

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, 王琄(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)	

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

陈珊^{1,2,3}, 许凡^{1,2,3}, 谢三桃⁴, 郭天星^{1,2,3}, 彭久赞^{1,2,3}, 雷琦^{1,2,3}, 张玮^{1,2,3*}, 王丽卿^{1,2,3*}

(1. 上海海洋大学农业部鱼类营养与环境生态研究中心, 上海 201306; 2. 上海海洋大学水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 上海 201306; 3. 上海海洋大学水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306; 4. 安徽省水利水电勘测设计院, 合肥 230088)

摘要: 十八联圩是南淝河入巢湖湖口区一处由“退耕还湿”形成的大型人工湿地。为了解其表层沉积物营养盐与重金属分布和污染特征, 于2018年7月采集湿地内部和外部毗邻水体共72个位点的沉积物样品进行调查, 并对污染来源进行了分析。结果表明, 在十八联圩湿地内部水体中, 表层沉积物总氮(TN)、总磷(TP)和有机质(OM)平均含量分别为2 108.87 mg·kg⁻¹、1 448.82 mg·kg⁻¹和86.2 g·kg⁻¹, 而在外部水体中, 分别为2 305.81 mg·kg⁻¹、1 268.46 mg·kg⁻¹和59.9 g·kg⁻¹。重金属Mn、Cr、Cu、Pb、Cd、As和Hg在湿地内、外部水体中的平均含量分别为462.58、42.12、21.69、18.05、0.63、5.67和0.059 mg·kg⁻¹; 381.61、36.85、24.74、30.70、2.49、6.47和0.035 mg·kg⁻¹。湿地内水体表层沉积物, 在营养盐污染评价中, TN整体处于轻度至中度污染水平, TP整体处于重度污染水平, 营养盐整体处于中度至重度污染水平; 在有机污染指数评价中, OM整体处于中度至重度污染水平; 在重金属潜在生态风险评价中, 潜在生态风险指数(RI)和潜在生态风险系数(E_i⁺)表明, 部分区域的Cd与Hg具有一定的生态风险。而湿地外毗邻水体表层沉积物的营养盐水平同样较高, 且重金属污染严重, 所有位点均达到强生态风险以上。

关键词: 滨湖人工湿地; 表层沉积物; 营养盐; 重金属; 污染评价

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)11-4932-12 DOI: 10.13227/j.hjks.201903184

Distribution and Pollution Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments from Shibalianwei Wetland in Hefei, Anhui Province, China

CHEN Shan^{1,2,3}, XU Fan^{1,2,3}, XIE San-tao⁴, GUO Tian-xing^{1,2,3}, PENG Jiu-zan^{1,2,3}, LEI Qi^{1,2,3}, ZHANG Wei^{1,2,3*}, WANG Li-qing^{1,2,3*}

(1. Centre for Research on Environmental Ecology and Fish Nutrient of the Ministry of Agriculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. Anhui Survey and Design Institute of Water Conservancy and Hydropower, Hefei 230088, China)

Abstract: Shibalianwei is a large constructed wetland formed at the estuary of the Nanfei River adjoining Lake Chaohu. To investigate the distribution and pollution characteristics of nutrients and heavy metals in surface sediments of Shibalianwei Wetland, sediment samples were collected from 72 sites in July 2018. The source of the pollution was analyzed. Our results showed that the average contents of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and organic matter (OM) in surface sediments of Shibalianwei were 2 108.87 mg·kg⁻¹, 1 448.82 mg·kg⁻¹, and 86.2 g·kg⁻¹, respectively; in the external water system of the wetland, they were 2 305.81 mg·kg⁻¹, 1 268.46 mg·kg⁻¹, and 59.9 g·kg⁻¹, respectively. The average contents of heavy metals of Mn, Cr, Cu, Pb, Cd, As, and Hg in Shibalianwei were 462.58, 42.12, 21.69, 18.05, 0.63, 5.67, and 0.059 mg·kg⁻¹, respectively; in the external water bodies, they were 381.61, 36.85, 24.74, 30.70, 2.49, 6.47, and 0.035 mg·kg⁻¹, respectively. In the assessments of nutrient pollution of internal water bodies of Shibalianwei, TN was at mild to moderate pollution levels, TP was at a heavy pollution level, and the comprehensive pollution index (FF) indicated that nutrients in Shibalianwei were at moderate to heavy pollution levels. The assessment results of the organic pollution index (OI) were consistent with the FF. The potential ecological risk assessments of heavy metals showed that both Cd and Hg reached certain ecological risks, which were indicated by RI and E_i⁺. For external water bodies, the nutrient levels were also high and heavy metal pollution was relatively serious, indicating high ecological risks.

Key words: lakeside constructed wetland; surface sediment; nutrient; heavy metal; pollution assessment

滨湖湿地是湖泊的天然屏障, 具有维持生物多样性、保护生态链、蓄洪防旱、调节水质和降解污染物等重要生态功能^[1]。近年来, 滨湖湿地受人类活动干扰加剧, 生态环境被严重破坏, 面积逐渐萎

收稿日期: 2019-03-21; 修订日期: 2019-06-04

基金项目: 十八联圩生态湿地本底资源调查项目

作者简介: 陈珊(1993~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为淡水生态学, E-mail: aquachens@163.com

* 通信作者, E-mail: weizhang@shou.edu.cn; lqwang@shou.edu.cn

缩, 功能逐渐退化, 且出现了水体富营养化和重金属含量超标等现象^[2]. 因此, 滨湖湿地的健康状况与功能恢复引起了社会越来越广泛的关注.

沉积物是湿地生态系统的重要组成部分, 同时也是重金属和营养盐等污染物的主要蓄积库^[3]. 沉积物中的营养盐虽是水生生物生长的必要条件之一^[4], 但由于环境条件的改变和水流的扰动, 过量的营养盐常常导致下游水体污染严重并引发富营养化现象; 重金属具有难降解、易积累和毒性大等特点, 且通过二次释放对水质产生持续影响^[5]. 因此, 研究沉积物营养盐和重金属的含量分布, 对了解其对水质的影响和评估湿地生态健康具有重要意义. 近年来, 许多学者已对不同类型水体的沉积物进行研究, 例如一些浅水湖泊^[6~8]、河流^[9,10]、滨海湿地^[11~13]、内陆天然湿地^[14~16]和水库^[17,18]等. 然而, 对于大型浅水湖泊入湖口滨湖湿地的研究还鲜有报道.

十八联圩湿地位于合肥市肥东县, 紧靠南淝河入巢湖口, 总面积约为 27.6 km², 是一个从 2016 年开始经过“退耕还湿”初步形成的大型人工湿地. 该区域在“退耕”前, 有多个村落, 主要有在滨湖区围垦形成的农田、养殖池塘(曾拥有 2814 渔场等水产养殖产业)和小型加工厂, 受人为干扰严重. 巢湖自 20 世纪 80 年代以来, 富营养化的问题愈演愈烈, 已成为国家水污染的重点治理对象之一^[19,20]. 十八联圩湿地的建成, 将有助于削减南淝河入巢湖的污染负荷, 保护巢湖生物多样性, 并可能成为缓冲巢湖洪水的“前置库”^[21,22]. 目前, 该湿地处于初步形成阶段, 未有外来污水进入; 对该湿地生态系统健康状况的整体认知比较缺乏, 而涉及沉积物中营养盐和重金属含量的本底研究更是尚未开展.

本文根据十八联圩湿地的地理特征, 将其分为湿地内部水体和外部水体, 对表层沉积物营养盐和重金属含量的分布特征进行研究, 并对沉积物营养盐和重金属污染的潜在生态风险进行评价, 同时对其污染来源进行了分析, 以期为后续十八联圩湿地发挥削减巢湖污染负荷和保护物种多样性等功能提供基础资料.

1 材料与方法

1.1 采样点布设

本研究于 2018 年 7 月对十八联圩湿地采用全球定位系统(GPS)设定 72 个采样位点(见图 1), 包括池塘、农田沟渠、河道和湖滨等有代表性的位点. 其中, 在湿地内部水体布置了 47 个断面, 包含了 51 个采样点(1~51 号), 包括一道撇洪沟、姚埠

圩十字沟、兴隆桥大河、店子口大河以及原 2814 渔场等重要水域; 外部水体由南淝河、巢湖滨水区、二道撇洪沟以及沙河这 4 个重要水域构成, 共设置 10 个断面, 包含了 21 个采样点(52~72 号).

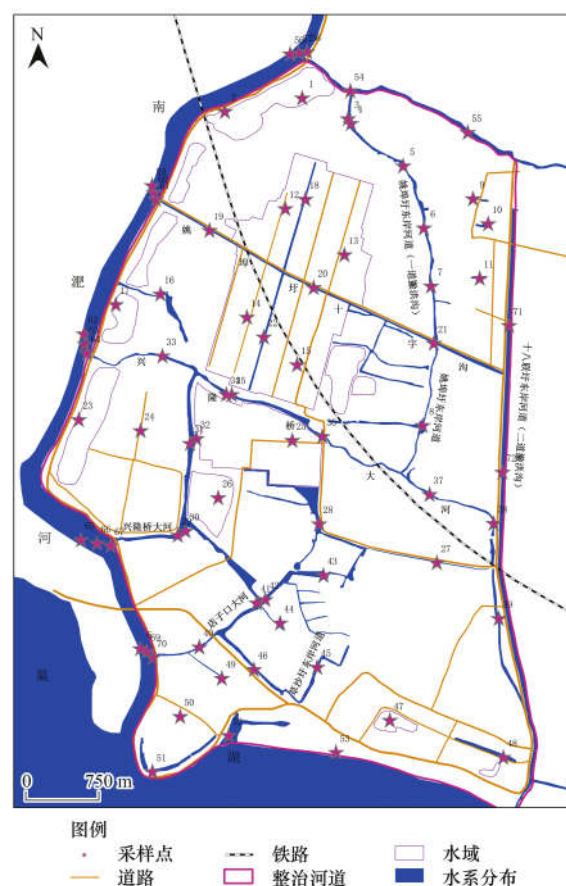


图 1 十八联圩湿地表层沉积物采样位点示意

Fig. 1 Sampling sites for surface sediments of the Shibalianwei Wetland

1.2 样品采集与测试方法

利用彼得森采泥器, 采集水底 0~15 cm 表层沉积物样品, 取中部样品放入干净的自封袋内冷藏储存并运回实验室, 挑出杂物后将样品风干并研磨过 80 目筛, 继而进行营养盐和重金属的测定. 沉积物总氮(TN)和总磷(TP)分别采用半微量法和钼锑抗比色法测定, 有机质(OM)测定采用灼烧法; 重金属经 HNO₃-HClO₄ 消解后, Cu、Pb、Cd、Cr 和 Mn 利用原子吸收仪 PinAA 900T, As 和 Hg 分别采用原子荧光光度计 AFS-9130 和 AFS-9230 进行分析测试^[23].

1.3 数据处理与分析

在 Excel 2016 中进行数据的记录和处理; 采用 ArcGIS 10.2 的柱状图描述沉积物营养盐和重金属的空间分布特征; 采用 Origin 2017 对表层沉积物营养盐污染指数、有机污染指数、重金属潜在生态风险指数和潜在生态风险系数的图表进行绘制; 利用

SPSS 17 中 Pearson 相关性分析方法检验沉积物营养盐和重金属之间的相关性。

1.4 环境风险评价方法

1.4.1 营养盐污染评价方法

利用单因素污染指数法和综合污染指数法^[24]对沉积物氮磷营养盐的污染程度进行评价。其计算公式为：

$$S_i = \frac{C_i}{C_s}$$
$$FF = \sqrt{\frac{F^2 + F_{\max}^2}{2}}$$

式中， S_i 为单因子评价指数或标准指数， S_i 大于 1 表示因子 i 含量超过评价标准值， C_i 为因子 i 的实测值； C_s 为因子 i 的评价标准值。TN 的标准值取 1 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，TP 的标准值 C_s 值取 420 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[9]。 F 为 n 项污染指数平均值 (S_{TN} 和 S_{TP} 的平均值)； $F_{\max}$ 为最大单因子污染指数 (S_{TN} 和 S_{TP} 中最大者)。单因素污染程度和综合污染程度评价标准见表 1。

表 1 沉积物营养盐污染程度评价标准^[10]
Table 1 Assessment standards for the degree of nutrient pollution for sediments

级别	S_{TN}	S_{TP}	FF	等级
1	$S_{\text{TN}} < 1.0$	$S_{\text{TP}} < 0.5$	$\text{FF} < 1.0$	清洁
2	$1.0 \leq S_{\text{TN}} \leq 1.5$	$0.5 \leq S_{\text{TP}} \leq 1.0$	$1.0 \leq \text{FF} \leq 1.5$	轻度污染
3	$1.5 < S_{\text{TN}} \leq 2.0$	$1.0 < S_{\text{TP}} \leq 1.5$	$1.5 < \text{FF} \leq 2.0$	中度污染
4	$S_{\text{TN}} > 2.0$	$S_{\text{TP}} > 1.5$	$\text{FF} > 2.0$	重度污染

表 3 重金属评价背景值和毒性系数

Table 3 Reference values and toxicity coefficients of heavy metals

重金属	Mn	Cr	Cu	Pb	Cd	As	Hg
合肥市土壤背景值 ^[26] / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	634	66.5	20.4	26.6	0.097	9	0.033
毒性系数 ^[27]	1	2	5	5	30	10	40

表 4 沉积物重金属潜在生态风险程度评价标准^[7]
Table 4 Assessment standards of the degree of potential ecological risk of heavy metals in sediments

生态风险系数 (E_r^i)	生态风险指数 (RI)	风险程度
< 40	< 150	轻微
$40 \leq E_r^i < 80$	$150 \leq \text{RI} < 300$	中等
$80 \leq E_r^i < 160$	$300 \leq \text{RI} < 600$	强
$160 \leq E_r^i < 320$	$600 \leq \text{RI} < 1\ 200$	很强
≥ 320	$\geq 1\ 200$	极强

2 结果与分析

2.1 沉积物营养盐的空间分布特征

十八联圩湿地内部水体沉积物营养盐含量在各采样点之间存在较大的差异(见图 2)。其中，TN 含量的变幅为 42.66 ~ 25 042.89 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，平均值为

1.4.2 有机污染指数评价

有机污染指数^[17]通常作为评价水体沉积物环境质量的指标之一，评价标准见表 2。其计算公式为：

$$\text{OC} = \text{OM} \div 1.724$$
$$\text{ON} = \text{TN} \times 0.95$$
$$\text{OI} = \text{OC} \times \text{ON}$$

式中，OI 为有机指数，%；OC 为有机碳，%；ON 为有机氮，%。

表 2 沉积物有机污染指数评价标准^[7]

Table 2 Assessment standards for the organic pollution index for sediments

项目	$\text{OI} < 0.05$	$0.05 \leq \text{OI} < 0.2$	$0.2 \leq \text{OI} < 0.5$	$\text{OI} \geq 0.5$
等级	清洁	轻度污染	中度污染	重度污染
水平	I	II	III	IV

1.4.3 重金属潜在生态风险评价方法

采用 Hakanson^[25]提出的沉积物污染评价法对十八联圩湿地表层沉积物重金属含量进行潜在生态风险评价。其计算公式为：

$$\text{RI} = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times c_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{c_i}{c_n^i}$$

式中，RI 为潜在生态风险指数； E_r^i 为第 i 种元素的潜在生态风险系数； T_r^i 为第 i 种元素的毒性相应系数； c_r^i 为第 i 种元素的污染指数； c_i 为底泥中第 i 种元素的实测值； c_n^i 为第 i 种元素的背景值。合肥市重金属的背景值^[26]和毒性系数^[27]见表 3，重金属潜在生态风险程度评价标准见表 4。

2 108.87 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，最高值出现在 36 号(兴隆桥河)。TP 变幅为 378.02 ~ 5 267.06 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，平均值为 1 448.82 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，最高值出现在 4 号(姚埠东河)。原 2814 渔场(包括 12 ~ 15、25 和 26 号)区域 TN 和 TP 平均含量最高，分别为 935.58 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 3 082.95 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。湿地外部水体 TN 平均含量为 2 305.81 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，是内部水体的 1.09 倍；TP 平均含量为 1 268.46 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，内部水体 TP 平均含量是其 1.14 倍。

在湿地内部水体中，沉积物 OM 含量主要呈现为中间比外围高，北部比南部高的趋势。OM 变幅为 24.0 ~ 196.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，平均值为 86.2 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，最高值出现在 20 号(姚埠圩十字沟)，含量较高区域

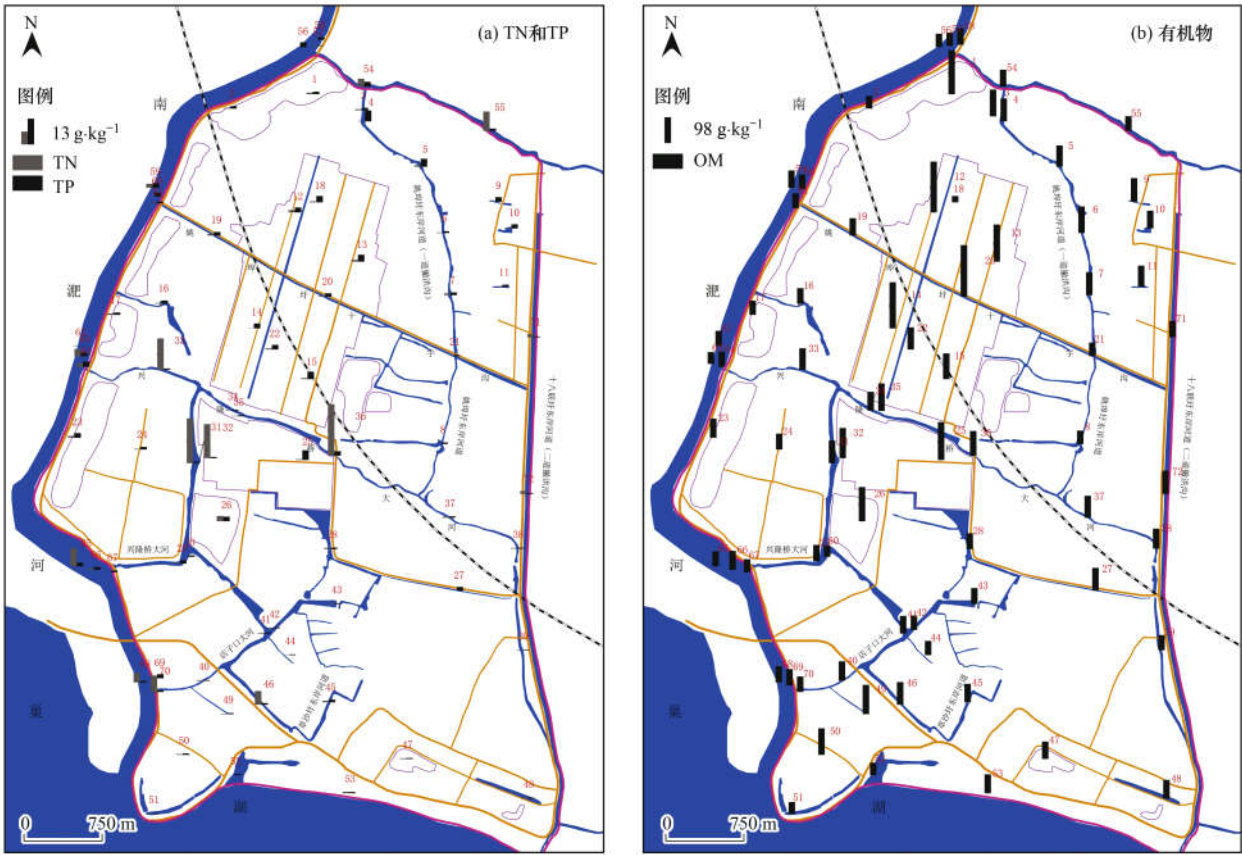


图2 十八联圩湿地表层沉积物营养盐的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of nutrients in surface sediments of the Shibalianwei Wetland

集中在姚埠圩十字沟附近原 2814 渔场、兴隆桥大河及附近养殖水体、农田沟渠和池塘等类型水体中。其中，原 2814 渔场区域 OM 平均含量最高，达到 $146.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。然而，外部水体 OM 平均含量为 $59.9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，仅为内部水体的 0.69 倍。

2.2 沉积物重金属的空间分布特征

由十八联圩湿地水体的重金属含量分布可知，各采样点的重金属含量同样存在着很大的差异(见图 3)。重金属 Mn、Cr、Cu、Pb、Cd、As 和 Hg 在内部水体中的范围分别为： $173.30 \sim 1635.95$ 、 $11.75 \sim 308.36$ 、 $6.37 \sim 58.39$ 、 $10.23 \sim 42.37$ 、 $0.04 \sim 2.65$ 、 $1.61 \sim 13.20$ 和 $0.004 \sim 0.461 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，高低顺序为 $\text{Mn} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Hg}$ ；在外部水体中的范围分别为： $83.95 \sim 992.95$ 、 $11.70 \sim 175.96$ 、 $9.13 \sim 45.11$ 、 $12.87 \sim 67.40$ 、 $0.90 \sim 7.69$ 、 $2.70 \sim 14.40$ 和 $0.005 \sim 0.203 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，高低顺序为 $\text{Mn} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Hg}$ 。其中

Mn、Cr 和 Hg 含量均为内部水体 > 外部水体，其余元素含量均为外部水体 > 内部水体。在湿地内，Mn 含量的较高值主要分布在一道撇洪沟及池塘(4 ~ 7、10 和 11 号)；Cr 含量的较高值主要分布在一道撇洪沟与姚埠圩十字沟交界处和七甲圩(5 ~ 8 和 49 ~ 51 号)；Cu 含量的较高值主要分布在兴隆河大桥北部的河流与池塘(1、4 ~ 6 和 10 ~ 14 号)；Pb 和 As 含量的较高值主要分布在一道撇洪沟与姚埠圩十字沟北部的养殖水体(1、5、6、10、11 和 32 号)；Cd 含量的较高值主要分布在一道撇洪沟、姚埠圩的养殖水体和七甲圩的河流(1 ~ 3、11 ~ 14、50 和 51 号)；Hg 含量的较高值主要分布在一道撇洪沟与姚埠圩十字沟交界处和长圩的池塘(4、8、22、24、47 和 49 号)。

2.3 营养盐和重金属之间的关系

由表 5 和表 6 可知，在十八联圩湿地内部水体表层沉积物中，TP 含量和 OM 含量与 Cu 呈极显著

表 5 十八联圩湿地内部水体沉积物营养盐与重金属的相关性¹⁾ (N = 51)

项目	Mn	Cr	Cu	Pb	Cd	As	Hg
TN	-0.101	-0.114	-0.073	0.140	-0.028	0.070	-0.122
TP	0.058	-0.046	0.418 **	-0.007	-0.043	0.166	-0.076
OM	-0.069	-0.006	0.395 **	0.348 *	0.061	0.074	-0.097

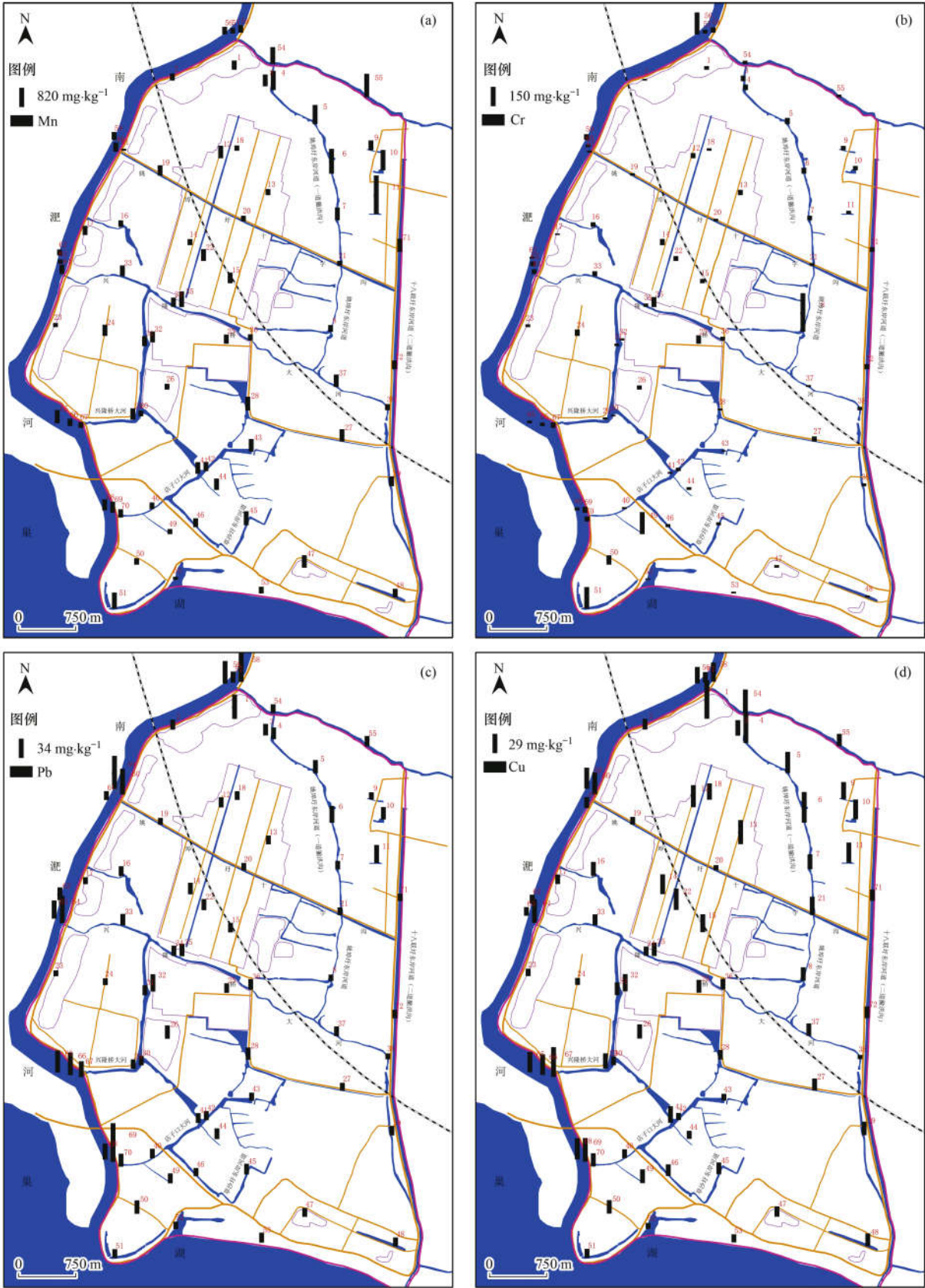
1) * 表示 $P < 0.05$ ，** 表示 $P < 0.01$

正相关($P < 0.01$),且 OM 含量与 Pb 呈显著正相关($P < 0.05$),而 TN 含量与重金属的相关性并不明显;在湿地外部水体表层沉积物中, TN 含量与 Mn 呈极显著正相关, TP 含量与 Cu 和 Pb 呈极显著正相关($P < 0.01$),与 As 呈显著正相关($P < 0.05$),

而 OM 含量与重金属的相关性并不明显. 整体而言, TN、TP 和 OM 含量与 As 均呈正相关.

2.4 沉积物营养盐污染指数评价

十八联圩湿地沉积物营养盐 S_{TN} 、 S_{TP} 、FF 和 OI 评价各位点污染等级百分比组成见图 4. 湿地内部



续图3

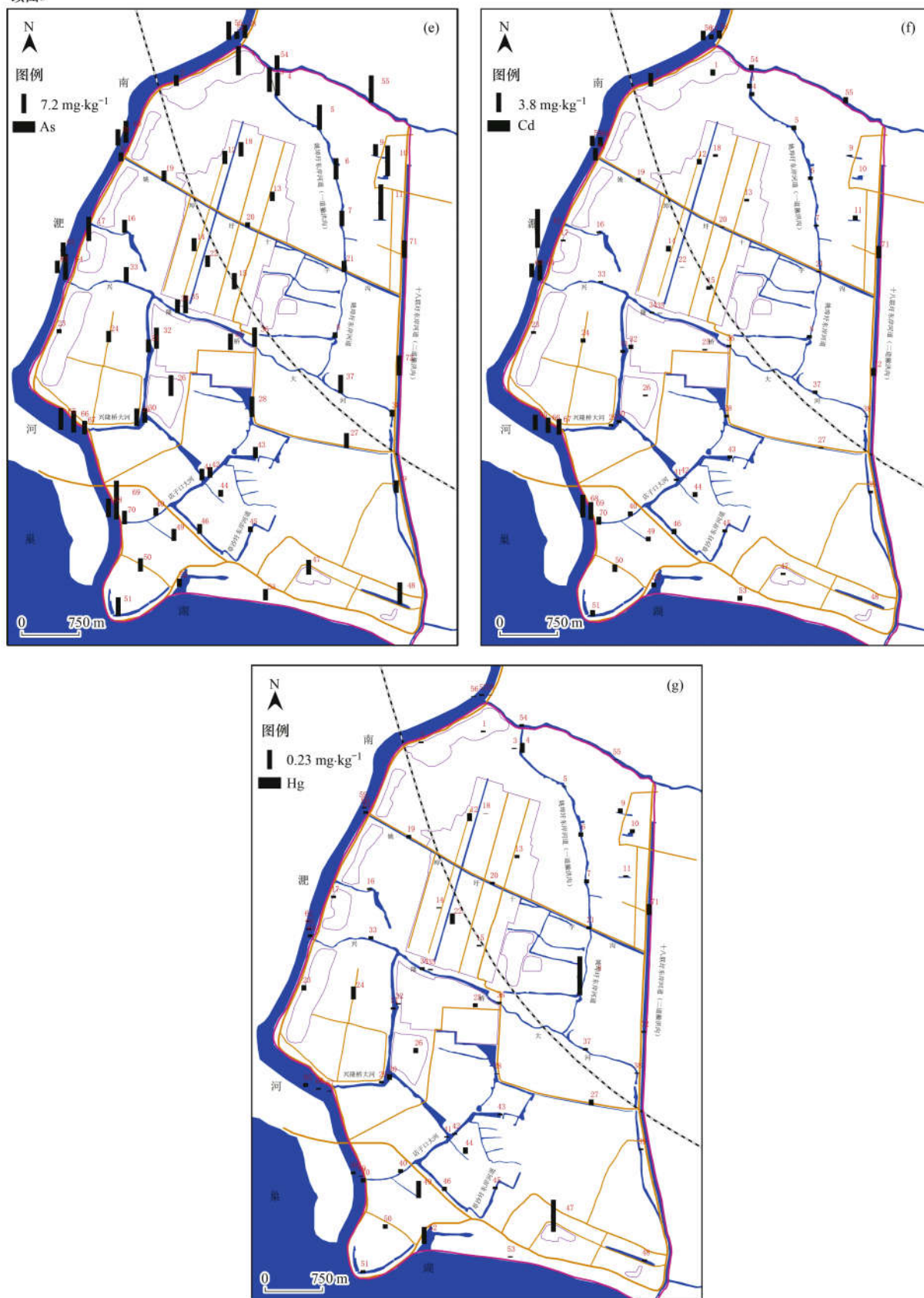


图3 十八联圩湿地表层沉积物重金属的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of heavy metals in surface sediments of the Shibalianwei Wetland

水体沉积物 S_{TN} 范围为 0.05 ~ 27.28, 平均值为 2.30; S_{TP} 范围为 0.55 ~ 7.69, 平均值为 2.12.

11.76% 的采样点 TN 含量处于重度污染, 1.96% 为轻度污染, 其余为清洁; 而 TP 的污染情况明显劣

表 6 十八联圩湿地外部水体沉积物营养盐与重金属的相关性¹⁾ (N = 21)

Table 6 Correlation between nutrients and heavy metals in surface sediments of the external water of Shibalianwei Wetland							
项目	Mn	Cr	Cu	Pb	Cd	As	Hg
TN	0.683 **	-0.184	0.020	-0.111	-0.084	0.268	-0.041
TP	0.229	0.423	0.601 **	0.682 **	-0.111	0.453 *	-0.314
OM	0.158	-0.140	0.053	0.006	-0.066	0.238	-0.225

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

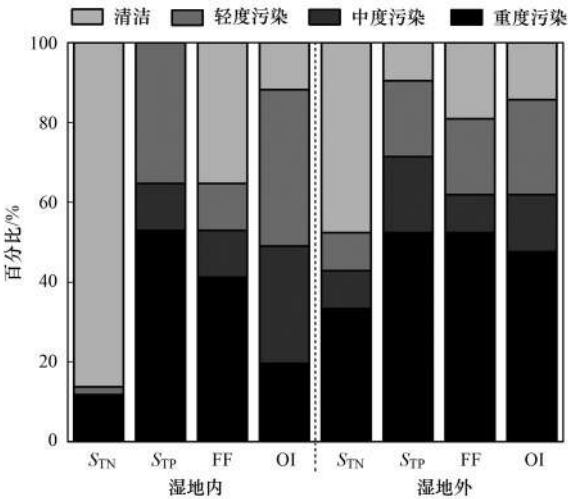


图 4 十八联圩湿地表层沉积物 S_{TN} 、 S_{TP} 、FF 和 OI 的污染等级百分比

Fig. 4 Percentage of different degrees of pollution in surface sediments of the Shibalianwei Wetland based on S_{TN} , S_{TP} , FF, and OI

于 TN, 53% 的采样点为重度污染, 12% 为中度污染, 其余均为轻度污染. 湿地外部水体 S_{TN} 平均值为 2.51, 重度污染的比例达到 33%; S_{TP} 平均值为 1.85, 重度污染的比例达到 52%. 相比较而言, 湿地内 TN 的污染水平相对较低, 而 TP 的污染水平相对较高. 根据综合污染指数评价方法来看, 湿地内 FF 达到重度污染比例为 41.18%, 中度污染和轻度污染的采样点比例均为 11.76%; 而在湿地外 FF 达到污染程度的比例超过内部水体, 为 81%. 有机污染指数 OI 在湿地内范围为 0.01% ~ 12.97%, 平均值为 1.09%, 处于中度至重度污染的占 49.02%; 而湿地外部水体中度至重度污染的占 61.90%, 远高于内部水体.

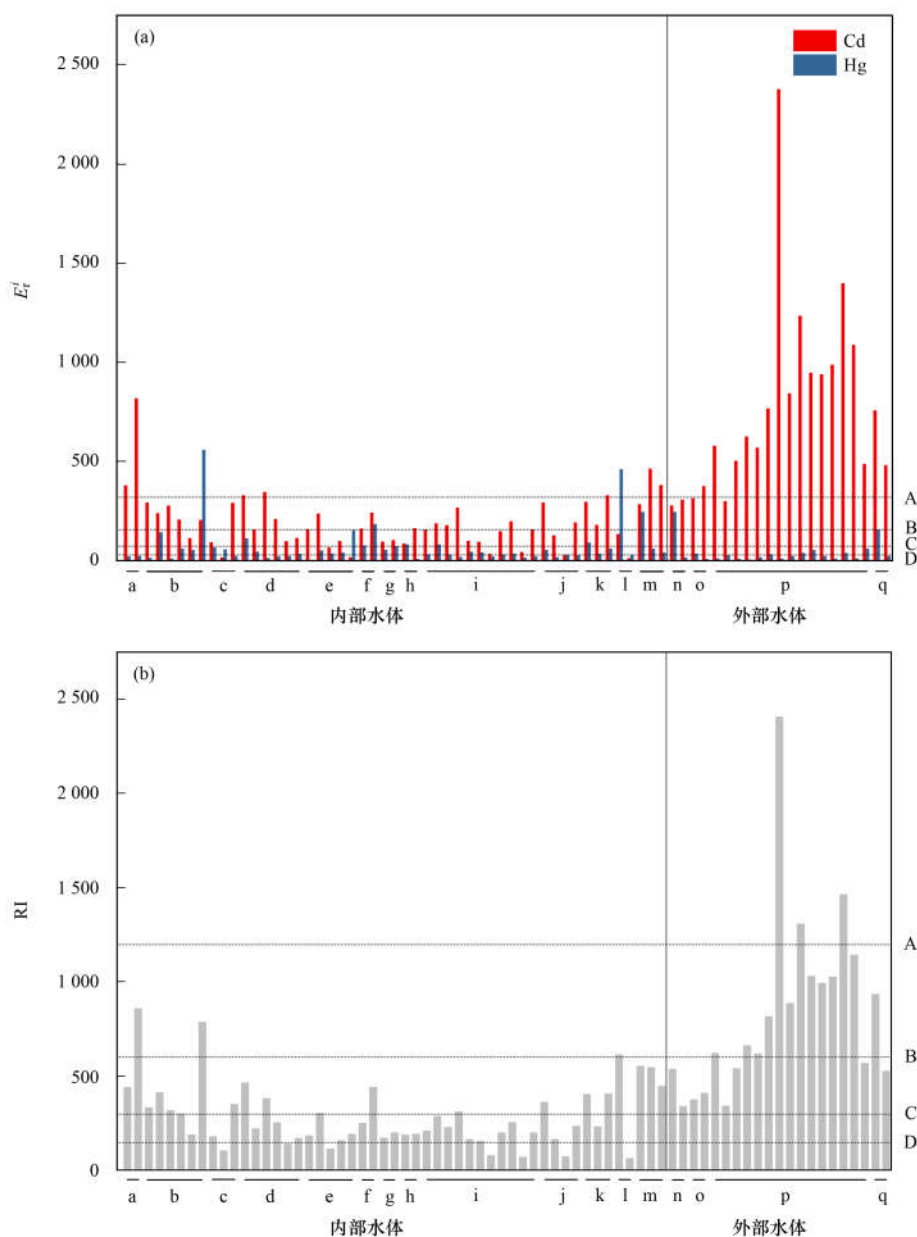
2.5 沉积物重金属污染评价

十八联圩湿地沉积物重金属 E_r^i 和 RI 见图 5. 根据重金属的潜在生态风险系数评价标准, 可得出重金属 Mn、Pb、Cu、As 和 Cr 均处于轻微风险程度. 在内部水体中, 重金属 Cd 有 12% 的位点达到极强风险程度, 小于 Cd 在外部水体中的污染程度: 均达到了很强或极强的风险程度; 重金属 Hg 在 8 号(姚埠东河)和 47 号(长圩)两个位点达到极强生态风险程度. 重金属对 RI 的平均贡献大小依次为: $Hg > Cd > As > Pb = Cu > Cr > Mn$. 湿地内部水体沉

积物重金属 RI 变幅为 62.33 ~ 856.21, 平均值为 283.43, 有 6% 的位点处于很强生态风险, 处于强生态风险程度的位点达到 31%, 其余基本处于强生态风险以下; 而湿地外部水体沉积物重金属 RI 平均值为 833.27, 最高达 2403.17, 均处于强生态风险以上, 约一半的位点处于很强风险程度, 其中南淝河有 3 个位点(62、64 和 68 号)达到了极强生态风险, 占外部水体的 14%.

3 讨论

十八联圩湿地内部水体中, 沉积物的营养盐含量相对较高(见表 7). TN 平均含量高于北方的内蒙古乌梁素海、天津海河和山东天鹅湖, 南方的云南程海和广东珠江口以及邻近的江苏太湖、洪泽湖、张家港河和湖北洞庭湖, 甚至高于 2014 年调查合肥巢湖全湖区的营养盐含量, 而低于南方的云南滇池和广东高州水库以及邻近的江苏天目湖和溧湖; TP 平均含量仅低于云南滇池, 而高于其余水体. 相比较而言, 大型湖泊和水库等水体类型, 水流速度较慢易引起营养盐的沉积; 受人为干扰严重的水体, 营养盐含量相对较高. 根据 S_{TN} 、 S_{TP} 和 FF 评价结果来看, 湿地内 TN 整体处于轻度至中度污染水平, TP 整体处于重度污染水平, 营养盐整体处于中度至重度污染水平. 结合实地调查结果, 分析得出十八联圩湿地内部水体沉积物的营养盐来源主要分为 4 方面: 水产养殖业和稻田种植、农村生活污水的排放、水草的死亡腐烂以及沟渠、河道等连接不畅. 有研究表明, 水产养殖中, 鱼类仅能吸收饲料中 30% 的磷, 其余均可以游离或颗粒状态残留在水中, 最后沉积于底泥^[11]. 农药化肥的使用, 最终也会通过降雨和径流进入河道中, 增加水中氮和磷含量^[28]. 湿地内曾拥有 2814 渔场和大量农田, 这可能是沉积物中氮和磷含量较高的主要原因. 同时, 生活污水的无序处置, 也会增加了水系统中氮磷营养盐的含量^[7]. 调查发现, 湿地内小型水系中挺水植物较多, 特别是生物入侵种如双穗雀稗和空心莲子草等分布广, 生物量大, 导致河道淤塞; 且覆盖度过高易引起水体溶解氧的耗竭, 植物腐败会释放大量的氮磷物质, 继而沉降累积于沉积物



> A: 极强; A ~ B: 很强; B ~ C: 强; C ~ D: 中等; < D: 轻微; a: 梅龙坝; b: 一道撇洪沟; c: 李六村、孙合村、洪葛村区域;
d: 2814 渔场; e: 姚埠圩; f: 马新圩; g: 秀才圩; h: 黄夏村; i: 兴隆桥大河; j: 店子口大河; k: 草沙区域;
l: 长圩; m: 七甲圩; n: 巢湖滨水; o: 沙河; p: 南淝河; q: 二道撇洪沟

图5 十八联圩湿地表层沉积物重金属潜在生态风险系数和潜在生态风险指数

Fig. 5 Potential ecological risk coefficient (E_r^i) and potential ecological risk index (RI) of heavy metals in surface sediments of the Shibalianwei Wetland

中^[29]. 湿地内河道也常年无人管制及清淤, 导致内部沟渠连接不畅, 水流缓慢, 水体的自净能力较弱^[30].

由表8可知, 与其他湿地相比, 十八联圩湿地内水体表层沉积物中的OM含量较高. 根据OI评价结果来看, OM整体处于中度至重度污染水平. 水体沉积物的OM来源又广又杂, 既包含水体自身所产生的OM, 如细菌等微生物、非维管束植物和含维管束的水生植物等^[29], 也包括外源性输入的OM^[32]. 沉积物不但可以储存OM, 也是OM矿化最

直接的场所^[33,34].

在沉积物重金属方面, 十八联圩湿地内部水体重金属含量整体而言与其他湿地相差不大(见表9). 重金属Hg和Cd污染最为严重, 37%的位点的生态风险指数处于强生态风险以上. 单丹^[39]对向海湿地的研究同样发现, Cd属于极重度污染, 污染范围大, 浓度高, 具有较高的释放风险和毒性效应; Bai等^[40]的研究也发现, 湿地中Cd含量最大, 且Cd易通过食物链产生富集作用, 影响附近生物及居民^[12]. Feng等^[41]的研究发现, Hg具有比Cd

更高的毒性效应,其释放风险和污染性更强.结合实地调查结果,分析得出十八联圩湿地内部水体沉积物的重金属来源主要由于“退耕还湿”前村民的生产生活过程中所产生的污染物,包括生活污水、

表 7 不同类型水体表层沉积物平均 TN 和 TP 含量对比

Table 7 Comparison of mean TN and TP contents in the surface sediments from different types of water bodies

研究区域	TN/mg·kg ⁻¹	TP/mg·kg ⁻¹
滇池 ^[7]	4 910	2 160
高州水库 ^[7]	3 360	780
天目湖 ^[29]	2 598	323
漏湖 ^[7]	2 208	709
程海 ^[31]	2 060	613
乌梁素海 ^[7]	1 960	560
巢湖 ^[21]	1 794	651
珠江口 ^[30]	1 649	456
太湖 ^[24]	1 349	486
洞庭湖 ^[7]	1 340	294
洪泽湖 ^[29]	1 020	580
海河 ^[31]	1 012	874
张家港河 ^[10]	894	1 025
天鹅湖 ^[7]	850	350
本研究湿地内	2 181	1 449
本研究湿地外	2 306	1 268

稻田种植和施肥除草等产生的面源性污染以及少量工业废水的无序排放.有研究表明,农药残留随径流流入水体,并转移至沉积物中,导致沉积物中的 As 与 Cd 含量升高^[42];而 Hg 可能来自于水泥产品、冶金活动或处理和焚化废物等^[43];且水体中的 OM 会增加沉积物对重金属的吸附转化^[42].根据刘朋超等^[43]对长江流域重金属污染的研究来看,巢湖的 Hg 污染程度较为严重.

表 8 不同湿地表层沉积物 OM 含量对比

Table 8 Comparison of mean organic matter content in the surface sediments from different wetlands

研究区域	OM/%
太湖湖滨带湿地 ^[35]	1.42~9.96
泉州湾海岸湿地 ^[36]	0.94~2.06
宁夏灌区湿地 ^[16]	3.22
竺山湾缓冲带内湿地 ^[15]	2.98
扎龙湿地 ^[29]	2.10
白洋淀湿地 ^[37]	1.63
东太湖湖滨湿地 ^[38]	1.40
北部湾北部滨海湿地 ^[11]	0.45
本研究湿地内	8.62
本研究湿地外	5.99

表 9 不同湿地表层沉积物重金属含量背景值/mg·kg⁻¹

Table 9 Background values of heavy metals in surface sediments of different wetlands/mg·kg⁻¹

研究区域	Mn	Cr	Cu	Pb	Cd	As	Hg
东洞庭湖湿地 ^[14]	— ¹⁾	114.52	—	45.11	0.63	24.04	0.09
黄河湿地(小白河片区) ^[44]	—	66.66	18.15	37.05	0.44	48.71	—
青海湖湿地(南北两岸) ^[45]	33.08	58.49	16.34	15.65	—	—	—
九江流域湿地 ^[46]	447.70	56.69	41.22	74.88	0.35	9.33	—
靖宇公路湿地 ^[47]	—	56.63	21.42	22.33	1.04	—	—
扎龙湿地 ^[27]	—	46.47	18.20	235.00	0.16	10.26	0.07
本研究湿地内	462.58	42.12	21.69	18.06	0.63	5.66	0.06
本研究湿地外	381.61	36.85	24.74	30.7	2.49	6.47	0.03

1) “—”表示文章中没有相关数据

沉积物营养盐和重金属的含量和来源常常呈一定的相关关系^[48].在十八联圩湿地内部水体表层沉积物中,TP 和 OM 与 Cu 的相关性均达到极显著水平,由于 OM 在沉积物氮和磷迁移转化等地球化学行为中起着至关重要的作用^[49],OM 和 TP 具有显著相关性,这同样被张华俊等^[50]在研究鹤地水库沉积物营养盐时报道.结合实地调查结果,Cu 的主要来源为含铜农药和小型加工坊,这与村民耕作和生活燃煤等关系密切^[51].于佳佳等^[52]研究太湖流域沉积物重金属中发现,Cu 与 As 的相关性显著,原因是它们具有相似的污染来源.李冰等^[53]研究丹江口水库表层沉积物营养盐与重金属的相关性发现,TN 与 Mn 呈极显著性正相关关系,与 Cu 呈正相关;TP 与 Cr、Mn、Cu 和 Pb 呈正相关关系;OM 与 Mn 和 Cu 均呈正相关关系,该研究结果与湿

地外部水体表层沉积物中两者间的相关性情况一致,说明 TN、TP 和 OM 与这 4 种重金属具有同源性,可能来自同一污染.

根据对十八联圩湿地的生态风险评价,人工湿地的建设及功能的呈现需要进一步的整治和管理.有研究表明,底泥疏浚虽能在一定程度上降低表层沉积物中的营养物质和重金属含量,但是疏浚方式的建立和潜在的生态风险均需疏浚目标污染物时进行评估^[7].目前,许多研究表明,生态修复的手段能良好地改善污染风险较高位点的生境,例如种植水生植物法、人工浮床法、微生物修复法和水生动物操纵法等^[54].对于十八联圩湿地,关于营养盐,可利用生态清淤与湿地生态农业相结合的方式,先对淤积严重或沉积物营养程度较高的水体进行清淤,继而种植湿地经济植物;同时,贯通水系,

增加水体流通性, 加强营养物质的循环; 特别在引入外源营养物质时, 应首先评价湿地系统的生态承载力. 关于重金属, 建议取消投饵型和粗放式的养殖模式; 加大退耕护岸林和退耕还湿的力度, 减少或精致化肥的使用; 关注及控制高毒性系数的重金属使用和排放, 配合对南淝河等外部水体合理清淤, 防止重金属迁入巢湖.

4 结论

(1) 十八联圩湿地内部水体 TN 处于轻度至中度污染; TP 处于重度污染; 营养盐处于中度至重度污染; OM 处于中度至重度污染. 其中, 养殖水体(原 2814 渔场)的 TN、TP 和 OM 平均含量均为最高. 湿地外部水体营养盐污染同样比较严重.

(2) 十八联圩湿地重金属对 RI 的平均贡献大小依次为: $\text{Hg} > \text{Cd} > \text{As} > \text{Pb} = \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Mn}$. 在湿地内, Cd 与 Hg 均有一定的生态风险; 在湿地外, 重金属污染严重, 均达到强生态风险以上.

参考文献:

- [1] Regueiro J, Matamoros V, Thibaut R, *et al.* Use of effect-directed analysis for the identification of organic toxicants in surface flow constructed wetland sediments[J]. *Chemosphere*, 2013, **91**(8): 1165-1175.
- [2] 殷书柏, 李冰, 沈方. 湿地定义研究进展[J]. *湿地科学*, 2014, **12**(4): 504-514.
Yin S B, Li B, Shen F. Review on studies of wetland definition[J]. *Wetland Science*, 2014, **12**(4): 504-514.
- [3] 贾晓丹. 扎龙湿地表层沉积物营养盐空间变异特征及污染程度可视化分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2012. 71.
Jia X D. The study on pollution degree of visualization and sparial variability of nutrients in surface sediments in the Zhalong Wetland[D]. Harbin: Harbin Normal University, 2012. 71.
- [4] Gu B W, Lee C G, Lee T G, *et al.* Evaluation of sediment capping with activated carbon and nonwoven fabric mat to interrupt nutrient release from lake sediments[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **599-600**: 413-421.
- [5] 方月梅, 张晓玲, 刘娟, 等. 大冶湖流域底泥重金属污染及生态风险评价[J]. *湖北理工学院学报*, 2017, **33**(5): 17-24.
Fang Y M, Zhang X L, Liu J, *et al.* Pollution and ecological risk assessment of heavy metals of sediments in Daye Lake Basin[J]. *Journal of Hubei Polytechnic University*, 2017, **33**(5): 17-24.
- [6] 高丽, 宋鹏鹏, 史衍玺, 等. 天鹅湖沉积物中营养盐和重金属的分布特征[J]. *水土保持学报*, 2010, **24**(4): 99-102, 107.
Gao L, Song P P, Shi Y X, *et al.* Distribution characteristics of nutrients and heavy metal in sediments from Swan Lake[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, **24**(4): 99-102, 107.
- [7] 熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 等. 巢湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价[J]. *环境科学*, 2016, **37**(3): 925-934.
Xiong C H, Zhang R L, Wu X D, *et al.* Distribution and pollution assessment of nutrient and heavy metals in surface sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 925-934.
- [8] 张文斌, 余辉. 洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(2): 399-406.
Zhang W B, Yu H. Vertical distribution characteristics of nutrients and heavy metals in sediments of Lake Hongze[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(2): 399-406.
- [9] 张敏. 长江中下游浅水湖泊富营养化机制与重金属污染研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(水生生物研究所), 2005. 216.
Zhang M. The mechanisms of eutrophication and heavy metal pollution in shallow lakes along the Yangze River[D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2005. 216.
- [10] 周静, 刘松华, 许伟, 等. 张家港河金港段表层沉积物中氮磷及重金属污染评价[J]. *环境与发展*, 2018, **30**(2): 8-10.
Zhou J, Liu S H, Xu W, *et al.* Pollution assessment of nitrogen, phosphorus and heavy metals in surface sediments of Zhangjiagang River Jingang section[J]. *Environment and Development*, 2018, **30**(2): 8-10.
- [11] 甘华阳, 张顺之, 梁开, 等. 北部湾北部滨海湿地水体和表层沉积物中营养元素分布与污染评价[J]. *湿地科学*, 2012, **10**(3): 285-298.
Gan H Y, Zhang S Z, Liang K, *et al.* Nutrients distribution and contamination assessment in seawater and surface sediment of the coastal wetlands, Northern Beibu Gulf[J]. *Wetland Science*, 2012, **10**(3): 285-298.
- [12] 张慧娟, 刘云根, 王妍, 等. 阳宗海湖滨湿地沉积物中重金属的空间分布特征[J]. *水生态学杂志*, 2017, **38**(2): 44-50.
Zhang H J, Liu Y G, Wang Y, *et al.* Spatial distribution of heavy metals in the sediments of Yangzonghai Lake Wetland[J]. *Journal of Hydroecology*, 2017, **38**(2): 44-50.
- [13] 张晓晶, 李畅游, 张生, 等. 乌梁素海表层沉积物营养盐的分布特征及环境意义[J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29**(9): 1770-1776.
Zhang X J, Li C Y, Zhang S, *et al.* Distribution analysis of nutrient salt in the sediment of Lake Wulangsuhai with respect to its effects on the environment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, **29**(9): 1770-1776.
- [14] 刘娜, 曾静, 李旭, 等. 东洞庭湖湿地土壤重金属污染特征及潜在生态风险评价[J]. *农业现代化研究*, 2015, **36**(5): 901-905.
Liu N, Zeng J, Li X, *et al.* Characteristics and potential ecological risk of heavy metals in wetland soils around East Dongting Lake[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2015, **36**(5): 901-905.
- [15] 魏伟伟, 叶春, 李春华. 太湖竺山湾缓冲带内湿地表层沉积物氮、磷和有机质的分布特征及评价[J]. *环境污染与防治*, 2018, **40**(5): 588-591.
Wei W W, Ye C, Li C H. Nitrogen, phosphorous and organic matter distribution characteristics and evaluation of surface sediments in wetlands of Zhushan Bay buffer zone, in Taihu Lake[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2018, **40**(5): 588-591.
- [16] 张晴雯, 杨正礼, 罗良国, 等. 宁夏灌区湿地沉积物营养盐和重金属垂向分布特征[J]. *水土保持学报*, 2011, **25**(1): 74-80.
Zhang Q W, Yang Z L, Luo L G, *et al.* Distribution of nutrients and heavy metals concentration in sediment profiles of a wetland in Ningxia irrigation Area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, **25**(1): 74-80.

- [17] 卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 等. 三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 5020-5031.
Zhuo H H, Qiu G S, Zhai W Y, *et al.* Evaluation of temporal and spatial variation characteristics of nutrients in surface sediment in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Environmental Science, 2017, **38**(12): 5020-5031.
- [18] 王妙, 王胜, 唐鹊辉, 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.
- [19] 余婷, 谢三桃, 徐迎春, 等. 环巢湖地区现代生态农业园水环境治理初探——以肥东县撮镇建华生态农业园为例[A]. 见: 加强城市水系综合治理 共同维护河湖生态健康——2016 第四届中国水生态大会论文集[C]. 海宁: 浙江省水利学会, 2016. 34-39.
- [20] 陈书琴, 储昭升, 胡社荣, 等. 巢湖周边表土中有机质、全氮和全磷空间分布及其相关性[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3031-3037.
Chen S Q, Chu Z S, Hu S R, *et al.* Spatial distribution characteristics and correlation analysis of organic matter, total nitrogen and total phosphorus in topsoil around Chaohu Lake[J]. Environmental Science, 2012, **33**(9): 3031-3037.
- [21] 苗慧, 沈峥, 蒋豫, 等. 巢湖表层沉积物氮、磷、有机质的分布及污染评价[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(12): 2120-2125.
Miao H, Shen Z, Jiang Y, *et al.* Distribution characteristics and pollution assessment of nitrogen, phosphorus and organic matter in surface sediments of Chaohu Lake [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, **26**(12): 2120-2125.
- [22] 王永华, 刘振宇, 刘伟, 等. 巢湖合肥区底泥污染物分布评价与相关特征研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2003, **39**(4): 501-506.
Wang Y H, Liu Z Y, Liu W, *et al.* Distribution and correlation characteristics between pollutants in sediment in Chaohu Lake, China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2003, **39**(4): 501-506.
- [23] 刘海艳, 李跃鹏, 姚志宏, 等. 离子色谱技术在土壤离子监测中的应用[J]. 安徽农业科学, 2016, **44**(3): 166-168.
Liu H Y, Li Y P, Yao Z H, *et al.* Application of ion chromatography technique in soil ion monitoring[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, **44**(3): 166-168.
- [24] 杨洋, 刘其根, 胡忠军, 等. 太湖流域沉积物碳氮磷分布与污染评价[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(12): 3057-3064.
Yang Y, Liu Q G, Hu Z J, *et al.* Spatial distribution of sediment carbon, nitrogen and phosphorus and pollution evaluation of sediment in Taihu Lake Basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(12): 3057-3064.
- [25] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [26] 李增福, 朱继业, 王腊春. 合肥市城市土壤重金属元素含量及空间分布特征[J]. 城市环境与城市生态, 2009, **22**(3): 24-27.
Li Z F, Zhu J Y, Wang L C. Heavy metal contents and their spatial distribution in urban soil of Hefei City [J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2009, **22**(3): 24-27.
- [27] 叶华香, 臧淑英, 张丽娟, 等. 扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2013, **34**(4): 1333-1339.
Ye H X, Zang S Y, Zhang L J, *et al.* Distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Zhalong Wetland [J]. Environmental Science, 2013, **34**(4): 1333-1339.
- [28] 陈栩璇. 浅谈水体富营养化及其生物防治措施[J]. 江西化工, 2018, (2): 213-215.
Chen X X. Introduction to eutrophication of water and its biological control measures [J]. Jiangxi Chemical Industry, 2018, (2): 213-215.
- [29] 叶华香, 臧淑英, 肖海丰, 等. 扎龙湿地表层沉积物营养盐空间分布特征及评价[J]. 自然资源学报, 2013, **28**(11): 1966-1976.
Ye H X, Zang S Y, Xiao H F, *et al.* Spatial distribution and evaluation of nutrients in surface sediments of Zhalong Wetland [J]. Journal of Natural Resource, 2013, **28**(11): 1966-1976.
- [30] 岳维忠, 黄小平, 孙翠慈. 珠江口表层沉积物中氮、磷的形态分布特征及污染评价[J]. 海洋与湖沼, 2007, **38**(2): 111-117.
Yue W Z, Huang X P, Sun C C. Distribution and pollution of nitrogen and phosphorus in surface sediments from the Pearl River Estuary[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2007, **38**(2): 111-117.
- [31] 程先, 孙然好, 孔佩儒, 等. 海河流域水体沉积物碳、氮、磷分布与污染评价[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(8): 2679-2686.
Cheng X, Sun R H, Kong P R, *et al.* Spatial distribution characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus and pollution status evaluation of sediments in the Haihe River Basin, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, **27**(8): 2679-2686.
- [32] 闫兴成, 王明玥, 许晓光, 等. 富营养化湖泊沉积物有机质矿化过程中碳、氮、磷的迁移特征[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 306-313.
Yan X C, Wang M Y, Xu X G, *et al.* Migration of carbon, nitrogen and phosphorus during organic matter mineralization in eutrophic lake sediments [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(2): 306-313.
- [33] Cole J J, Prairie Y T, Caraco N F, *et al.* Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget[J]. Ecosystems, 2007, **10**(1): 172-185.
- [34] Tranvik L J, Downing J A, Cotner J B, *et al.* Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate [J]. Limnology and Oceanography, 2009, **54**(6part2): 2298-2314.
- [35] 王莹, 胡维平. 太湖湖滨湿地沉积物营养元素分布特征及其环境意义[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(1): 204-210.
Wang Y, Hu W P. Nutrients distribution characteristics and their environmental significance of Taihu lakeside wetland sediments [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(1): 204-210.
- [36] 王爱军, 陈坚, 李东义, 等. 泉州湾海岸湿地沉积物 C、N 的空间变化[J]. 环境科学, 2007, **28**(10): 2361-2368.
Wang A J, Chen J, Li D Y, *et al.* Spatial variations of carbon and nitrogen in coastal wetland sediments of Quanzhou Bay in China [J]. Environmental Science, 2007, **28**(10): 2361-2368.
- [37] 杨卓. 白洋淀底泥现状评价及在芦苇生境下演变机理研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2006. 84.
Yang Z. Assessment on pollution status of sediment in Baiyangdian Lake and an elementary research of the transformation mechanism of under Reed's biophere [D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2006. 84.

- [38] 荆磊. 东太湖湖滨湿地净化功能的示范研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2011. 49.
- Jing L. Demonstration study on purification functions of aquatic-terrestrial wetland in East Taihu Lake[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2011. 49.
- [39] 单丹. 向海湿地沉积物中重金属污染现状及潜在生态风险评价[D]. 长春: 吉林农业大学, 2008. 60.
- Shan D. The assessment of present situation and potential ecological risk of heavy metal pollution in wetland sediment of Xianghai[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2008. 60.
- [40] Bai J H, Yang Z F, Cui B S, *et al.* Some heavy metals distribution in wetland soils under different land use types along a typical plateau lake, China[J]. Soil and Tillage Research, 2010, **106**(2): 344-348.
- [41] Feng J X, Zhu X S, Wu H, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of a typical restored mangrove-aquaculture wetland in Shenzhen, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, **124**(2): 1033-1039.
- [42] 丁云霄, 叶庆林, 孙庆业. 巢湖3条入湖河流表层沉积物重金属生态风险评价[J]. 安徽农业大学学报, 2018, **45**(5): 895-902.
- Ding Y X, Ye Q L, Sun Q Y. Ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of three inflow rivers of Chaohu Lake[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2018, **45**(5): 895-902.
- [43] 刘朋超, 麻泽浩, 魏鹏刚, 等. 长江流域重金属污染特征及综合防治研究进展[J]. 三峡生态环境监测, 2018, **3**(3): 33-37.
- Liu P C, Ma Z H, Wei P G, *et al.* Progress of researches on heavy metal pollution characteristics and comprehensive prevention and control in the Yangtze River Basin[J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2018, **3**(3): 33-37.
- [44] 韩剑宏, 杜方圆, 李卫平, 等. 黄河湿地(小白河片区)土壤重金属风险评价[J]. 江苏农业科学, 2017, **45**(7): 239-243.
- Han J H, Du F Y, Li W P, *et al.* Risk assessment of heavy metals in wetland soils of the Yellow River[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, **45**(7): 239-243.
- [45] 李洪伟, 邓一荣, 刘丽丽. 青海湖典型湿地土壤重金属分布特征[J]. 山东工业技术, 2017, (11): 238.
- [46] 林承奇, 黄华斌, 胡恭任, 等. 九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 453-460.
- Lin C Q, Huang H B, Hu G R, *et al.* Assessment of the speciation and pollution of heavy metals in paddy soils from the Jiulong River Basin[J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 453-460.
- [47] 贺元源, 吕岩, 汪之凡, 等. 靖宇公路沿线草炭土湿地地区重金属污染研究[J]. 公路, 2018, **63**(3): 152-157.
- He Y Y, Lyu Y, Wang Z F, *et al.* Study of heavy metal pollution in turfy soil and wetland area along highways in Jingyu[J]. Highway, 2018, **63**(3): 152-157.
- [48] 薄录吉, 王德建, 张刚, 等. 苏南典型村镇河网区沉积物重金属与营养盐污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(5): 1033-1040.
- Bo L J, Wang D J, Zhang G, *et al.* Assessment of heavy metal and nutrient pollution in surface sediments from rural river network in South-ern Jiangsu Province, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(5): 1033-1040.
- [49] 朱广伟, 陈英旭. 沉积物中有机质的环境行为研究进展[J]. 湖泊科学, 2001, **13**(3): 272-279.
- Zhu G W, Chen Y X. A review of geochemical behaviors and environmental effects of organic matter in sediments[J]. Journal of Lake Sciences, 2001, **13**(3): 272-279.
- [50] 张华俊, 陈修康, 韩博平, 等. 鹤地水库沉积物营养盐及重金属分布和污染特征分析[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1167-1175.
- Zhang H J, Chen X K, Han B P, *et al.* Distribution and pollution characteristics of nutrients and heavy metals in sediments of Hedi Reservoir[J]. Environmental Science, 2012, **33**(4): 1167-1175.
- [51] 朱青青, 王中良. 中国主要水系沉积物中重金属分布特征及来源分析[J]. 地球与环境, 2012, **40**(3): 305-313.
- Zhu Q Q, Wang Z L. Distribution characteristics and source analysis of heavy metals in sediments of the main river systems in China[J]. Earth and Environment, 2012, **40**(3): 305-313.
- [52] 于佳佳, 尹洪斌, 高永年, 等. 太湖流域沉积物营养盐和重金属污染特征研究[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(6): 2287-2294.
- Yu J J, Yin H B, Gao Y N, *et al.* Characteristics of nutrient and heavy metals pollution in sediments of Taihu watershed[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(6): 2287-2294.
- [53] 李冰, 王亚, 郑钊, 等. 丹江口水库调水前后表层沉积物营养盐和重金属时空变化[J]. 环境科学, 2018, **39**(8): 3591-3600.
- Li B, Wang Y, Zheng Z, *et al.* Temporal and spatial changes in sediment nutrients and heavy metals of the Danjiangkou Reservoir before and after water division of the mid-route project[J]. Environmental Science, 2018, **39**(8): 3591-3600.
- [54] 张希涛, 毕正刚, 车纯广, 等. 黄河三角洲滨海湿地生态问题及其修复对策研究[J]. 安徽农业科学, 2019, **47**(5): 84-87, 91.
- Zhang X T, Bi Z G, Che C G, *et al.* Research on ecological issues and restoration strategies of degraded coastal wetlands in the Yellow River Delta[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, **47**(5): 84-87, 91.

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)