬浮物和底部沉积物所吸附, 最终储存在水体沉积物中^[1]。而在人类活动、生物扰动或水环境化学条件变化等因素影响下, 沉积物中的重金属又会被释放到水体中^[2]。水体沉积物既是重金属的储备库, 又是重金属的二次污染源。因此, 关于河湖系统水体和沉积物中重金属的污染行为及环境风险评价已成为研究热点^[3,4]。

望虞河西岸地区属于典型的平原河网区, 区域内河港纵横, 沟塘密布^[5]。该区域人口密度高, 重

污染行业比重大, 大量生活污水和工业废水未达标处理便排放水中并由支流汇入望虞河, 致使水质恶化, 水体污染严重^[6]。而望虞河是“引江济太”的唯一通道^[7], 西岸河网水质对望虞河入太湖水体产生直接影响。因此, 对于望虞河西岸的环境治理迫在眉睫。而河网区的污染状况调查是区域治理的首要任务。先前的文章大多关注该区域河流中氮、磷等

收稿日期: 2019-03-09; 修订日期: 2019-06-26

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07204003); 国家自然科学基金项目(51579073); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(51421006)

作者简介: 徐晨(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水资源生态修复, E-mail: 13856523475@163.com

* 通信作者, E-mail: pfwang2005@hhu.edu.cn

污染情况^[8,9], 而重金属作为典型的累积性污染物, 其显著的生物毒性和持久性, 对生态环境构成严重威胁^[10,11]. 并且, 由于望虞河西岸水利工程建设频繁^[12,13], 水位变动较大, 水流流向不定, 易导致底泥中的重金属重新释放进入水体^[14], 造成二次污染. 因此, 针对望虞河西岸河网复杂, 污染负荷高及多重水利工程影响下的重金属分布规律及污染评价的研究十分必要.

本文选取了望虞河西岸典型主干河道(伯渎港)及其四条支流(张塘河、古市桥港、徐塘桥河、北宅河-沈渎港)的水体和表层沉积物样品, 通过测定其中 8 种痕量重金属(Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 和 Hg)的含量, 揭示重金属在水体-底泥中的分配规律. 采用 BCR 逐级提取法确定重金属的赋存形态, 同时采用多种评价方法相结合的方式, 确定重金属污染程度及风险等级. 并且, 通过 PCA 主成分分析对重金属来源进行探究, 以期为该区域的重金属污染治理提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域主要位于江苏省无锡市锡山区、滨湖区(图 1). 锡山区拥有一个国家级经济技术开发区, 工业发达, 工厂密集. 而滨湖区由部分乡镇合并而成, 耕地较多, 农业发达. 因此研究区内人口众多, 生活区和工业区、农业区密集分布, 污染物排放强度大. 涉及重金属的工业行业主要有黑色金属冶炼及压延、机械制造、印刷包装和电子产业等.

1.2 样品采集与分析

于 2018 年 3 月采集望虞河西岸典型河道伯渎港(BD)、张塘河(ZT)、古市桥港(GS)、徐塘桥河(XT)及北宅河-沈渎港(BS)共 28 个监测断面的水体和表层沉积物样品(XT1 未采到沉积物样). 所有采样点均使用全球卫星定位系统进行定位采集. 采集表层水样经 0.45 μm 微滤膜过滤后装聚乙烯瓶 4℃ 冷藏保存, 用于测定水体重金属含量. 利用彼得逊抓斗式采样器采集 1~5 cm 底泥装入聚乙烯塑料罐中. 经冷冻干燥, 研磨过筛后测定沉积物重金属含量. As 为类金属, 为了便于叙述, 将 As 归类为重金属一并讨论.

取水样 2 mL 加入微波消解仪(BERGHOF, MWS-3, 德国)中, 然后依次加入 6 mL HNO_3 和 1 mL H_2O_2 , 静置后进行消解. 消解完成后, 消解溶液被缓慢倒入聚四氟乙烯坩埚中, 再加入 0.5 mL HClO_4 , 在 200℃ 的电热炉上蒸至近干, 最后加入事

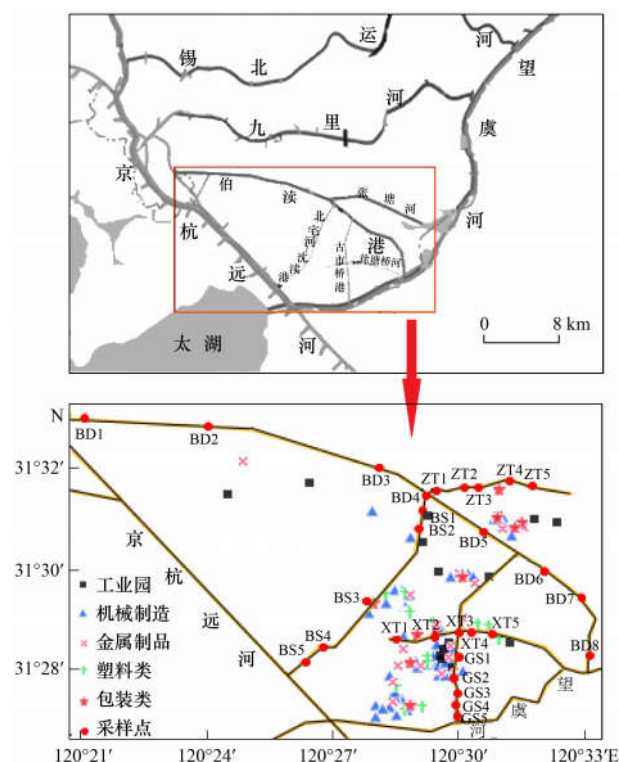


图 1 研究区域工业分布与采样点分布示意

Fig. 1 Industrial distribution of study areas and sampling locations

先配制好的 1 mL HNO_3 (1:1) 来溶解残渣, 在试管中加入超纯水定容至 25 mL, 4℃ 保存备测. 称取 0.2 g 底泥样于聚四氟乙烯消解罐中, 加入 6 mL HNO_3 , 静置 0.5 h 后依次加入 4 mL HF 和 1 mL H_2O_2 进行消解. 消解完成后步骤与水样预处理相同. Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 和 Hg 这 8 种重金属采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS, Agilent 7500a, 美国)测定.

采用改进的 BCR 分级提取方法对金属赋存形态进行研究^[15,16]. BCR 法将重金属赋存形态分为 4 类, 分别为酸溶态(F1)、可还原态(F2)、可氧化态(F3)及残渣态(F4). 其中前 3 种形态统称为可提取态, 为可被生物所利用的形态^[17]. 具体步骤如下:

F1: 先取 0.5 g 过 100 目筛的沉积物样品, 置于 50 mL 聚乙烯离心管中, 加入 20 mL 0.11 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 CH_3COOH 溶液, 在 22℃ 和 220 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下振荡 16 h 后, 在 3 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$, 20℃ 下离心 20 min. 取上清液于 50 mL 比色管中定容, 4℃ 保存待测. 离心后残余物用少量超纯水清洗后弃去上清液, 剩余残渣供第 2 步提取.

F2: 向上述提取残余物中加入 20 mL 0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$, 用 2 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HNO_3 调节 pH 值至 1.5. 混合物振荡、离心、移液和洗涤同上, 残渣供下一步提取.

F3:向 F2 提取残余物中加入 5 mL 9.8 mol·L⁻¹ H₂O₂, 室温消化 1 h(间歇用手振荡), 然后在 85℃ 下水浴蒸发至近干. 冷却后再次加入 25 mL 的 CH₃COONH₄(1 mol·L⁻¹), 同样条件下振荡、分离、离心和移液, 剩余残渣留作残渣态提取.

F4:残渣态测定方法参考总量的消解方法. ICP-MS 测定提取后上清液中 8 种重金属含量.

所有样品分析均做 3 次平行, 实验结果以 3 次分析的平均值表示(3 次分析结果的误差 < 5%). 采用水系沉积物标准参照样品(GBW-07309)作为质量控制样品, 对沉积物样品前处理和形态测定过程进行质量控制. 结果显示, 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(表 1).

表 1 沉积物标准样品(GBW-07309)回收率实验结果

Table 1 Results of the recovery test for standard samples(GBW-07309)				
元素	测定值 /mg·kg ⁻¹	标准值 /mg·kg ⁻¹	误差范围 /%	回收率 /%
Cr	80.25	85 ± 10	1.21	94.41
Ni	34.54	32 ± 4	5.93	107.94
Cu	30.39	32 ± 3	3.43	94.97
Zn	74.67	78 ± 5	4.58	95.73
As	8.30	8.4 ± 1.4	6.20	98.81
Cd	0.26	0.26 ± 0.05	0.93	100.00
Pb	25.02	23 ± 4	2.45	108.78
Hg	73.90	83 ± 14	4.17	89.04

1.3 重金属分配系数

水体沉积物作为水体重金属的“汇”和“源”, 当外界条件发生变化时, 重金属在沉积物和水相间不断进行迁移转化, 对水生生态系统构成威胁^[18]. 采用重金属的分配系数对数值(lgK_p)来评价重金属在水相和沉积物界面的迁移能力^[19]. 计算公式为:

$$K_p = C_s/C_w$$
 (1)

式中, K_p 为平衡分配系数; C_s 为体系达到平衡时

沉积物中的重金属含量(mg·kg⁻¹); C_w 为体系达到平衡时溶解态重金属的质量浓度(mg·L⁻¹).

1.4 沉积物重金属生态风险评价

1.4.1 地累积指数法(I_{geo})

$$I_{geo} = \log_2[C_n/(K \times B_n)]$$
 (2)

此评价方法是 Muller 提出的一种被广泛使用的研究沉积物重金属污染的评价方法^[20]. K 取 1.5; B_n 为沉积物中重金属元素 n 的地球化学背景值(mg·kg⁻¹), 本文中选取江苏省土壤环境背景值^[21], 具体分别为(mg·kg⁻¹): Cr(77.8)、Ni(26.7)、Cu(22.3)、Zn(62.6)、As(10)、Cd(0.126)、Pb(26.2)和 Hg(0.289). C_n 为重金属 n 在沉积物中的实际含量(mg·kg⁻¹). 污染程度分级见表 2.

1.4.2 潜在生态危害指数法(RI)

潜在生态危害指数法反映了重金属对生态环境影响潜力^[22,23]. 计算公式如下:

$$C_i^i = C^i/C_n^i$$
 (3)

式中, C_iⁱ 为某一重金属的污染系数; Cⁱ 为沉积物中重金属 i 实测含量(mg·kg⁻¹); C_nⁱ 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:

$$E_r^i = T_r^i \times C_i^i$$
 (4)

式中, T_rⁱ 表示重金属 i 的毒性响应系数, 分别为: Hg = 40、Cd = 30、As = 10、Pb = Cu = Ni = 5、Zn = 1、Cr = 2, 总风险参见公式:

$$RI = \sum E_r^i = \sum T_r^i \times C_i^i = \sum T_r^i \times \frac{C^i}{C_n^i}$$
 (5)

式中, E_rⁱ 值的第一级上限设定为未受到污染时的污染系数(C_iⁱ = 1)与参评污染物的最大毒性系数的乘积, 下一级的风险值上限由上一级乘 2 得到. 而 RI 的大小与参评污染物的种类和数量有关, 污染物的毒性越强, 数目越多, RI 值就越大^[24]. 具体分级见表 2 所示.

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 metal contamination in sediment			
方法名称	地累积指数 I _{geo}	潜在生态危害指数法(RI)	考虑赋存形态的潜在生态风险评价(RRSP)
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	利用重金属赋存形态的评价方法
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	(-∞, 110], 低风险 (110, 220], 中风险 (220, 440], 高风险 (440, +∞], 很高风险	(-∞, 40], 无风险 (40, 80], 轻度风险 (80, 160], 中度风险 (160, +∞], 重度风险

1.4.3 考虑重金属赋存形态的潜在生态风险评价(RRSP)

Hakanson 的潜在生态危害指数法创造性地提

出了重金属的毒性系数, 强调其对水生生态系统的危害. 但这种方法仍是通过底泥中重金属的总量来进行污染分级的, 而河流沉积物中重金属的毒性、迁

移转化及其潜在环境危害更大程度上取决于其赋存形态. 即使未受人为污染的沉积物中, 重金属的可提取态所占质量分数较高, 意味着金属活性较强, 更容易从沉积物中释放进入水体, 对水生环境和人体的潜在污染也更严重. 基于此, 本文提出考虑重金属赋存形态的潜在生态风险评价 (RRSP), 将潜在生态危害指数法与次生相和原生相比值法相结合, 侧重于考虑沉积物中重金属二次释放的能力, 以此来评价重金属的潜在风险. 计算公式如下:

$$RRSP = E_r^i \times M_{rsp}^i = E_r^i \times \frac{M_{sec}^i}{M_{prim}^i} \quad (6)$$

式中, 次生相以 BCR 提取法中前三步提取的总量计算, 即 $M_{sec} = F1 + F2 + F3$, 原生相 $M_{prim} = F4$. 由于 $E_r^i < 40$ 时为轻微风险, $40 < E_r^i < 80$ 为中等风险, $80 < E_r^i < 160$ 为强风险; 而 $M_{rsp}^i < 1$ 时为无污染, $1 < M_{rsp}^i < 2$ 时为轻度污染, $2 < M_{rsp}^i < 3$ 为中度污染, 因此将两者乘积作为 RRSP 的分级标准. 具体污染等级见表 2.

2 结果与讨论

2.1 河网区水体重金属浓度空间变化

望虞河西岸河网水体中重金属质量浓度如表 3 所示. 可以看出, 望虞河西岸 5 条流水体中重金属质量浓度很低, 8 种重金属的浓度除 Hg 外均低于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002^[25]) 的 I 类标准, 水质较好. 而美国优先污染物国家推荐水质基准持续浓度 (USEPA1999, CCC)^[26] 旨在保护

水生生物. 望虞河西岸水体中重金属的平均值均低于 CCC, 说明水中的重金属对水生生物的毒性效应不显著. 重金属 Ni、Cu、As、Cd、Pb 和 Hg 的最大值均出现在伯渎港, 而重金属 Cr 和 Zn 质量浓度最大值出现在北宅河-沈渎港段. 伯渎港作为大型主干河道, 承接众多支流的汇水, 同时也将承接更多的污染物流入^[6]. 同时伯渎港河道较宽, 流速较大, 易引起底泥沉积物再悬浮^[27], 因此水体重金属质量浓度较高. 而北宅河-沈渎港段属于工业区 (图 1), 周边区域电镀、有色金属工业废水的排放可能导致水体重金属浓度升高.

2.2 河网区表层沉积物重金属含量空间变化

望虞河西岸河网区表层沉积物中重金属含量范围为 $0.18 \sim 256 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 2). 与水体重金属质量浓度相比, 河流中超过 98% 的重金属均富集在底泥中, 这与秦延文等^[28] 和杨陈等^[29] 的观点一致. 五条河流中, Cu 和 Zn 含量显著高于江苏省土壤环境背景值 (红线), 其中 Cu 最大值是背景值的 19 倍, Zn 最大值是背景值的 20 倍. 重金属 Cr、Ni、As、Cd 和 Pb 的含量也多高于环境背景值, 表明该地区存在一定程度的人为污染. 并且, 除 Pb 外其余 7 种金属的最大值均出现在徐塘桥河段, 使之成为沉积物中重金属总量最大的河流, 这与重金属在水体中的分布不同. 原因是徐塘桥河临近工业园区, 各类工业废水的排入导致重金属含量升高. 同时徐塘桥河为小型河道, 水流迟缓, 特别在实施西控工程^[30] 后河流水量锐减, 甚至出现断流, 水体中泥沙沉积

表 3 望虞河西岸河段水体重金属质量浓度均值/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 3 Average content of heavy metals in water on the western area of the Wangyu River/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
伯渎港	0.55	1.51	0.11	2.04	1.19	0.020	0.05	0.63
张塘河	0.11	0.98	0.10	0.54	0.96	0.007	0.03	0.11
古市桥港	0.09	0.47	0.09	0.24	0.89	0.004	0.02	0.11
北宅河-沈渎港	2.49	2.19	0.11	7.29	1.14	0.007	0.04	0.64
徐塘桥河	0.21	0.68	0.10	0.61	1.02	0.003	0.03	0.25
GB 3838-2002 的 I 类标准	10	0.02	10	50	50	1	10	0.05
CCC	74	52	9	120	150	0.25	2.5	0.77

更易使得重金属聚集沉降.

2.3 河网区表层沉积物重金属形态分析

为了更全面准确地评价望虞河西岸河网的污染情况, 本文采用 BCR 法对伯渎港、张塘河和徐塘桥河各采样点的底泥重金属进行逐级提取, 各形态所占质量分数分布情况如图 3 所示.

可以看出, 河流沉积物中 Ni、Zn 和 As 主要以残渣态形式存在. 残渣态是指赋存于原生矿和次生矿的矿物晶格中的重金属形态, 自然条件下不易释放, 对动植物的毒性较小. 而其余金属主要以可提

取态形式存在, 具有较强的生物有效性. 其中, 重金属 Cd 的酸溶态所占质量分数高于其它元素, 这与 Cheng 等^[31] 和朱程等^[32] 的研究结果一致. 由于酸溶态能够吸附在黏土和腐殖质中, 可直接被生物利用, 并且在中性或弱酸条件下都可释放出来, 因此 Cd 具有很强的迁移性和环境危害. 而重金属 Pb、Hg 多为可氧化态. 可氧化态又称有机物及硫化物结合态, 是指以重金属离子为中心离子, 有机质活性基团为配位体的结合形式或是硫离子与重金属生成难溶于水的物质^[15]. Hg 通过生物作用能转

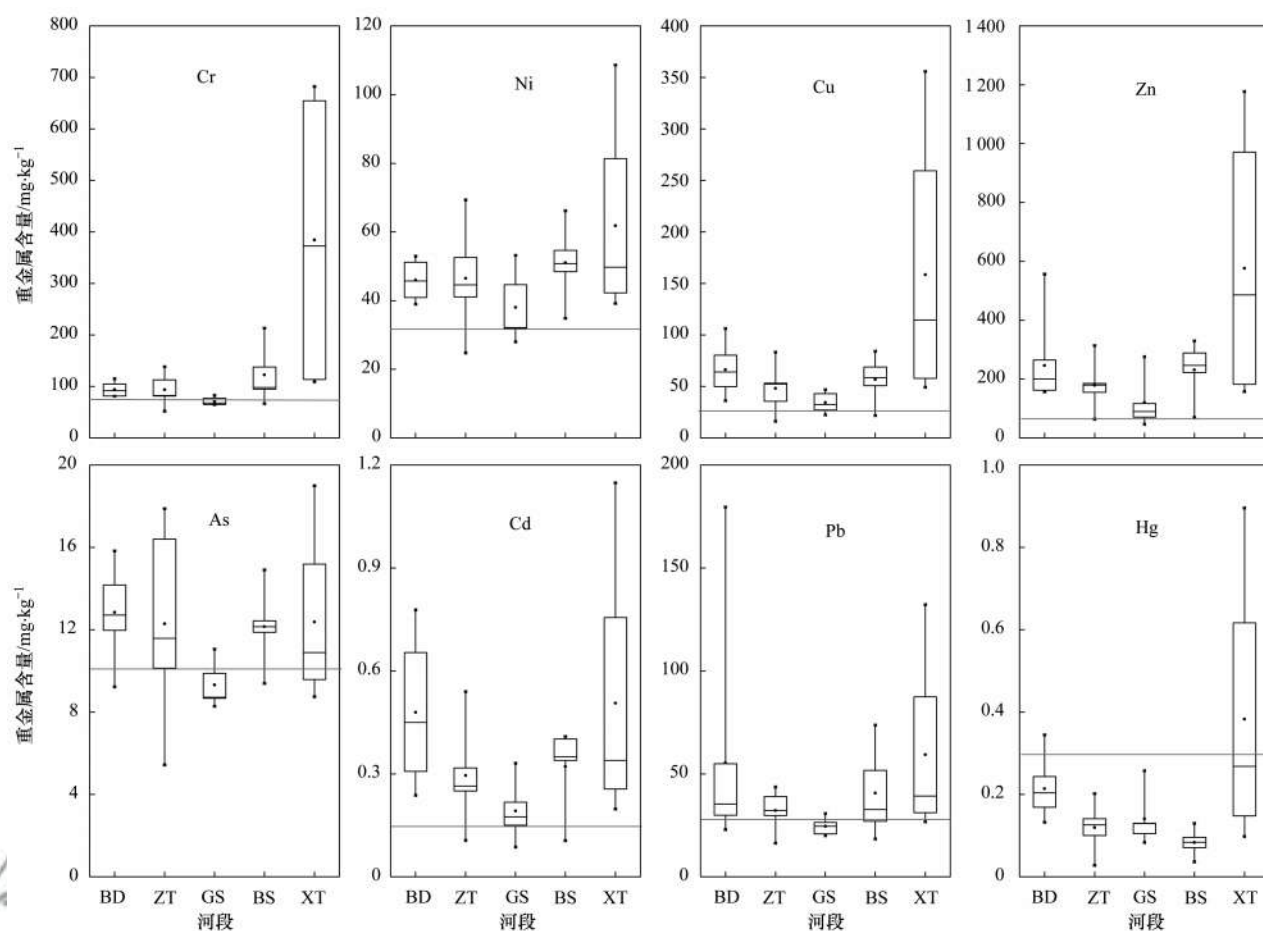


图2 望虞河西岸各河段表层沉积物重金属分布

Fig. 2 Distribution of heavy metals in surface sediments in the western area of the Wangyu River

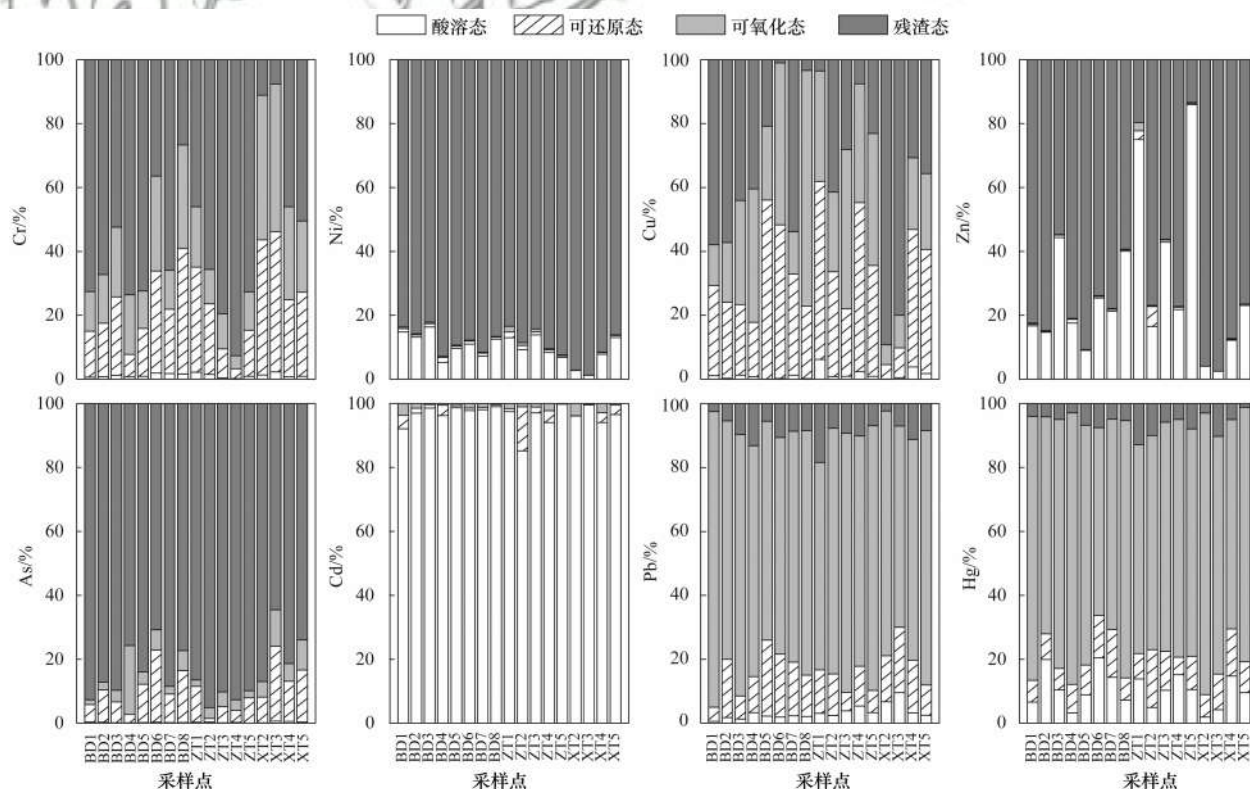


图3 西岸河网表层沉积物重金属形态分布

Fig. 3 Chemical fraction analysis of heavy metals in the western area of the Wangyu River

化为甲基汞, 微生物也能将二价 Hg 还原为零价 Hg, 而这些作用主要发生于可氧化态, 因此 Hg 的可氧化态含量较高. 在强氧化条件下, 部分以可氧化态存在的 Pb、Hg 能够通过微生物的作用发生矿化分解, 进而释放进入上覆水或被水生生物吸收. 而重金属 Cr 和 Cu 的可还原态与可氧化态比例相近. 可还原态又称 Fe/Mn 氧化物结合态, 金属通过吸附作用或共沉淀作用而积累. 当环境变化时, 如氧化还原电位降低或水体缺氧时, 部分以 Fe/Mn 氧化物形式存在的 Cr 和 Cu 会被还原, 重金属释放, 从而造成水体污染.

2.4 重金属在沉积物和水体中的分配系数

分配系数 K_p 是当吸附达到平衡时元素在固相与液相中的浓度比值, 能反映重金属在天然物理化学条件下的实际迁移能力^[33]. 分配系数值越低, 重金属从沉积物中释放到水体中的趋势越明显^[34]. 8 种重金属在沉积物-水体的分配规律如图 4 所示, 表现为 $Pb > Cu > Cr > Zn > Ni > Cd > As > Hg$. 可以看出, Pb、Cr、Ni 和 Zn 的分配系数较高, 显示不易从沉积物中释放进入水体. 这可能与重金属的形态特征存在一定关系, 由于 Cr、Ni 和 Zn 的赋存形态多为残渣态, 具有极高的稳定性, 对沉积物重金属的迁移贡献不大. 而 Cd、As 和 Hg 的分配系数对数值分别为 4.68、4.04 和 2.76, 在 8 种重金属的分配系数对数值中相对较低, 具有较强的二次释放潜力. 这与杨超等^[35]和庄云龙等^[36]的研究结果类似, 其原因可能与其在沉积物中的吸附方式以及本身较强的化学活性有关. 而重金属的分配系数还与沉积物自身的性质 (如表面积、粒径分布) 以及固相-液相的界面环境 (如温度、pH 和氧化还原电位) 有关^[37]. 有研究表明, 沉积物中总有机碳含量和水质 pH 值对分配系数影响较大. 由于沉积物中有机碳易与重金属离子形成络合物, 因此总有机碳含量较高的沉积物中重金属分配系数较高, 不易迁移^[38]; 而重金属的生物可利用态在酸性条件下较易溶出, 因此 pH 值越高则重金属分配系数越高^[39]. 这也许可以解释重金属 Pb 和 Hg 的赋存形态均为可氧化态但分配系数却截然不同的现象.

2.5 河网区沉积物重金属生态风险评价

2.5.1 地累积指数法 (I_{geo})

由图 5 不同样点重金属地累积指数可以看出, 研究区沉积物中 As、Pb 和 Hg 的 I_{geo} 值均小于 0 或接近 0, 属于未污染状态. 其次为 Cr 和 Ni, 在研究区 92% 的样点为无污染或轻污染, 其余为偏中度或中度污染. 而 Cu、Zn 和 Cd 的地累积指数较高, 多数点位为偏中度到中度, 局部属于偏重度污染. 尤

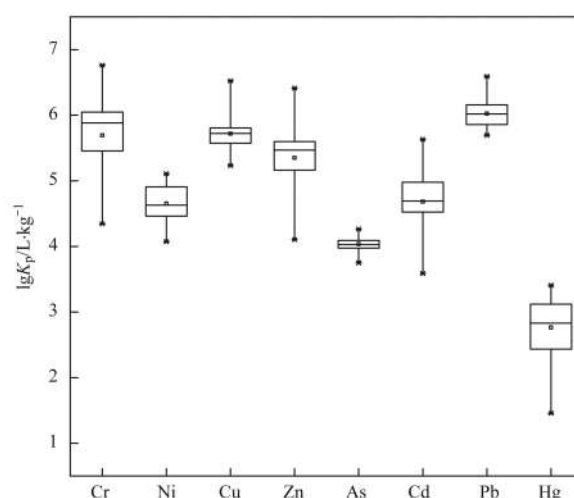


图 4 望虞河西岸河网重金属分配系数

Fig. 4 Partition coefficient of heavy metals in the western area of the Wangyu River

其是重金属 Cd 的赋存形态多为酸溶态, 具有极高的生物可利用性和迁移性, 对水生环境的危害更加严重. 在研究区的五条河流中, 古市桥河河段基本属于无污染状态, 张塘河和北宅河-沈浜港段为无污染到轻度, 伯渎港段为无污染到中度. 而徐塘桥河段重金属污染程度最高, 为轻度到偏重度污染. 同时在 XT2 处沉积物中 Cr、Ni、Cu、Zn、As 和 Cd 这 6 种重金属的 I_{geo} 均达到最大值, 表明该处受到的人为污染程度最高.

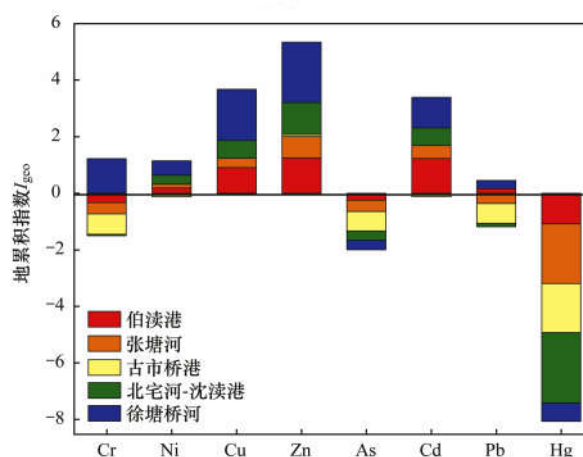


图 5 研究区河流沉积物重金属分布

Fig. 5 Distribution of heavy metals in river sediment

2.5.2 潜在生态危害指数法 (RI)

采用 Hankanson 的潜在生态危害指数法对研究区内河流进行生态风险评价, 8 种重金属 E_i^i 计算值从大到小顺序为: $Cd > Hg > Cu > As > Ni > Pb > Zn > Cr$. 由图 6 可以看出, Cd 为研究区域主要的生态风险因子, 83% 的样点受到中等及以上的生态危害, 这与地累积指数的结果类似, 因此在底泥污染防治时应格外重视重金属 Cd 的污染治理. 而重金属 Hg

含量虽然没有超过背景值,但其对于水生生物具有极高的毒性,使其成为望虞河西岸河网沉积物中仅次于 Cd 的主要生态风险贡献因子. 综合潜在生态风险指数显示古市桥港潜在生态风险低 ($RI < 110$); 伯渎港、张塘河和北宅河-沈渎港河段具有中度潜在生态风险; 而徐塘桥河段具有高潜在生态风险,这与地累积指数评价结果基本一致.

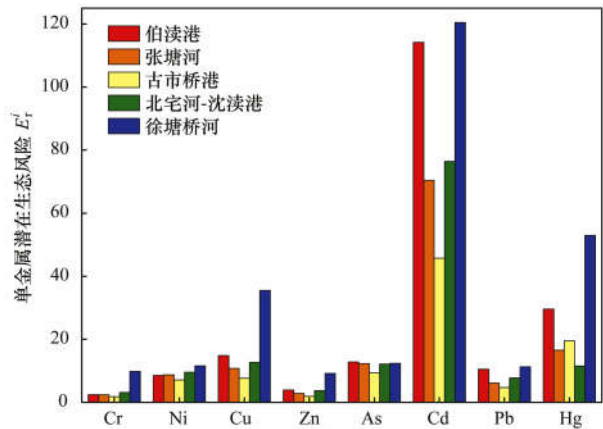


图6 望虞河西岸不同河流沉积物重金属分布

Fig. 6 The E_i distribution of heavy metals in river sediment in the western area of the Wangyu River

2.5.3 考虑重金属赋存形态的潜在生态风险评价 (RRSP)

使用基于重金属赋存形态的潜在生态风险评价法 (RRSP) 对望虞河西岸河网的沉积物中重金属进行风险评价, 结果如图 7 所示. 重金属 Cr、Ni、Zn 和 As 的 RRSP 值均小于 40, 表示 4 种金属不易从底泥中释放出来, 对河道的生态危害较小. 而 Cu、Cd、Pb 和 Hg 的 RRSP 值很高, 因此对河流潜在生态危害较大. 同时可以看出徐塘桥河的生态风险程度最高, 其次为伯渎港, 而古市桥港的生态风险较小. 因此需更加重视徐塘桥河段的底泥处理, 如采

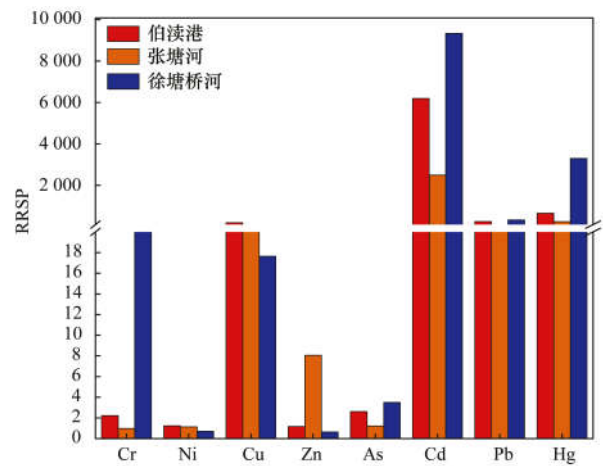


图7 望虞河西岸不同河流沉积物重金属分布

Fig. 7 RRSP distribution of heavy metals in river sediment in the western area of the Wangyu River

用底泥疏浚的方式将污染物移出河体, 从而减轻底泥中重金属对水生生物的毒性威胁^[40].

2.6 重金属污染来源解析

由前文可以看出河网区表层沉积物中重金属含量普遍高于环境背景值, 存在明显的人为污染. 通过主成分分析法对重金属元素的污染来源进行分析^[1], 结果如表 4 所示. 在分析之前, 首先利用 Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) 和 Bartlettde 检验对取样足够度和球形度进行检验, 本次分析 KMO 统计量 $= 0.78 > 0.5$, $P = 0 < 0.001$, 满足因子分析要求.

表4 重金属含量的主成分分析¹⁾

Table 4 Principal component analysis of heavy metal content			
成分	旋转后特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
1	3.925	49.064	49.064
2	1.943	24.289	73.353
3	1.048	13.094	86.447

1) 提取方法: 主成分分析法; 旋转法: 方差最大正交旋转法

可以看出主成分的特征值旋转后均大于 1, 累积贡献率达到 86% 以上, 说明能够反映所有变量 86% 的信息. 且公因子方差比显示每一个指标变量的共性方差均在 0.7 以上, 说明这些因子能够较好地反映原始各项指标变量的大部分信息. 因此选用以上因子为宜.

从表 5 和图 8 中可以看出, Cr、Ni、Cu、Zn 和 Pb 含量空间分布主要受因子 1 影响, As 和 Cd 含量空间分布主要受因子 2 影响, Hg 含量空间分布主要受因子 3 影响. 一般而言, 耐火材料和建筑材料企业的生产过程中会产生 Cr, 而 Cu 在金属冶炼、印刷电路板生产废水中含量较高^[41]. 同时, 地表环境中 Pb 和 Zn 含量受燃煤和铅锌矿工业的影响较大^[42], 含铅汽油的排放也是铅污染的重要来源, 因此推断因子 1 为机械制造、燃煤、交通尾气等人为来源. 而通常农药化肥的施用会导致土壤或水体中 As 和 Cd 的含量升高^[43], 因此推测因子 2 为农药化肥污染. 有色金属冶炼和化工厂向自然界排放了大量 Hg, 且呈现逐年递增的趋势^[44], 因此推断因子 3 为金属冶炼等工业来源.

表5 重金属旋转后因子载荷矩阵

Table 5 Factorial load matrix of heavy metals after rotation			
元素	因子		
	1	2	3
Cr	0.919	-0.019	-0.045
Ni	0.889	-0.047	0.049
Cu	0.976	-0.048	0.122
Zn	0.965	-0.075	0.016
As	-0.048	0.982	-0.021
Cd	-0.083	0.979	-0.046
Pb	0.623	-0.088	0.285
Hg	0.099	-0.041	0.972

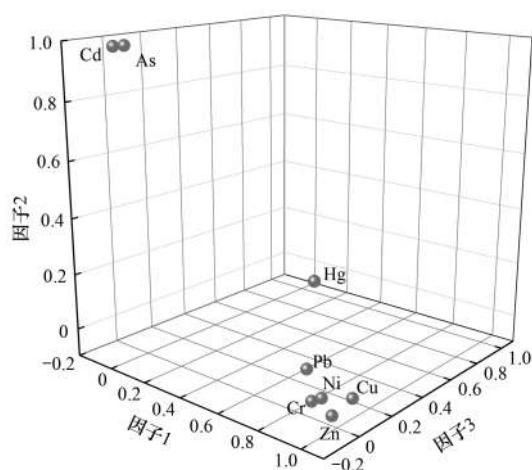


图8 重金属因子载荷

Fig. 8 Factorial load diagram of heavy metals

从图1可以发现,望虞河西岸工厂密集,主要产业有机械制造、金属制品、塑料制品和包装类等。而因子分析显示重金属的工业来源主要是机械制造、金属冶炼等产业,这与周围污染排放一致。并且重金属污染最为严重的徐塘桥河正处于周围机械制造等工厂密集分布的区域,因此可以推断研究区内过量的重金属含量主要来自于周围机械制造、金属冶炼类工厂的人为排放。

3 结论

(1)望虞河西岸河网区的水体重金属质量浓度较低,而表层沉积物中重金属含量较高,除Hg外其余均高于江苏省土壤环境背景值。

(2)河流沉积物中Ni、Zn和As主要以残渣态形式存在,Pb、Hg多为可氧化态,Cr和Cu的可还原态与可氧化态比例相近,而重金属Cd主要以酸溶态形式存在,因此Cd具有很强的迁移性和环境危害。而重金属在水体-沉积物中的分配系数显示Cd、As和Hg具有较强的二次释放潜力。

(3)地累积指数法(I_{geo})显示沉积物中Cu、Zn和Cd的污染程度较高,局部属于偏重度污染;潜在生态危害指数法(RI)显示Cd和Hg的生态风险较高;考虑重金属赋存形态的潜在生态风险评价(RRSP)显示Cu、Cd、Pb和Hg对环境的潜在危害较大。因此需格外重视重金属Cd的污染治理。多种评价结果显示徐塘桥河的重金属污染程度最高且具有较高的潜在生态风险。

(4)重金属来源分析显示研究区内过量的重金属含量主要来自于周围机械制造、金属冶炼类工厂的人为排放。因此,对于河道的重金属污染治理应注意监测周围工厂的排污情况,切断点源污染。同时注意保持水系畅通,积极清淤等。

参考文献:

- [1] 王漫漫. 太湖流域典型河流重金属风险评估及来源解析[D]. 南京: 南京大学, 2016.
Wang M M. Risk assessment and source apportionment of heavy metals in typical rivers of Taihu Basin[D]. Nanjing: Nanjing University, 2016.
- [2] 俞慎, 历红波. 沉积物再悬浮-重金属释放机制研究进展[J]. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1724-1731.
Yu S, Li H B. Perspectives on the release of heavy metals via sediment resuspension[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(7): 1724-1731.
- [3] 张杰, 郭西亚, 曾野, 等. 太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估[J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2202-2210.
Zhang J, Guo X Y, Zeng Y, et al. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in river sediments from Lake Taihu Basin[J]. Environmental Science, 2019, 40(5): 2202-2210.
- [4] 马尉斌, 陈秋禹, 尹德良, 等. 三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征[J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2211-2218.
Ma W B, Chen Q Y, Yin D L, et al. Temporal and spatial variation of mercury in the water of the Ruxi River Estuary, a typical tributary of the Three Gorges Reservoir Area[J]. Environmental Science, 2019, 40(5): 2211-2218.
- [5] 陈亚男, 逢勇, 赵伟, 等. 望虞河西岸主要入河支流污染物通量研究[J]. 水资源保护, 2011, 27(2): 26-28, 33.
Chen Y N, Pang Y, Zhao W, et al. Study on flux of pollutants discharged into western Wangyu River Basin through main inflow river channels[J]. Water Resources Protection, 2011, 27(2): 26-28, 33.
- [6] 张利民, 王水, 韩敏, 等. 太湖流域望虞河西岸地区氮磷污染来源解析及控制对策[J]. 湖泊科学, 2010, 22(3): 315-320.
Zhang L M, Wang S, Han M, et al. Nitrogen and phosphorus pollution in the western district of Wangyu River and countermeasures, Taihu Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(3): 315-320.
- [7] Hu W P, Zhai S J, Zhu Z C, et al. Impacts of the Yangtze River water transfer on the restoration of Lake Taihu[J]. Ecological Engineering, 2008, 34(1): 30-49.
- [8] 任凌霄, 王沛芳, 王超, 等. 望虞河表层沉积物中氮的分布与形态变化特征[J]. 环境工程学报, 2015, 9(3): 1201-1208.
Ren L X, Wang P F, Wang C, et al. Characteristics of distribution and variation of nitrogen species in surface sediments of Wangyu River[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(3): 1201-1208.
- [9] 马倩, 田威, 吴朝明. 望虞河引长江水入太湖水体的总磷、总氮分析[J]. 湖泊科学, 2014, 26(2): 207-212.
Ma Q, Tian W, Wu Z M. Total phosphorus and total nitrogen concentrations of the water diverted from Yangtze River to Lake Taihu through Wangyu River[J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(2): 207-212.
- [10] Chen C Y, Stemberger R S, Klaue B, et al. Accumulation of heavy metals in food web components across a gradient of lakes[J]. Limnology and Oceanography, 2000, 45(7): 1525-1536.
- [11] 黄亮, 李伟, 吴莹, 等. 长江中游若干湖泊中水生植物体内重金属分布[J]. 环境科学研究, 2002, 15(6): 1-4.
Huang L, Li W, Wu Y, et al. Distribution of heavy metals in aquatic plants of some lakes in the middle reach of the Yangtze River[J]. Research of Environmental Sciences, 2002, 15(6):

- 1-4.
- [12] 陆志华, 李敏, 陈俊, 等. 望虞河西岸控制工程与走马塘工程联合调度方案研究[J]. 中国农村水利水电, 2017, (9): 77-80, 85.
- Lu Z H, Li M, Chen J, *et al.* Research on the joint operation scheme of Wangyu River's west bank controlling project and zoumatang canal dredging and expansion project[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017, (9): 77-80, 85.
- [13] 纪洪艳. 走马塘拓浚延伸工程对长江水环境影响研究[J]. 中国工程科学, 2010, 12(6): 127-130.
- Ji H Y. To research the influence of Zoumatang dredging and expansion project on the water environment of Yangtze River[J]. Engineering Sciences, 2010, 12(6): 127-130.
- [14] Wang C, Shen C, Wang P F, *et al.* Modeling of sediment and heavy metal transport in Taihu Lake, China[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2013, 25(3): 379-387.
- [15] 李佳璐, 姜霞, 王书航, 等. 丹江口水库沉积物重金属形态分布特征及其迁移能力[J]. 中国环境科学, 2016, 36(4): 1207-1217.
- Li J L, Jiang L, Wang S H, *et al.* Heavy metal in sediment of Danjiangkou Reservoir: chemical speciation and mobility[J]. China Environmental Science, 2016, 36(4): 1207-1217.
- [16] Wang C, Li X C, Ma H T, *et al.* Distribution of extractable fractions of heavy metals in sludge during the wastewater treatment process[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 137(3): 1277-1283.
- [17] Teasdale P R, Apte S C, Ford P W, *et al.* Geochemical cycling and speciation of copper in waters and sediments of Macquarie Harbour, Western Tasmania[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003, 57(3): 475-487.
- [18] 王馨慧, 单保庆, 唐文忠, 等. 北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态[J]. 环境科学, 2016, 37(1): 180-186.
- Wang X H, Shan B Q, Tang W Z, *et al.* Arsenic content and speciation in the surficial sediments of Liangshui River in Beijing[J]. Environmental Science, 2016, 37(1): 180-186.
- [19] 时春景, 李红霞, 张言, 等. 永定河上覆水、间隙水和沉积物中重金属的分布特征[J]. 环境化学, 2017, 36(1): 48-61.
- Shi C J, Li H X, Zhang Y, *et al.* Distribution characteristics of heavy metals in overlying water-pore water-sediment in the Yongding River[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(1): 48-61.
- [20] 边博, 周燕, 张琴. 太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价[J]. 环境科学, 2017, 38(4): 1442-1450.
- Bian B, Zhou Y, Zhang Q. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals from river network sediment in Western Area of Taihu Lake[J]. Environmental Science, 2017, 38(4): 1442-1450.
- [21] 魏复盛, 杨国治, 蒋德珍, 等. 中国土壤元素背景值基本统计量及其特征[J]. 中国环境监测, 1991, 7(1): 1-6.
- [22] 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.
- [23] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [24] 范明毅, 杨皓, 黄先飞, 等. 典型山区燃煤型电厂周边土壤重金属形态特征及污染评价[J]. 中国环境科学, 2016, 36(8): 2425-2436.
- Fan M Y, Yang H, Huang X F, *et al.* Chemical forms and risk assessment of heavy metals in soils around a typical coal-fired power plant located in the mountainous area[J]. China Environmental Science, 2016, 36(8): 2425-2436.
- [25] Siegel F R. Environmental geochemistry of potentially toxic metals[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2002.
- [26] Lee G F, Jones-Lee A. Improving public health and environmental protection resulting from Superfund site investigation/remediation[J]. Remediation Journal, 2010, 14(2): 33-53.
- [27] Liu J J, Wang P F, Wang C, *et al.* Heavy metal pollution status and ecological risks of sediments under the influence of water transfers in Taihu Lake, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(3): 2653-2666.
- [28] 秦延文, 张雷, 郑丙辉, 等. 太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征[J]. 环境科学, 2012, 33(12): 4291-4299.
- Qin Y W, Zhang L, Zheng B H, *et al.* Speciation and pollution characteristics of heavy metals in the sediment of Taihu Lake[J]. Environmental Science, 2012, 33(12): 4291-4299.
- [29] 杨陈, 王沛芳, 刘佳佳, 等. 太湖沉积物中重金属的垂向分布特征及迁移转化[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3): 548-557.
- Yang C, Wang P F, Liu J J, *et al.* Vertical distribution and migration of heavy metals in sediment cores of Taihu Lake[J]. Journal of Agro-environment Science, 2016, 35(3): 548-557.
- [30] 李茜, 逢勇, 罗缙. 望虞河西岸控制工程对望虞河西岸地区水环境影响及对策研究[J]. 广东化工, 2018, 45(15): 141-142, 146.
- Li X, Pang Y, Luo J. Effect of Wangyuhe River's west bank controlling project on the water environment of Wangyuhe River's west bank and countermeasures[J]. Guangdong Chemical Industry, 2018, 45(15): 141-142, 146.
- [31] Cheng Z, Man Y B, Nie X P, *et al.* Trophic relationships and health risk assessments of trace metals in the aquaculture pond ecosystem of Pearl River Delta, China[J]. Chemosphere, 2013, 90(7): 2142-2148.
- [32] 朱程, 马陶武, 周科, 等. 湘西河流表层沉积物重金属污染特征及其潜在生态毒性风险[J]. 生态学报, 2010, 30(15): 3982-3993.
- Zhu C, Ma T W, Zhou K, *et al.* Pollution characteristics and potential ecotoxicity risk of heavy metals in surface river sediments of western Hunan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(15): 3982-3993.
- [33] 方斌斌, 于洋, 姜伟立, 等. 太湖流域水体和沉积物重金属时空分布特征及潜在生态风险评价[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(3): 215-224.
- Fang B B, Yu Y, Jiang W L, *et al.* Spatio-temporal distribution of heavy metals in the surface water and sediment of the Lake Taihu Basin and assessment of their potential ecological risks[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2017, 33(3): 215-224.
- [34] 霍庆霖, 肖慧, 王俊杰, 等. 成都市部分区域淡水混养池塘水体与沉积物中重金属风险评价及分配特征[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(2): 180-188.
- Huo Q L, Xiao H, Wang J J, *et al.* Risk assessments and partition characteristics of heavy metals in water and sediments of freshwater polyculture ponds in partial areas of Chengdu City[J].

- Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, **35**(2): 180-188.
- [35] 杨超, 杨振东, 聂玉伦, 等. 北运河表层沉积物对重金属 Cu、Pb、Zn 的吸附[J]. 环境工程学报, 2012, **6**(10): 3438-3442.
- Yang C, Yang Z D, Nie Y L, *et al.* Adsorption of heavy metals Cu, Pb, Zn over top sediment in North River Canal[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, **6**(10): 3438-3442.
- [36] 庄云龙, 石秀春. 铜、锌、铅和镉在淀山湖沉积物上的吸附特性[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2002, **8**(6): 526-529.
- Zhuang Y L, Shi X C. Adsorption characteristics of Cu, Zn, Pb and Cd in Dianshan Lake sediments[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science), 2002, **8**(6): 526-529.
- [37] 洪松. 水体沉积物重金属质量基准研究[D]. 北京: 北京大学, 2001.
- Hong S. Study on aquatic sediment quality criteria for heavy metals[D]. Beijing: Beijing University, 2001.
- [38] Ma X L, Zuo H, Tian M J, *et al.* Assessment of heavy metals contamination in sediments from three adjacent regions of the Yellow River using metal chemical fractions and multivariate analysis techniques[J]. Chemosphere, 2016, **144**: 264-272.
- [39] 李鹏, 曾光明, 蒋敏, 等. pH 值对霞湾港沉积物重金属 Zn、Cu 释放的影响[J]. 环境工程学报, 2010, **4**(11): 2425-2428.
- Li P, Zeng G M, Jiang M, *et al.* Effect of pH on release of heavy metals Zn and Cu in sediment from Xiawan[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, **4**(11): 2425-2428.
- [40] 毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 等. 太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 186-193.
- Mao Z G, Gu X H, Lu X M, *et al.* Pollution distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments from the different eastern dredging regions of Lake Taihu[J]. Environmental Science, 2014, **35**(1): 186-193.
- [41] 李鹏. 县域尺度耕地土壤重金属的时空变异特征及污染源识别研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- Li P. County-scale spatial-temporal variations and source identification of heavy metals in the cropland soils [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [42] Duzgoren-Aydin N S. Sources and characteristics of lead pollution in the urban environment of Guangzhou[J]. Science of the Total Environment, 2007, **385**(1-3): 182-195.
- [43] 王书琪. 土壤重金属污染修复技术研究进展[J]. 石油化工技术与经济, 2018, **34**(4): 59-62.
- Wang S Q. Research progress on soil heavy metal repair technology[J]. Techno-Economics in Petrochemicals, 2018, **34**(4): 59-62.
- [44] Streets D G, Hao J M, Wu Y, *et al.* Anthropogenic mercury emissions in China[J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(40): 7789-7806.

CONTENTS

Characteristics of Aerosol Vertical Distribution over the Yangtze River Delta Region of China in 2018	SHEN Ji, CAO Nian-wen (4743)
Characteristics of Haze Pollution Episodes During Autumn and Winter in 2018 in Shijiazhuang	SU Wen-kang, BAO Xiao-lei, NI Shuang-ying, <i>et al.</i> (4755)
Spatial Temporal Characteristics and Cluster Analysis of Chemical Components for Ambient PM _{2.5} in Wuhan	ZHANG Hui-tao, TIAN Ying-ze, LIU Bao-shuang, <i>et al.</i> (4764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Atmospheric PM _{2.5} in a Living Area of Zhengzhou City	HE Rui-dong, ZHANG Yi-shun, CHEN Yong-yang, <i>et al.</i> (4774)
Distribution Characteristics and Sources of Metal Elements in Rainwater in Xiamen	WANG Shan-shan, CHENG Yi-feng, YAN Jin-pei, <i>et al.</i> (4783)
First Long-Term Study of Atmospheric New Particle Formation in the Suburb of Shanghai from 2015 to 2017	HUO Jun-tao, WANG Xin-ning, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (4791)
Characteristics, Transportation, Pathways, and Potential Sources of Air Pollution During Autumn and Winter in Taiyuan	YAN Shi-ming, WANG Yan, GUO Wei, <i>et al.</i> (4801)
Spatial and Temporal Characteristics of Air Quality and Cause Analysis of Heavy Pollution in Northeast China	CHEN Wei-wei, LIU Yang, WU Xue-wei, <i>et al.</i> (4810)
Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanism of Aerosol Optical Depth in the Ebinur Lake Basin	CHEN Xiang-yue, DING Jian-li, WANG Jing-zhe, <i>et al.</i> (4824)
Concentration Levels and Impact Factors of Benzene Series in Chinese Residential Building	HOU Bei-bei, YIN Yi-hui, PEI Jing-jing, <i>et al.</i> (4833)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Aromatic Compounds in Shijiazhuang	YANG Yang, LI Xing-ru, LIU Shui-qiao, <i>et al.</i> (4841)
Emission Characteristics Analysis and Health Risk Assessment of Unorganized VOCs in the Carbon Industry, Zhengzhou	ZHANG Yi-shun, WANG Jia, HAN Shi-jie, <i>et al.</i> (4847)
Hazardous Volatile Organic Compound Emission Inventory Study and Its Application in a Typical Chemical Industry in the Yangtze River Delta	LU Jun, HUANG Yi-wei, HUANG Cheng (4856)
Establishment and Characteristics of an Artificial Ammonia Emissions Inventory in Jiangsu Province from 2013 to 2017	HOU Xin-hong, YU Xing-na, SHEN Li, <i>et al.</i> (4862)
Occurrence Characteristics and Health Risks of PAHs on the Surface of Buildings and Devices in the Coking Plant	ZHAO Yi-shu, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4870)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Androgens, Glucocorticoids, and Progesterone in the Liusha Bay, South China Sea	YANG Lei, ZHANG Jin-na, XU Min, <i>et al.</i> (4879)
Dynamic Changes in Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in the Karst Watershed Flood Process	YUAN Ya-qiong, SUN Ping-an, SU Zhao, <i>et al.</i> (4889)
Sources, Distribution, and Fluxes of Major and Trace Elements in the Yangtze River	WU Wen-tao, RAN Xiang-bin, LI Jing-xi, <i>et al.</i> (4900)
Contaminant Characteristics and Ecological Risk Assessments of Heavy Metals from River Networks in the Western Area of the Wangyu River	XU Chen, WANG Pei-fang, CHEN Juan, <i>et al.</i> (4914)
Influence of Rainfall Intensity on the Nutrient Loading from an Inflowing River in the Plain River Network of the Taihu Catchment	CHEN Jie, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (4924)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments from Shibalianwei Wetland in Hefei, Anhui Province, China	CHEN Shan, XU Fan, XIE San-tao, <i>et al.</i> (4932)
Spatial Distribution Characteristics of Chlorophyll-a and Nutrient Salts in Tributaries of Different River Sections in the Three Gorges Reservoir Area During the Flood Season	YANG Fan, YANG Zheng-jian, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4944)
Endogenous Release of Nitrogen and Phosphorus in the Danjiangkou Reservoir	WANG Zhi-qi, LIU Xin-xing, YAO Zhi-hong, <i>et al.</i> (4953)
Correlation Between Water Purification Capacity and Bacterial Community Composition of Different Submerged Macrophytes	LI Lin, YUE Chun-lei, ZHANG Hua, <i>et al.</i> (4962)
Size-dependent Effects of Zinc Oxide Nanoparticles on Performance and Microbial Community Structure of a Constructed Wetland	WANG Sen, REN Ling, LIU Lin-lin, <i>et al.</i> (4971)
Removal of Nitrogen and Phosphorus from Water by Biomass Carbon of Aquatic Plants	LIU Shu-lei, PENG Hui-jun, YANG Jia-yi, <i>et al.</i> (4980)
Preparation of MgO Modified Lotus Shell Biochar and Its Phosphorus Adsorption Characteristics	WANG Sheng-hua, ZHU Dan-chen, SHAO Jing-ai, <i>et al.</i> (4987)
Effects of Microplastics on Membrane Fouling During a Shortened Ultrafiltration Membrane Process	WANG Bo-dong, XUE Wen-jing, LÜ Yong-tao, <i>et al.</i> (4996)
Preparation and Comparison of Arsenic Removal Granular Adsorbent Based on Iron-Manganese Sludge	ZENG Hui-ping, YU Ya-ping, LÜ Sai-sai, <i>et al.</i> (5002)
Catalytic Degradation of Rhodamine B by FeOCl Activated Hydrogen Peroxide	ZHANG Shao-peng, CHEN Yu, BAI Shu-qin, <i>et al.</i> (5009)
Treatment Effect and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Wastewater from Large-scale Dairy Farms in Tianjin	CHEN Qian, ZHAO Run, MOU Mei-rui, <i>et al.</i> (5015)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	YAO Peng-cheng, CHEN Jia-yu, ZHANG Yong-ming, <i>et al.</i> (5024)
Start-up and Stable Operation of CANON Coupled with Denitrifying Phosphorus Removal	YIN Wen, CHEN Ya, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (5032)
Control of Sludge Bulking Caused by Unknown Reason Through FeCl ₃ Coupled with Biochemical Methods	WEI Dong-yang, XIAO Cai-lin, ZHOU Wen, <i>et al.</i> (5040)
Effects of Solid Retention Time on the Phosphorus Removal and Nitrosation Granules System	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (5048)
Start-up of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification Process and Changes in Microbial Community Characteristics	SONG Zhuang-zhuang, LÜ Shuang, LIU Zhe, <i>et al.</i> (5057)
Influence of Substrate Exposure Level on ANAMMOX Microbial Activity and Biomass	CHEN Fang-min, GAO Jia-qi, HUANG Yong, <i>et al.</i> (5066)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils in the Taige Canal Valley	LI Wei-di, CUI Yun-xia, ZENG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (5073)
Method of Dividing the Value of Soil Heavy Metal Pollution Risk Screening: Using Cd as an Example	WANG Rui, ZHANG Feng-lei, XU Shu-shu, <i>et al.</i> (5082)
Mineral Characteristics of Arsenic in the Active Area of the Banbishan Gold Mine and Its Effect on Arsenic Accumulation in Farmland Soil	WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, SHEN Jun-feng, <i>et al.</i> (5090)
Remediation of Cadmium Contaminated Paddy Fields Using Soil Conditioners	ZHOU Li-jun, WU Lin, LIN Xiao-bing, <i>et al.</i> (5098)
Inhibition and Remediation of Methylmercury Contaminated Soil by Use of Modified Montmorillonite	HAN Yi-xin, HE Tian-rong, WANG Zu-bo (5107)
Cerium-manganese Modified Biochar Immobilizes Arsenic in Farmland Soils	LIANG Ting, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5114)
Improving Bioremediation of Crude Oil-contaminated Soil by Mild Pre-oxidation	XU Jin-lan, WANG Hui-fang, WANG Rong, <i>et al.</i> (5124)
Community Structure of Heavy Metal Immobilized Bacteria in the Lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.) Rhizosphere in Soil Polluted by Heavy Metals and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Lettuce	WANG Tie-jun, SU Nan-nan, LEI Peng, <i>et al.</i> (5133)
Impact of Dicyandiamide (DCD) and 3,4-Dimethylpyrazole Phosphate (DMPP) on Ammonia-oxidizing Bacteria and Archaea in a Vegetable Planting Soil	GUO Jun-li, LIU Yi, WEI Wen-xue, <i>et al.</i> (5142)
Effect of Different Reclaimed Water Irrigation Methods on Bacterial Community Diversity and Pathogen Abundance in the Soil-Pepper Ecosystem	CUI Bing-jian, GAO Feng, HU Chao, <i>et al.</i> (5151)
Characteristics of CO ₂ and N ₂ O Emissions Under Two Land Use Types in the Loess Plateau of China	HAN Jia-le, HAO Shan, LIU Zhen-jie, <i>et al.</i> (5164)
Effects of Biochar on N ₂ O Emission from Four Typical Soils in the North China Plain	ZHANG Xiu-ling, SUN Yun, ZHANG Shui-qing, <i>et al.</i> (5173)
Effects of Optimizing Fertilization on N ₂ O and CH ₄ Emissions in a Paddy-Cowpea Rotation System in the Tropical Region of China	HU Yu-lin, TANG Shui-rong, TAO Kai, <i>et al.</i> (5182)