

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



2020

Vol.41 No.12
第41卷 第12期

目次(卷终)

我国地级及以上城市臭氧污染来源及控制区划分	闫慧, 张维, 侯墨, 李银松, 高平, 夏青, 孟晓艳, 范丽雅, 叶代启 (5215)
2015~2018年我国PM _{2.5} 健康损害价值的动态评估	李惠娟, 周德群, 魏永杰 (5225)
2011~2017年中国PM _{2.5} 多尺度时空分异特征分析	杨文涛, 谯鹏, 刘贤赵, 雷雨亮 (5236)
关中地区PM _{2.5} 时空演化及人口暴露风险	黄晓军, 祁明月, 李艳雨, 王森, 黄馨 (5245)
中原城市冬季两次重污染形成机制及来源	贾佳, 丛怡, 高清敏, 王玲玲, 杨静静, 张国辉 (5256)
西北工业城市冬季PM _{2.5} 污染特征及理化性质	杨燕萍, 陈强, 王莉娜, 杨丽丽 (5267)
基于PMF模型的PM _{2.5} 中金属元素污染及来源的区域特征分析	邓林俐, 张凯山, 殷子渊, 李欣悦, 武文琪, 向梓鹏 (5276)
重庆主城区降尘中重金属污染特征及评价	张夏, 刘斌, 肖柏林, 王佳, 万达 (5288)
鄂尔多斯市夏秋季气溶胶新粒子生成过程影响因素分析	孔祥晨, 王红磊, 张连霞, 呼群, 李瑞峰, 许彩琴 (5295)
杭州市城区挥发性有机物污染特征及反应活性	景盛翱, 高雅琴, 沈建东, 王倩, 彭亚荣, 李英杰, 王红丽 (5306)
成都市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王波, 李英杰, 王成辉, 刘政, 钱骏 (5316)
石家庄市挥发性有机物和臭氧的污染特征及源解析	王帅, 崔建升, 冯亚平, 刘大喜, 陈静, 田亮, 冯超, 王梦璇, 王学臣, 王婷婷 (5325)
厦门市工业源VOCs排放清单及控制对策分析	吴冬阳, 庄马展, 吴艳聪, 金磊, 吴义诚, 高攀峰, 刘建福, 金月正, 潘亚雷, 傅海燕 (5336)
建筑胶黏剂使用VOCs排放系数与排放清单	梁小明, 孙西勃, 苏燕花, 黄礼海, 陈锋, 任璐, 卢清, 赖君怡, 陈朋龙, 陈来国 (5345)
我国西北工业区城市大气多氯联苯来源及健康风险	毛潇萱, 李子璇, 宋世杰, 章晓冬, 高宏, 李春新, 黄韬, 马建民 (5352)
基于广州塔观测的城市近地面甲醛垂直分布特征	黄山, 裴成磊, 张莹, 宋奇聪, 齐吉朋, 赵一鸣, 王鸣, 邵敏 (5362)
新水沙条件下长江中下游干流水体总磷时空变化分析	卓海华, 姜保峰, 吴云丽, 王瑞琳, 陈杰, 兰静 (5371)
三峡库区汉丰湖水体氮磷及化学计量比季节变化特征	钱田, 黄祺, 何丙辉, 李天阳, 刘淑婧, 付适, 曾荣昌, 向可翠 (5381)
衡水湖沉积物营养盐形态分布特征及污染评价	张嘉雯, 魏健, 刘利, 王俭, 朱元荣, 段亮 (5389)
宜兴市横山水库底泥内源污染及释放特征	崔会芳, 陈淑云, 杨春晖, 唐婉莹, 殷鹏, 尹洪斌 (5400)
梅江流域清凉山水库沉积物重金属污染、生态风险评价及来源解析	江涛, 林伟稳, 曹英杰, 黎坤, 翟映雪, 李睿, 陈建耀 (5410)
汉江流域金水河与淇河潜在硝化速率及硝化功能基因的影响因子	赵彬洁, 王旭, 张健, 谭香, 何睿, 周全, 史航, 张全发 (5419)
山东省滨海旅游度假区水体环境典型全氟化合物污染特征及潜在生态风险	王世亮, 曹雪稚 (5428)
太湖重点区域多介质水体中有机磷酸酯的分布特征及来源解析	吕佳佩, 张振飞, 刘杨, 张恒, 王春英, 罗莹, 郭昌胜, 徐建 (5438)
岩溶地下水水体中有机氯农药和多氯联苯的残留特征及健康风险评价	叶凯, 孙玉川, 贾亚男, 朱琳跃, 徐昕 (5448)
澜沧江硅藻的地理分布模式与关键驱动因素	孙胜浩, 陈娟, 王沛芳, 王超, 王洵, 苗令占, 刘胜, 袁秋生 (5458)
白洋淀优势鱼类中喹诺酮类抗生素的生物累积特征及其与环境因子相关性	申立娜, 付雨, 张璐璐, 秦珊, 剧泽佳, 姚波, 崔建升 (5470)
生物炭粒径对负载MgO生物炭吸附水体中磷的影响	王鹏飞, 甄蒙蒙, 储昭升, 崔冠楠 (5480)
Bi ₂ MoO ₆ /Bi ₂ S ₃ 异质结光催化降解四环素-铜复合物	黄文鑫, 魏虎, 蒋彩云, 王玉萍 (5488)
超滤膜负载UiO-66@Fe ₃ O ₄ @UiO-66强化PPCPs去除和膜污染控制	尹越, 吴道文, 孙梦瑶, 吕路, 张炜铭 (5500)
低温季节水平潜流和垂直潜流人工湿地尾水深度处理中试	廖雪珂, 严晗璐, 王智源, 陈诚, 何东, 吴月龙, 陈求稳 (5509)
盐度渐增对水解微生物群落结构与功能的影响	高京, 张少华, 王锐, 金鹏康 (5518)
限NH ₄ ⁺ 和限NO ₂ ⁻ 厌氧氨氧化系统的运行特性及微生物种群特征	宋家俊, 朱明奕, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良 (5527)
厌氧氨氧化菌富集培养过程微生物群落结构及多样性	闫冰, 夏嵩, 桂双林, 付嘉琦, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (5535)
二价铁活化过氧化钙提高剩余活性污泥的脱水性能	毕薇薇, 阮书瑜, 陈昊傲啸, 梁方艺, 陈智文, 谢松儒, 唐晶, 邓靖 (5544)
中国北方某城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析	赵靓, 梁云平, 陈倩, 徐谦, 荆红卫 (5552)
我国南方水稻产地镉环境质量类别划分技术	窦韦强, 安毅, 秦莉, 林大松, 董明明 (5562)
晒在土壤-农作物系统中的分布特征及富硒土壤阈值	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周皎, 何忠庠, 梁绍标, 董金秀, 苏黎明 (5571)
广东鼻咽癌高发区土壤-作物系统重金属迁移特征及健康风险评价	叶脉, 张景茹, 张路路, 李朝晖, 李兴远, 周永章 (5579)
胺鲜酯与螯合剂GLDA联合强化柳枝稷吸收积累镉效果	王正, 孙兆军, SAMEH Mohamed, 王珍, 何俊, 韩磊 (5589)
毛竹遗态Fe/C复合材料对As(V)污染土壤的钝化修复性能	赵宁宁, 何豪, 冯国杰, 朱宗强, 方雅莉, 李超, 朱义年, 张立浩 (5600)
大麦虫幼虫肠道菌群对聚苯乙烯泡沫塑料降解	杨莉, 刘颖, 高婕, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮 (5609)
1株耐油甲醛降解菌的分离鉴定及降解特性	韩茜, 王蓉蓉, 史纯珍 (5617)
铜尾矿白羊草叶际和根际细菌群落特征	贾彤, 姚玉珊, 王瑞宏 (5628)
生物炭施用对再生水灌溉空心菜根际微生物群落结构及多样性的影响	崔丙健, 崔二革, 胡超, 樊向阳, 高峰 (5636)
废弃物基水热炭改良对水稻产量及氮素吸收的影响	侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余嫻, 杨林章 (5648)
基于GIS和PMF模型的石嘴山市土壤多环芳烃空间分布及来源解析	夏子书, 王玉玉, 钟艳霞, 白一茹, 王幼奇, 杨帆, 李鸣骥 (5656)
氮肥和秸秆还田方式对麦玉轮作土壤N ₂ O排放的影响	许宏伟, 李娜, 冯永忠, 任广鑫, 谢呈辉, 吕宏菲, 马星霞, 郝嘉琪 (5668)
《环境科学》第41卷(2020年)总目录	(5677)
《环境科学》征订启事(5344)	
《环境科学》征稿简则(5361)	
信息(5287, 5499, 5508)	

衡水湖沉积物营养盐形态分布特征及污染评价

张嘉雯^{1,2}, 魏健², 刘利^{1*}, 王俭¹, 朱元荣², 段亮²

(1. 辽宁大学环境学院, 沈阳 110036; 2. 中国环境科学研究院水环境治理研究室, 北京 100012)

摘要:以衡水湖为研究对象,于2019年3月采集具有代表性的11个点位的表层沉积物,对衡水湖沉积物中碳、氮和磷营养盐进行形态分布特征分析。结果表明,衡水湖沉积物中有机质(TOC)含量为93.226 mg·g⁻¹,其含量较高,导致潜在氮源释放风险可能较高。总氮(TN)含量为1.850 mg·g⁻¹,属中度污染;氮形态含量及其占TN比依次为:残渣态氮(Res-N, 0.973 mg·g⁻¹, 52.57%)>弱酸可提取态氮(WAEF-N, 0.531 mg·g⁻¹, 28.69%)>强氧化剂可提取态氮(SOEF-N, 0.208 mg·g⁻¹, 11.23%)>离子交换态氮(IEF-N, 0.088 mg·g⁻¹, 4.77%)>强碱可提取态氮(SAEF-N, 0.051 mg·g⁻¹, 2.75%),进一步表明衡水湖沉积物氮释放风险相对较高。总磷(TP)含量为1.020 mg·g⁻¹,其中无机磷(IP)含量为0.839 mg·g⁻¹,占TP含量的82.27%,属中度污染;磷形态含量及占IP比依次为:钙结合态磷(Ca-P, 0.440 mg·g⁻¹, 52.44%)>残渣磷(Res-P, 0.200 mg·g⁻¹, 23.84%)>可还原态磷和金属氧化物结合态磷(Fe-P和Al-P, 0.169 mg·g⁻¹, 20.14%)>弱吸附态磷(NH₄Cl-P, 0.030 mg·g⁻¹, 3.58%),总体而言,衡水湖沉积物磷释放风险相对较低。基于C/N、C/P和N/P特征分析表明,衡水湖沉积物中有机质主要是来自陆生禾本科和莎草科陆生高等植物,沉积物中磷主要受陆源输入的影响。相关性分析表明,衡水湖沉积物中碳、氮和磷之间相关性较弱,三者的来源可能不同;各形态磷之间的相关性强于各形态氮,可能表明各形态磷具有很好的同源性,而各形态氮来源多样且复杂。通过有机指数与有机氮评价湖区污染状况表明,衡水湖沉积物营养盐污染程度严重,达到IV级标准,建议对沉积物中氮潜在风险进行有效管控。

关键词:衡水湖; 沉积物; 营养盐; 特征分析; 污染评价

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)12-5389-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202004237

Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients in Hengshui Lake Sediments

ZHANG Jia-wen^{1,2}, WEI Jian², LIU Li^{1*}, WANG Jian¹, ZHU Yuan-rong², DUAN Liang²

(1. College of Environmental Sciences, Liaoning University, Shenyang 110036, China; 2. Department of Water Environment Treatment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Considering Hengshui Lake as the research object, the representative surface sediments at eleven points were collected in March 2019, and the morphological distribution characteristics of carbon, nitrogen, and phosphorus nutrients in the lake sediments were analyzed. The results showed that the total organic carbon (TOC) content in Hengshui Lake sediments was 93.226 mg·g⁻¹, which might lead to a higher risk of potential nitrogen source release. The total nitrogen (TN) content was 1.850 mg·g⁻¹, which was a moderate pollution load; the contents of various nitrogen forms and the proportions in TN were Res-N (0.973 mg·g⁻¹, 52.57%)>WAEF-N (0.531 mg·g⁻¹, 28.69%)>SOEF-N (0.208 mg·g⁻¹, 11.23%)>IEF-N (0.088 mg·g⁻¹, 4.77%)>SAEF-N (0.051 mg·g⁻¹, 2.75%). These results further indicated that the risk of nitrogen release from sediments in Hengshui Lake was relatively high. The content of total phosphorus (TP) was 1.020 mg·g⁻¹ and that of inorganic phosphorus (IP) was 0.839 mg·g⁻¹, accounting for 82.27% of the TP content, which was a moderate pollution load; the average content of various phosphorus forms and the proportions in IP were Ca-P (0.440 mg·g⁻¹, 52.44%)>Res-P (0.200 mg·g⁻¹, 23.84%)>Fe-P and Al-P (0.169 mg·g⁻¹, 20.14%)>NH₄Cl-P (0.030 mg·g⁻¹, 3.58%). In general, the risk of phosphorus release from sediments in Hengshui Lake was relatively low. The analysis of C/N, C/P, and N/P characteristics showed that the organic matter in Hengshui Lake sediments mainly originated from terrestrial grasses and sedge plants, and the phosphorus in the sediments was mainly affected by terrestrial input. Correlation analysis showed that the correlation between carbon, nitrogen, and phosphorus in Hengshui Lake sediment was weak, and the sources of the three nutrients might be different; the correlation between each form of phosphorus was stronger than that of each form of nitrogen, and each form of phosphorus had very good homology. The sources of various forms of nitrogen were diverse and complex. The pollution status of the lake area was evaluated by organic index and organic nitrogen. The results showed that the nutrient pollution in Hengshui Lake sediments was serious, reaching the Grade IV standard. The potential risk of nitrogen in sediments should be taken seriously and effectively controlled.

Key words: Hengshui Lake; sediment; nutrients; characteristic analysis; pollution assessment

湖泊作为重要的地表水资源,与人类生产生活密切相关^[1]。然而,随着湖泊资源的开发和利用,以及外源营养盐大量输入,湖泊富营养化及其带来的生态环境问题日益严重,甚至已成为全球湖泊面临

收稿日期: 2020-04-27; 修订日期: 2020-06-08

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2019YSKY-009)

作者简介: 张嘉雯(1995~),女,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制与治理, E-mail: ZhangJW8609@163.com

* 通信作者, E-mail: liul215@163.com

的主要问题之一,是当前国际水资源和水生态领域的研究热点^[2]. 近年来,随着外源营养盐输入得到有效控制,长期输入累积的内源营养物质的释放已经成为一些湖泊富营养化及蓝藻水华暴发营养盐重要来源之一. 例如滇池、巢湖和太湖等湖泊,由于历史上大量的外源输入,导致沉积物中营养物大量富集,累积在沉积物中的营养物质会释放至上覆水体,沉积物中营养盐由“汇”转换成“源”,形成内源污染,由此通过湖泊沉积物中营养盐分析可以间接反映出湖泊水体污染情况^[3]. 沉积物中营养盐的控制削减对降低湖泊水体富营养化和维持水生态系统健康十分重要. 因此,研究湖泊沉积物中氮、磷和有机质的含量及其形态分布特征,评价湖泊污染状况,对控制湖泊水体富营养化和建立健康水生态系统具有重要意义.

国内外现已开展很多关于湖泊沉积物中的营养盐分布特征及污染评价的相关研究,并取得了一些研究成果^[3~10]. 衡水湖作为华北平原上第一个国家级湿地自然保护区,加强衡水湖湿地的建设和保护对维护华北平原内陆淡水湿地生态系统、调节周边乃至京津地区气候环境具有重要作用^[11,12]. 近年来,国家和地方各级政府针对衡水湖的生态环境保护开展了大量的工作,衡水湖水生态环境质量得到较好的改善,但衡水湖历史上曾有过一段污染较重的时期,对整个衡水湖生态环境的不利影响至今仍然存在,尤其是沉积物中富集的营养盐可通过内源释放进入上覆水体,形成内源污染. 近年来,衡水湖水体中氮磷超标现象时有发生,湖泊富营养化趋势明显,而沉积物形成的内源污染更是加剧了水体富营养化状态. 目前关于衡水湖营养盐方面的研究较少且年代久远,相关研究鲜见报道,针对衡水湖沉积物中营养盐分布特征及污染评价研究更是极为缺乏,为更有效地保护衡水湖生态环境,提高衡水湖生态治理与环境保护工作的针对性,本研究对衡水湖表层沉积物中营养盐形态分布特征进行解析并对其污染程度进行评价,以期对衡水湖水生态环境保护和富营养化控制提供理论支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

衡水湖自然保护区位于河北省衡水市境内,地跨桃城、冀州两区,2003 年被评为国家级自然保护区,保护区总面积 163.65 km²,湖泊蓄水总面积 75 km²(冀州境内 57 km²,桃城区境内 18 km²),分为东、西两湖,最大蓄水能力为 1.88 × 10⁸ m³. 现如今只有东湖常年蓄水,水源补给主要为定期黄河引水.

衡水湖是南水北调中线工程丹江口—北京的必经之路,亦是“南水北调”调蓄工程的枢纽^[13,14].

1.2 点位布设与样品采集

基于衡水湖湖区功能划分、水动力特征及污染源分布等因素,在衡水湖湖区设置 11 个采样点(图 1),采样点编号及地理位置信息如表 1 所示(S9、S10 和 S11 为小湖区,其余为大湖区). 2019 年 3 月使用抓斗式采样器采集该 11 个点位的表层沉积物(0~10 cm),密封保存于聚乙烯自封袋中,低温储存.

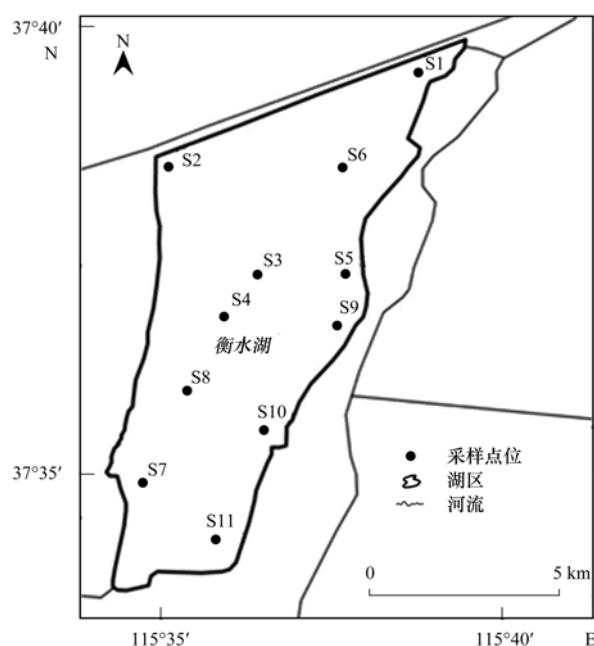


图 1 衡水湖沉积物采样点分布示意

Fig. 1 Map of sediment sampling sites in Hengshui Lake

表 1 衡水湖沉积物采样点分布地理位置信息表

Table 1 Geographic location information of sediment sampling sites in Hengshui Lake

编号	点位名称	纬度(N)	经度(E)
S1	大赵闸	37°39'24.55"	115°38'41.93"
S2	南李庄村	37°38'23.09"	115°35'27.37"
S3	大湖心	37°36'33.76"	115°36'26.86"
S4	顺民庄	37°36'45.05"	115°35'41.95"
S5	王口闸	37°36'36.76"	115°37'48.10"
S6	梅花岛	37°38'33.20"	115°37'27.01"
S7	道安寺	37°34'32.45"	115°34'43.01"
S8	前家村	37°35'23.45"	115°34'56.58"
S9	小湖王口闸	37°36'16.90"	115°36'55.72"
S10	小湖心	37°35'14.15"	115°36'15.49"
S11	小湖碧水湾酒店	37°34'22.72"	115°35'41.70"

1.3 样品的处理及测定

沉积物样品经冷冻后,剔除沙石、动植物碎片等,并混合均匀. 进一步采用玛瑙研钵研磨后过 100 目尼龙筛,装入聚乙烯塑料自封袋,放入冰箱中冷冻保存备用.

采用烧失量法^[15]将冷冻干燥后沉积物样品,称取 0.2 ~ 0.5 g,在 550℃ 下将样品置于马弗炉中干烧 3 h,根据质量差法测定沉积物样品中有机质 (TOC) 含量。

采用 SMT 法^[16]提取沉积物样品中总磷 (TP)、无机磷 (IP) 和有机磷 (OP)。采用基于 Rydin^[17]改进的连续提取法对沉积物中无机磷形态进行连续分级提取,依次获得弱吸附态磷 ($\text{NH}_4\text{Cl-P}$)、金属氧化物结合态磷 (Al-P)、可还原态磷 (Fe-P)、钙结合态磷 (Ca-P) 和残渣磷 (Res-P)。经过适当稀释后采用磷钼蓝法^[18]对提取液中各形态磷进行定量分析。

采用过硫酸盐氧化法^[19]测定沉积物中总氮 (TN)。采用化学连续提取法^[20]对沉积物中可转化态氮 (TTN) 进行连续分级提取,依次获得离子交换态氮 (IEF-N)、弱酸可提取态氮 (WAEF-N)、强碱可提取态氮 (SAEF-N)、强氧化剂可提取态氮 (SOEF-N),各提取液经过适当稀释后参考文献^[21],分别采用纳氏试剂分光光度法和重氮偶合分光光度法测定稀释液中的 NH_4^+-N 和 NO_2^--N ,通过 Zn-Cd 还原后

采用重氮偶合分光光度法^[22]测定 NO_3^--N 。最后残渣态氮 (Res-N) 以总氮 (TN) 与其他各提取态氮差值获得^[23]。

2 结果与讨论

2.1 沉积物有机质含量及其分布特性

碳不仅是沉积物中的重要营养元素之一,也是氮、磷迁移转化的重要载体,对水体富营养化有着重要的影响^[24]。而沉积物中的 TOC 作为自然界中一种重要胶体,能够与重金属和有机物等发生一系列复杂的物理和化学反应,是反映水体沉积物营养程度的重要标志^[25]。衡水湖沉积物中 TOC 含量范围为 33.014 ~ 191.350 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,其平均含量为 93.226 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (图 2),可以看出衡水湖沉积物 TOC 含量空间差异较大,就空间分布而言,S6 和 S8 的沉积物 TOC 含量较低,分别为 33.014 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 48.208 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,低于平均值,S4 和 S10 的沉积物 TOC 含量较高,分别为 132.340 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 191.350 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,其整体分布呈现中部区高,北部区低的特征。

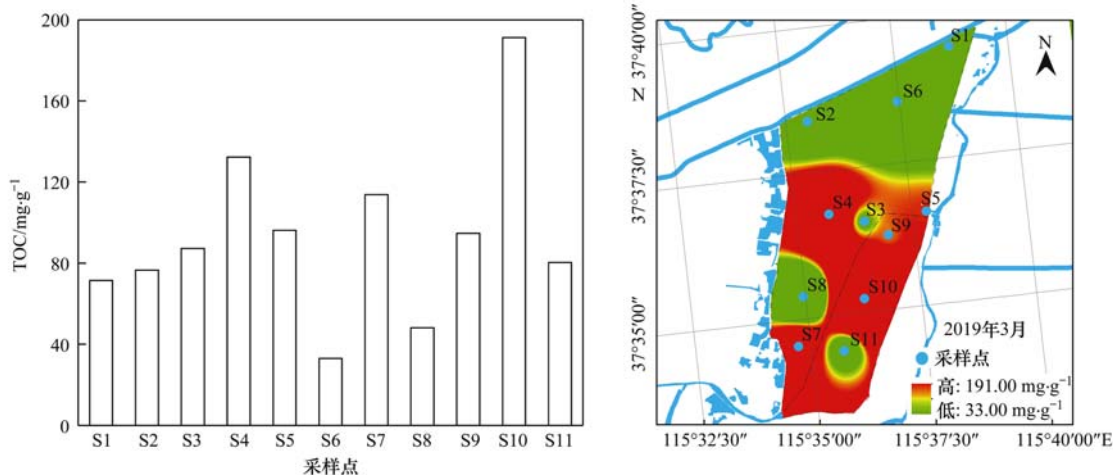


图 2 衡水湖 TOC 含量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of TOC content in Hengshui Lake

有研究表明,TOC 对释放 TN 有较大的影响,沉积物中 TOC 含量越高,所释放 TN 的量也就越大。通常情况下,表层沉积物中有机物质含量较高时,有机氮和氨氮是表层沉积物中氮的主要存在形式。因此,TOC 在湖泊沉积物中的沉积可能成为湖泊氮的重要来源^[26,27]。可知,衡水湖沉积物 TOC 在 S6、S8 湖区含量比较低,其潜在氮源较小,其他湖区 TOC 含量较高,其潜在氮源较大。衡水湖 TOC 平均含量高于滇池^[28,29],且远高于太湖、巢湖和鄱阳湖等^[30]我国典型湖泊,可能是衡水湖湖区水生高等植物偏多,沉积物中亦包含大量腐烂植物根茎及底栖生物残体,其有机物尚未矿化,含有较高的 TOC。

2.2 沉积物不同形态氮含量及其分布特性

衡水湖沉积物中 TN 含量为 1.638 ~ 2.042 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,其平均含量为 1.850 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (图 3),其中,S7 点位沉积物 TN 值最高,为 2.042 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,S10 点位沉积物 TN 值最低,为 1.638 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,其整体分布呈现西部区和北部区高,东部区低的特征。

S7 和 S8 处 TN 含量相对较大,这可能与 S7 湖区是道安寺,旅游污染贡献率大,接受外源氮的总量多,且 S7 和 S8 点位附近从未进行过沉积物清淤有关。TN 空间分布差异较小,从总体平均值来看,大湖区污染比小湖区严重,推测大湖区受外源输入的影响比小湖区大。根据 EPA 制定的分类标准,衡水湖湖区 TN 平均值在 1 ~ 2 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间^[31],属中度

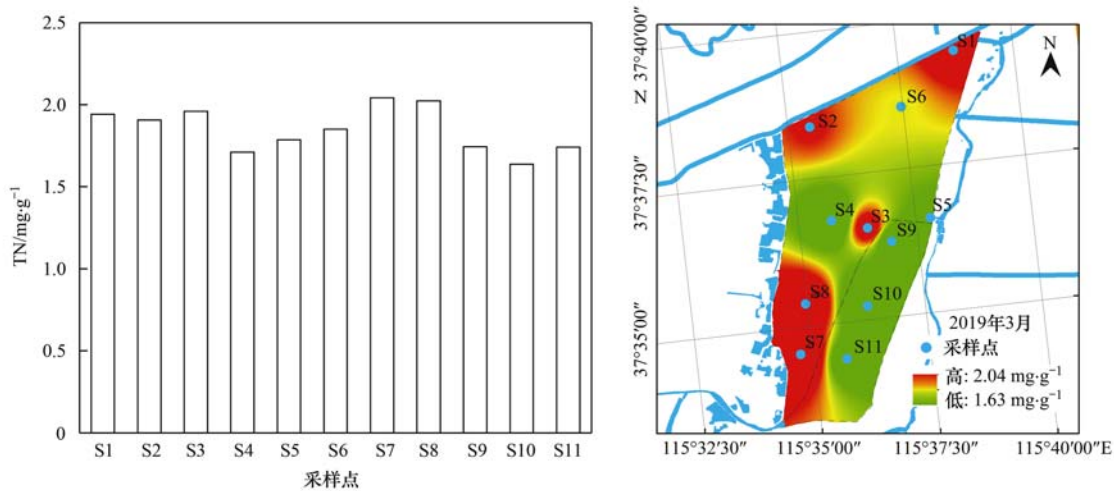


图3 衡水湖 TN 含量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of TN content in Hengshui Lake

污染. 可知,衡水湖沉积物受到一定程度的氮污染.

可转化态氮(TTN)是表层沉积物氮素中最“活跃”的形态,受物理、化学、生物及地质等多方面影响,TTN 不仅直接参与氮循环,还可能通过早期成岩作用转化为颗粒物中相对惰性的氮^[32]. TTN 根据结合强度分为离子交换态氮(IEF-N)、弱酸可提取态氮(WAEF-N)、强碱可提取态氮(SAEF-N)和强氧化剂可提取态氮(SOEF-N). 一般情况,IEF-N 是所有可转化态氮中结合能力最弱的,最容易被释放并参与湖泊系统氮循环;WAEF-N 的结合能力相当于碳酸盐的结合能力,其释放能力稍低于 IEF-N;SAEF-N 的结合能力相当于铁锰氧化物的结合能力,稍高于 WAEF-N,故其释放能力稍低于 WAEF-N. 即 3 种无机形态的可转化态氮释放能力为 IEF-N > WAEF-N > SAEF-N. SOEF-N 也称为可转化态有机氮和其它惰性氮,主要是有机形态的氮和强结合态氮,其释放能力比可转化态无机氮的释放能力弱,是 4 种可转化态氮中最弱的,也是最难被释放参与氮循环的形态^[27].

衡水湖沉积物中各种氮形态的平均含量及其在 TN 占比依次为: Res-N($0.973 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 52.57%) > WAEF-N ($0.531 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 28.69%) > SOEF-N ($0.208 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 11.23%) > IEF-N ($0.088 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 4.77%) > SAEF-N ($0.051 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 2.75%),如图 4 所示. TTN 含量差异较大,WAEF-N 含量最高,SAEF-N 含量最小. 各形态氮的空间分布差异较大,可能与各点位自身性质及周围环境条件有关,其中 S9 点位 WAEF-N 的含量高于其他点位;SAEF-N 的含量分布较为复杂,S7 点位的含量明显高于其他点位;S9 点位 SOEF-N 的含量相对高于其他点位. 衡水湖沉积物中 TTN 在 TN 的平均占比 47.43%,约占

TN 的一半,说明沉积物氮释放风险较强,TTN 中含量最高的较活泼的 WAEF-N 在 TN 的平均占比 28.69%,TTN 中最活泼的 IEF-N 在 TN 的平均占比 4.77%,同时结合温度和水体营养盐浓度等环境条件研究,进一步说明衡水湖沉积物氮释放风险较大.

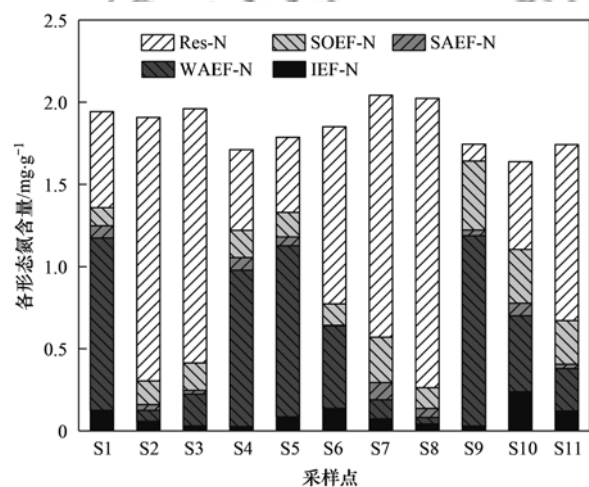


图4 衡水湖沉积物中各形态氮含量分布

Fig. 4 Content of different N forms in the sediments from Hengshui Lake

2.2.1 离子交换态氮(IEF-N)

离子交换态氮结合能力最差,相较于其他形态氮,更易与水体发生相互作用,直接参与到生物的生命活动中^[32]. 主要由 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 组成,其中 NH_4^+ -N 的含量范围在 $0.002 \sim 0.172 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间,平均值为 $0.062 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, NO_2^- -N 的含量极少,平均值为 $0.001 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, NO_3^- -N 的含量范围在 $0.014 \sim 0.065 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间,平均值为 $0.025 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$; NH_4^+ -N 在 IEF-N 中占主导地位, NO_3^- -N 次之(图 5).

IEF-N 中 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的成岩机制存在着一一定的差异: NH_4^+ -N 主要受到 TOC 含量、氧化还原环

境的影响; NO_3^- -N 的分布与水体密切相关^[32]. 无机形态的可提取态氮中 NH_4^+ -N 对上覆水体中氮最具潜在影响. 蓝藻暴发时水体中的 NH_4^+ -N 被大量利用, 浮游植物最先吸收利用 NH_4^+ -N, 此外, 沉积物中 NH_4^+ -N 的释放将有可能促进藻类的进一步大量生长^[23].

衡水湖沉积物 IEF-N 中 NH_4^+ -N 占主导地位, NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 的含量很低, 可能与沉积物中 TOC 含量高且处于强还原性环境 ($E_h < 0 \text{ mV}$) 有关, 其中 S10 点位 NH_4^+ -N 含量明显高于其他点位, 氮污染风险较大, S9 点位 NH_4^+ -N 含量明显低于其他点位, 氮污染风险较小, IEF-N 中 NH_4^+ -N 空间分布不均衡.

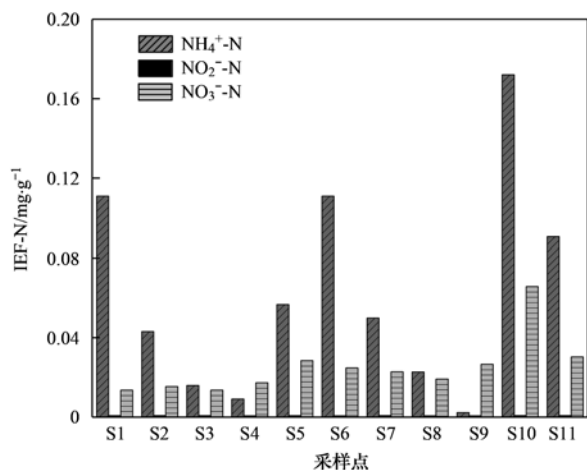


图5 沉积物离子交换态氮中 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 的分布特征

Fig. 5 Distribution of NH_4^+ -N, NO_2^- -N, and NO_3^- -N in the IEF-N of sediments

2.2.2 弱酸可提取态氮 (WAEF-N)

弱酸可提取态氮也称碳酸盐结合态氮 (CF-N), 是溶解性有机物结合的有机氮及碳酸盐结合的无机氮^[32]. 主要由 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 组成, 其中 NH_4^+ -N 的含量范围在 $0.016 \sim 1.136 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, 平均值为 $0.508 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, NO_2^- -N 的含量极少, 平均值为 $0.001 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, NO_3^- -N 的含量范围在 $0.015 \sim 0.027 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, 平均值为 $0.021 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, NH_4^+ -N 在 WAEF-N 中占主导地位, NO_3^- -N 次之 (图 6). 有研究表明, WAEF-N 也是易释放态氮, 其产生与分布主要取决于沉积物的碳酸盐和有机质含量, 同时与 pH 值密切相关^[23]. 随着碳酸盐与有机质含量的增加, WAEF-N 亦相应增加^[27].

衡水湖沉积物 WAEF-N 中 NH_4^+ -N 占主导地位, NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 的含量很低, 可能与沉积物中强还原性环境有关, 其中 S1、S4、S5 和 S9 点位 NH_4^+ -N 含量明显高于其他点位, 氮污染风险较大, S8 点位

NH_4^+ -N 含量明显低于其他点位, 氮污染风险较小, WAEF-N 中 NH_4^+ -N 空间分布不均衡. WAEF-N 作为 TN 中占比 (28.69%) 最大的一种可转化态氮形态, 可能是衡水湖所在区域属于我国北方的石灰性土壤, 沉积物碳酸盐含量高, 从而沉积物中 WAEF-N 含量占绝对优势.

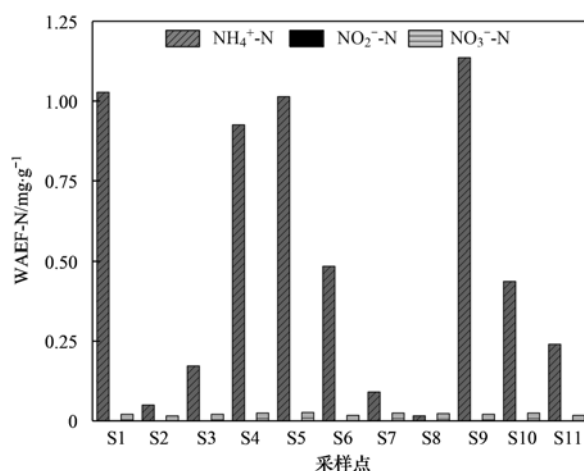


图6 沉积物弱酸可提取态氮中 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 的分布特征

Fig. 6 Distribution of NH_4^+ -N, NO_2^- -N, and NO_3^- -N in the WAEF-N of sediments

2.2.3 强碱可提取态氮 (SAEF-N)

强碱可提取态氮也称铁锰氧化态氮 (IMOF-N), 在敏感的氧化条件下与铁锰化合物结合的氮形态, 其结合能力与铁锰氧化物的结合能力不相上下^[32]. 其中 NH_4^+ -N 的含量范围在 $0.002 \sim 0.097 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, 平均值为 $0.042 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, NO_2^- -N 的含量极少, 平均值为 $0.001 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, NO_3^- -N 的含量范围在 $0.001 \sim 0.017 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, 平均值为 $0.007 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, NH_4^+ -N 在 SAEF-N 中占主导地位, NO_3^- -N 次之 (图 7).

SAEF-N 是一种对氧化还原环境敏感的氮形态, 该形态氮与铁锰化合物的结合能力与沉积物环境氧化还原特性有关, 沉积物的还原性越强, SAEF-N 含量可能越低^[27]. SAEF-N 在沉积物-水界面 pH 值升高及氧化还原电位降低时易释放于上覆水体.

衡水湖沉积物 SAEF-N 中 NH_4^+ -N 占主导地位, 其次为 NO_3^- -N, NO_2^- -N 含量最低, 这可能与沉积物中强还原性环境有关, 其中 S7 点位 NH_4^+ -N 含量明显高于其他点位, 氮污染风险较大, S6 点位 NH_4^+ -N 含量明显低于其他点位, 氮污染风险较小, SAEF-N 中 NH_4^+ -N 空间分布不均衡. 而衡水湖沉积物中 SAEF-N 含量最低, 且沉积物 $E_h < 0 \text{ mV}$, 为强还原性条件, 进一步反映由于衡水湖沉积物处于强还原性环境,

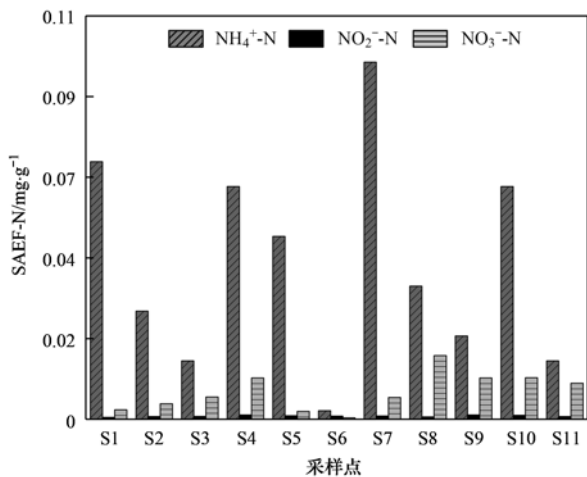


图7 沉积物强碱可提取态氮中 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N和 NO_3^- -N的分布特征

Fig. 7 Distribution of NH_4^+ -N, NO_2^- -N and NO_3^- -N in the SAEF-N of sediments

导致 SAEF-N 易释放于水体,使沉积物中 SAEF-N 含量低.

2.2.4 强氧化剂可提取态氮(SOEF-N)

强氧化剂可提取态氮也称有机物与硫化物结合态氮(OSF-N),主要指的是与有机质和硫化物结合的可转化态氮,其结合能力最强,最难被释放^[32]. 其中 NO_3^- -N的含量范围在 $0.111 \sim 0.419 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间,平均值为 $0.208 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, NO_3^- -N在SOEF-N中占主导地位. SOEF-N可在微生物和其他环境条件的作用下分解释放,是水体氮的一个重要来源^[23]. SOEF-N含量的多少与沉积物来源有关,此外氧化还原环境及TOC的释放速度、沉积物自身的吸附均会对SOEF-N分布特征造成一定影响^[32]. 一般来说,TOC含量高的沉积物,SOEF-N也越高^[27].

衡水湖沉积物SOEF-N中 NO_3^- -N占主导地位,其中S9和S10点位 NO_3^- -N含量明显高于其他点位,

氮污染风险较大,S1点位 NO_3^- -N含量明显低于其他点位,氮污染风险较小,且SOEF-N中 NO_3^- -N空间分布不均衡(图8). SOEF-N在TN占比为11.23%,占比较高,在可转化态氮中仅次于WAEF-N,可在侧面反映衡水湖沉积物TOC的高含量.

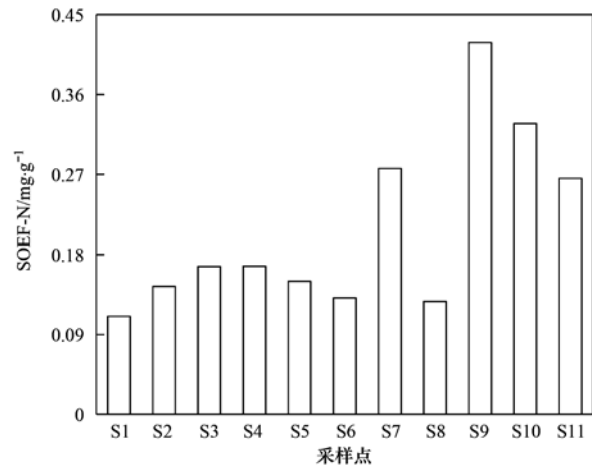


图8 沉积物强氧化剂可提取态氮中 NO_3^- -N的分布特征

Fig. 8 Distribution of NO_3^- -N in the SOEF-N of sediments

2.3 沉积物不同形态磷含量及其分布特性

衡水湖沉积物中TP含量为 $0.826 \sim 1.340 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,其平均含量为 $1.020 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 其中S7点位沉积物TP值最高,为 $1.340 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,S6点位沉积物TP值最低,为 $0.826 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (图9),其整体分布呈现东南部区高,西北部区低的特征. 其中,S7处TP含量较大,而S6处,TP的含量较小,可能是S6附近历史上曾经进行过沉积物清淤而S7附近历史上未曾进行过清淤. TP呈现出空间分布,按总体平均值来说,小湖区TP含量仍高于大湖区,说明小湖区磷污染比大湖区严重. 根据总磷的含量沉积物的污染水平分为三级,重污染水平: $\text{TP} > 1.3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$; 中等污染水平: $0.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} < \text{TP} < 1.3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$; 轻度污

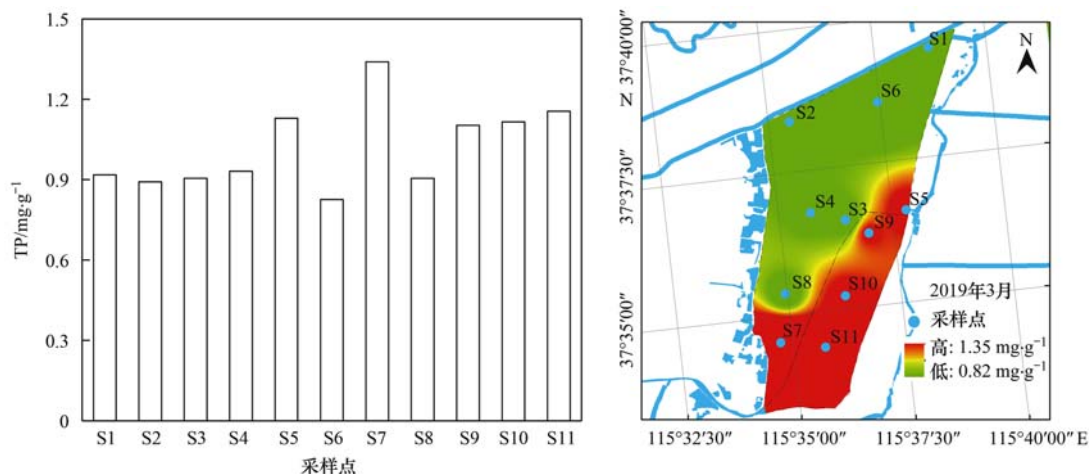


图9 衡水湖TP含量空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of TP content in Hengshui Lake

染水平: $TP < 0.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ [33], 衡水湖沉积物中总磷含量处于中等污染水平, 属中度污染. 可知, 衡水湖沉积物受到一定程度的磷污染.

衡水湖沉积物中 IP 的含量为 $0.668 \sim 1.129 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均含量为 $0.839 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 占 TP 含量的 82.27%; OP 在衡水湖沉积物中的含量为 $0.079 \sim 0.264 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均为 $0.181 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 占 TP 含量的 17.73% (图 10).

有研究表明, 湖泊沉积物中近 50%~60% 的有机磷(OP)可被降解或水解为生物可利用磷形态, 具有部分的活性, 是湖泊系统中重要的“磷蓄积库”[34]. 在厌氧释放过程中, 存在有机磷向无机磷转化, 铁磷、铝磷向钙磷、闭蓄态磷转化的趋势, 从而使沉积物中总磷含量不断减少[35]. 总体而言, 衡水湖沉积物受到一定程度的磷污染, 沉积物中的磷主要以无机磷形式存在, S6 点位 IP 含量最低, S7 点位 IP 含量较高, IP 空间分布差异较大, OP 含量很低.

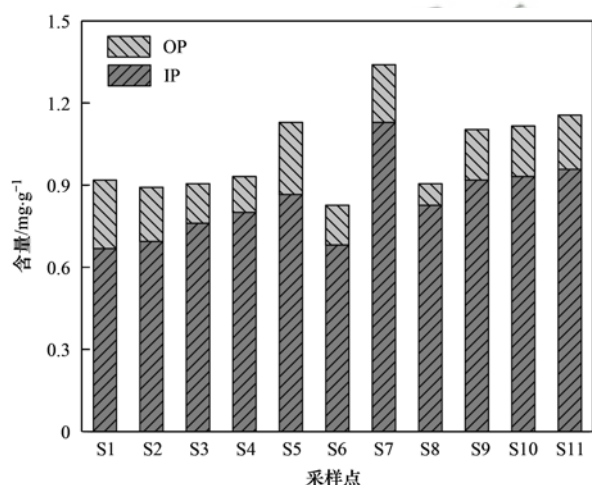


图 10 衡水湖 IP 和 OP 含量空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of IP and OP content in Hengshui Lake

2.3.1 弱吸附态磷($\text{NH}_4\text{Cl-P}$)

$\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 即松散吸附的磷, 当沉积物环境发生变化或受到扰动时, 沉积物中弱吸附态的活性磷最容易进入上层水体中, 并被生物吸收利用. 尽管弱吸附态磷在沉积物中的含量相对较小, 但却是活性最大的一种磷形态[34]. 衡水湖沉积物中 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 的含量较低, 为 $0.028 \sim 0.034 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均为 $0.030 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 约占无机磷总量的 3.58%.

2.3.2 可还原态磷(Fe-P)和金属氧化物结合态磷(Al-P)

Fe-P 和 Al-P 具有很强的释放活性, 也是内源污染负荷的重要来源之一. 当沉积物中的氧化还原环境变化时, 沉积物中的 Fe-P 与 Al-P 可转化为可溶性磷, 并通过间隙水进入上覆水体, 对湖泊水质产生

很大影响[34]. 衡水湖沉积物中 Fe-P 和 Al-P 总含量为 $0.142 \sim 0.193 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均为 $0.169 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 占无机磷的 20.14%. 与水体富营养化息息相关的 Fe-P 和 Al-P 在衡水湖沉积物中较高的含量和比例分布, 不但揭示了沉积物中较大的潜在磷源, 同时也说明了衡水湖近年来存在潜在污染, 易发生磷污染.

2.3.3 钙结合态磷(Ca-P)

Ca-P 又称为酸提取磷, 主要指与自生磷灰石、湖泊沉积碳酸钙以及生物骨骼等的含磷矿物有关的沉积磷存在形态. 由于 Ca-P 很稳定且很难被分解或转化为磷酸盐, 基本上对间隙水和上覆水中磷酸盐的富集没有贡献[34]. Ca-P 含量为 $0.358 \sim 0.618 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均含量 $0.440 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均占无机磷的 52.44%. Ca-P 是无机磷中含量比例最大的一种形态, 其原因可能为衡水湖所在区域属于我国北方的石灰性土壤, 沉积物有碎屑磷灰石存在, 从而决定了沉积物中钙结合态磷含量占绝对优势.

2.3.4 残渣磷(Res-P)

Res-P 主要指禁锢于矿物氧化物和矿物晶格中的磷, 由于难以转化为溶解磷而释放到上覆水中, 对水体富营养化几乎没有贡献, 是最稳定的一种磷[34]. Res-P 含量为 $0.107 \sim 0.297 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均含量 $0.200 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均占无机磷的 23.84%.

由图 11 可知, 衡水湖沉积物中 IP 各形态含量差异较大, Ca-P 含量最高, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量最小. 其中各点位 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、Fe-P 和 Al-P 的含量空间分布差异较小, Ca-P 含量空间分布差异较大, S7 点位 Ca-P 的含量明显高于其他位点. 衡水湖沉积物各形态磷的相对比例与其已有研究结果大体一致[36]. 衡水湖沉积物中较活泼 IP 形态的平均占比为 23.97%, 约占 IP 的 1/5, 说明沉积物磷释放风险较弱. IP 形态

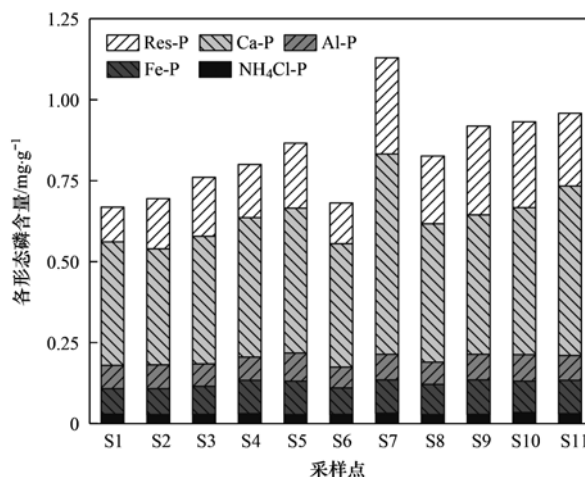


图 11 衡水湖沉积物中各形态磷含量分布

Fig. 11 Content of different P forms in the sediments from Hengshui Lake

中含量最高的较稳定的 Ca-P 与最稳定的 Res-P 在 IP 的平均占比 76.03%, 而 IP 形态中最活泼的 NH₄Cl-P 在 IP 的平均占比为 3.59%, 同时结合 pH 和溶解氧等环境条件研究, 进一步说明衡水湖沉积物磷释放风险较小。

2.4 沉积物中碳与氮、磷的关系及来源分析

2.4.1 沉积物 C/N、C/P 和 N/P 特征分析

衡水湖沉积物中 C/N 分布见表 2, 沉积物中 C/N 为 20.8 ~ 136.3, 平均值为 60.2, 空间分布差异极大。沉积物中 C/N 可以反映有机质的来源: 通常情况水生生物为 2.8 ~ 3.4; 浮游动物一般小于 7; 浮游植物为 6 ~ 14; 藻类为 5 ~ 14; 高等植物为 14 ~ 23; 维管束陆生植物通常大于 20; 而陆生禾本科或莎草科植物可以高达 45 ~ 50^[24,37]。衡水湖湖体与岸边生长有大量的芦苇蒲草, 沉积物中含有大量腐烂芦苇等植物根茎, 该类型植物可以从水体和底泥中吸收碳、氮和磷等营养物质, 并同化为自身结构组成物质, 在植物死亡后释放出这些营养物质^[38]。因此, 衡水湖沉积物中有机质可能主要是来自陆生高等植物, 芦苇蒲草等植物凋谢后残体可能是衡水湖沉积物中有机质的主要来源。

C/P 在一定程度上可以反映沉积物中有机碳和磷化合物的分解速率, 一般来说表层沉积物中 P 比 C 分解速度快^[39]。衡水湖沉积物中 C/P 分布见表 2, 沉积物中 C/P 为 103.2 ~ 442.9, 平均值为 233.1, 空间分布差异极大, 表明衡水湖表层沉积物中 P 比 C 分解速度快, 与文献^[24,39]的观点一致。

沉积物中 N、P 含量及比值通常可以综合反映水中 N、P 聚积和沉积及沉积物溶出与释放两种动态过程, 在某种程度上反映了水体中营养化状

态^[39]。衡水湖沉积物中 N/P 分布见表 2, 沉积物中 N/P 为 3.2 ~ 5.0, 空间分布上大湖区高于小湖区, 全湖平均值为 4.1, 小于 Redfield 比 (C: N: P = 106: 16: 1)^[40], 表明衡水湖沉积物中磷可能主要受陆源输入的影响。同时, 衡水湖每年引入的黄河水中可能输入大量含磷物质^[41], 据此推断衡水湖沉积物中磷主要以外源为主。

表 2 衡水湖沉积物营养盐相互关系
Table 2 Relationship between nutrients in sediments of Hengshui Lake

点位	C/N	C/P	N/P
S1	42.9	201.2	4.7
S2	46.8	221.8	4.7
S3	51.9	249.0	4.8
S4	90.2	366.9	4.1
S5	62.8	220.1	3.5
S6	20.8	103.2	5.0
S7	65.0	219.5	3.4
S8	27.8	137.6	4.9
S9	63.4	221.9	3.5
S10	136.3	442.9	3.2
S11	53.8	179.7	3.3
平均值	60.2	233.1	4.1

2.4.2 沉积物各营养盐相关性分析

由表 3 可知, 沉积物中 TOC、TN 和 TP 三者之间无显著性相关, 表明三者的来源可能有差异。TN 与 Res-N 的含量呈极显著正相关 ($r = 0.744, P < 0.01$), 且 Res-N 占 TN 含量的 52.57%, Res-N 对 TN 含量贡献率很大。各形态氮之间基本无显著相关, 表明各形态氮来源多样性与复杂性。TP 与 IP 的含量呈极显著正相关 ($r = 0.942, P < 0.01$), 且 IP 占 TP 含量的 82.27%, IP 对 TP 含量贡献率很大。TP 和 IP 都与 Fe-P、Al-P、Ca-P 和 Res-P 呈显著或极显

表 3 衡水湖沉积物中不同形态氮磷及有机质的相关系数矩阵¹⁾
Table 3 Pearson correlation coefficient matrix for nitrogen, phosphorus forms and total organic carbon in sediments

	TOC	TN	IEF-N	WAEF-N	SAEF-N	SOEF-N	Res-N	TP	IP	OP	NH ₄ Cl-P	Fe-P	Al-P	Ca-P	Res-P
TOC	1														
TN	-0.568	1													
IEF-N	0.392	-0.416	1												
WAEF-N	0.158	-0.496	-0.013	1											
SAEF-N	0.592	0.107	0.108	0.100	1										
SOEF-N	0.532	-0.465	0.153	0.155	0.141	1									
Res-N	-0.426	0.744 **	-0.235	-0.922 **	-0.141	-0.431	1								
TP	0.494	-0.124	0.169	0.002	0.531	0.657 *	-0.194	1							
IP	0.482	-0.087	0.075	-0.157	0.503	0.693 *	-0.056	0.942 **	1						
OP	0.187	-0.136	0.302	0.418	0.241	0.113	-0.423	0.470	0.146	1					
NH ₄ Cl-P	0.811 **	-0.383	0.661 *	-0.081	0.577	0.505	-0.223	0.532	0.552	0.115	1				
Fe-P	0.464	-0.425	-0.155	0.245	0.331	0.648 *	-0.404	0.734 *	0.805 **	0.044	0.298	1			
Al-P	0.612 *	-0.428	0.242	0.314	0.433	0.511	-0.484	0.769 **	0.610 *	0.661 *	0.347	0.633 *	1		
Ca-P	0.336	0.069	0.082	-0.224	0.538	0.474	0.069	0.901 **	0.939 **	0.186	0.532	0.684 *	0.465	1	
Res-P	0.523	-0.149	0.050	-0.161	0.376	0.826 **	-0.082	0.837 **	0.928 **	0.026	0.498	0.763 **	0.603 *	0.751 **	1

1) ** 表示相关性极显著 (样本数 $n = 11$, 显著性水平 $P < 0.01$); * 表示相关性显著 (样本数 $n = 11$, 显著性水平 $P < 0.05$)

显著相关关系,其中 Ca-P 与 TP 和 IP 呈极显著正相关($r=0.901, P<0.01$; $r=0.939, P<0.01$),且 Ca-P 在 TP 和 IP 占比分别为 43.21% 和 52.59%,Ca-P 对磷含量贡献率很大,结合之前分析研究进一步说明衡水湖沉积物中磷释放风险较小.同时 Fe-P、Al-P、Ca-P 和 Res-P 之间互相呈显著或极显著相关,反映其具有一定来源转化关系; $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 与 TOC 的含量呈极显著正相关($r=0.811, P<0.01$),表明 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 与 TOC 具有一定同源性.总的来看,衡水湖沉积物中碳、氮和磷之间相关性较弱,各形态磷之间的相关性强于各形态氮.

2.5 衡水湖沉积物污染状况评价

由于沉积物污染状况评价未有统一评价标准,结合文献[42]的报道与衡水湖表层沉积物的实际

情况,利用有机指数和有机氮来评价衡水湖沉积物营养盐污染情况.有机指数常用来评价水域沉积物的环境状况,有机氮则是衡量湖泊表层沉积物是否遭受氮污染的重要指标,其计算方法如下:

$$\begin{aligned}\text{有机指数} &= \text{有机碳}(\%) \times \text{有机氮}(\%) \\ \text{有机碳}(\%) &= \text{有机质}(\%) / 1.724 \\ \text{有机氮}(\%) &= \text{总氮}(\%) \times 0.95\end{aligned}$$

沉积物有机指数和有机氮评价标准(表 4 和表 5).

表 4 沉积物有机指数评价标准

Table 4 Evaluation standards of organic index in sediments

有机指数	<0.05	0.05~0.2	0.2~0.5	≥0.5
类型	清洁	较清洁	尚清洁	有机污染
等级	I	II	III	IV

表 5 沉积物有机氮评价标准

Table 5 Evaluation standards of organic nitrogen in sediments

有机氮	<0.033/%	0.033/%~0.066/%	0.066/%~0.133/%	≥0.133/%
类型	清洁	较清洁	尚清洁	有机氮污染
等级	I	II	III	IV

按照沉积物有机指数和有机氮评价标准,衡水湖沉积物污染状况评价结果如表 6,可知衡水湖各点位沉积物的有机指数在 0.337~1.727 之间,平均值为 0.934,为 IV 级标准,湖泊沉积物环境状况为有机污染,其中, S6 点位相对较轻,为尚清洁,其余各点位均为有机污染.各点位沉积物的有机氮在 0.156%~1.194% 之间,平均值为 0.176%,均为 IV 级标准,湖泊

表层沉积物均遭受氮污染.可以看出衡水湖沉积物营养盐污染程度严重,已达到 IV 级标准,全湖氮污染严重.可能是衡水湖四周与水中均含有丰富的芦苇等挺水植物,水下亦有大量腐烂植物与动物残体,形成生物残留沉积,导致衡水湖沉积物营养盐污染程度严重.建议今后加强对衡水湖底质沉积物清淤工作的力度,定期对湖中动植物残体进行清除.

表 6 衡水湖沉积物营养盐污染状况评价

Table 6 Evaluation of nutrient pollution in sediments of Hengshui Lake

点位	有机指数评价			有机氮评价		
	有机指数	等级	类型	有机氮/%	等级	类型
S1	0.766	有机污染	IV	0.185	有机氮污染	IV
S2	0.805	有机污染	IV	0.181	有机氮污染	IV
S3	0.942	有机污染	IV	0.186	有机氮污染	IV
S4	1.248	有机污染	IV	0.163	有机氮污染	IV
S5	0.948	有机污染	IV	0.170	有机氮污染	IV
S6	0.337	尚清洁	III	0.176	有机氮污染	IV
S7	1.282	有机污染	IV	0.194	有机氮污染	IV
S8	0.538	有机污染	IV	0.192	有机氮污染	IV
S9	0.911	有机污染	IV	0.166	有机氮污染	IV
S10	1.727	有机污染	IV	0.156	有机氮污染	IV
S11	0.772	有机污染	IV	0.165	有机氮污染	IV
平均值	0.934	有机污染	IV	0.176	有机氮污染	IV

3 结论

(1)衡水湖沉积物中 TOC 平均含量为 93.226 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,TOC 含量较高,导致潜在氮源污染风险较大. TN 平均含量为 1.850 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,属中度污染;各种氮形态平均含量及 TN 占比依次为: Res-N(0.973

$\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 52.57%) > WAEF-N (0.531 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 28.69%) > SOEF-N (0.208 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 11.23%) > IEF-N (0.088 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 4.77%) > SAEF-N (0.051 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 2.75%),衡水湖沉积物氮释放风险相对较高. TP 平均含量为 1.020 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,其中 IP 平均含量为 0.839 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,占 TP 含量的 82.27%,属中度污

染;各种磷形态平均含量及 IP 占比依次为:Ca-P ($0.440 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 52.44%) > Res-P ($0.200 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 23.84%) > Fe-P 和 Al-P ($0.169 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 20.14%) > $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ ($0.030 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 3.58%),衡水湖沉积物磷释放风险相对较小。

(2)C/N、C/P 和 N/P 特征分析结果表明,衡水湖沉积物中有机质主要是来自陆生禾本科和莎草科陆生高等植物,沉积物中磷主要受陆源输入的影响。各营养盐相关性分析结果表明,衡水湖沉积物中碳、氮、磷之间相关性较弱,三者的来源可能不同;各形态磷之间的相关性强于各形态氮,各形态磷具有很好的同源性,而各形态氮来源多样且复杂。

(3)污染状况评价结果表明,衡水湖沉积物营养盐污染程度严重,达到Ⅳ级标准,全湖氮污染严重,推测与大量腐烂植物与动物残体,形成生物残留沉积有关,建议加强沉积物清淤工作的力度,并定期清除湖中动植物残体。

参考文献:

- [1] 裴知,王睿,李思亮,等.中国湖泊污染现状与治理情况分析[A].见:湖泊湿地与绿色发展—第五届中国湖泊论坛论文集[C].长春:中国科学技术协会学会学术部,2015.207-211.
- [2] 魏丽萍,梁美生.我国湖泊富营养化问题概述[J].化工文摘,2008,(6):38-40.
Wei L P, Liang M S. A summary of the problem of lake eutrophication in China[J]. China Chemicals, 2008, (6): 38-40.
- [3] 张光贵,黄博.洞庭湖表层沉积物营养盐污染特征与评价[J].环境工程技术学报,2016,4(6):514-519.
Zhang G G, Huang B. Pollution characteristics and evaluation of surface sediment nutrients in Dongting Lake[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2016, 4(6): 514-519.
- [4] 熊春晖,张瑞雷,吴晓东,等.太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.
- [5] 甘树,卢少勇,秦普丰,等.太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价[J].环境科学,2012,33(9):3064-3069.
Gan S, Lu S Y, Qin P F, et al. Spatial distribution and evaluation of nitrogen, phosphorus and organic matter in surface sediments from Western Lakeside Belt of Lake Taihu[J]. Environmental Science, 2012, 33(9): 3064-3069.
- [6] Shan J L, Zhu W Q, Pan M, et al. Characteristics and evaluation for nitrogen pollution in water and surface sediments of Xixi Wetland[A]. In: Proceedings of the 2013 3rd International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications[C]. Hong Kong, China: IEEE, 2013.
- [7] Wang S R, Zhao Y L, Jiao L X, et al. Characteristics of soluble organic nitrogen composition and sources in sediments from Erhai Lake in China and the effect on the water quality[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(5): 3849-3856.
- [8] Ni Z K, Wang S R. Historical accumulation and environmental risk of nitrogen and phosphorus in sediments of Erhai Lake, Southwest China[J]. Ecological Engineering, 2015, 79: 42-53.
- [9] Liu W B, Wang S R, Zhang L, et al. Phosphorus release characteristics of sediments in Erhai Lake and their impact on water quality[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(5): 3753-3766.
- [10] Ni Z K, Wang S R, Wang Y M. Characteristics of bioavailable organic phosphorus in sediment and its contribution to lake eutrophication in China[J]. Environmental Pollution, 2016, 219: 537-544.
- [11] 王乃姗,张曼胤,崔丽娟,等.河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价[J].环境科学,2016,37(5):1754-1762.
Wang N S, Zhang M Y, Cui L J, et al. Contamination and ecological risk assessment of mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province[J]. Environmental Science, 2016, 37(5): 1754-1762.
- [12] 黎聪,李晓文.衡水湖湿地恢复预案空间模拟及生态风险评价[J].环境科学学报,2010,30(6):1312-1321.
Li C, Li X W. Modeling the scenarios of restoring the wetland in Hengshui Lake national nature reserve and assessing their ecological risk[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(6): 1312-1321.
- [13] 张嘉雯,魏健,吕一凡,等.衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估[J].环境科学,2020,41(3):1357-1367.
Zhang J W, Wei J, Lü Y F, et al. Occurrence and ecological risk assessment of typical persistent organic pollutants in Hengshui Lake[J]. Environmental Science, 2020, 41(3): 1357-1367.
- [14] 刘利,张嘉雯,陈奋飞,等.衡水湖底泥重金属污染特征及生态风险评价[J].环境工程技术学报,2020,10(2):205-211.
Liu L, Zhang J W, Chen F F, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the sediment of Hengshui Lake[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, 10(2): 205-211.
- [15] 胡彩莉,马玉贞,郭超,等.烧失量法测定土壤有机质含量的实验条件探究[J].地球与环境,2016,44(1):110-118.
Hu C L, Ma Y Z, Guo C, et al. Optimization of the experiment conditions for estimating organic matter content with loss-on-ignition method[J]. Earth and Environment, 2016, 44(1): 110-118.
- [16] Pardo P, Rauret G, López-Sánchez J F. Shortened screening method for phosphorus fractionation in sediments: a complementary approach to the standards, measurements and testing harmonised protocol[J]. Analytica Chimica Acta, 2004, 508(2): 201-206.
- [17] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment[J]. Water Research, 2000, 34(7): 2037-2042.
- [18] HJ632-2011, 土壤 总磷的测定 碱熔-钼锑抗分光光度法[S].
- [19] 钱君龙,张连弟,乐美麟.过硫酸盐消化法测定土壤全氮全磷[J].土壤,1990,22(5):258-262.
- [20] 马红波,宋金明,吕晓霞,等.渤海沉积物中氮的形态及其在循环中的作用[J].地球化学,2003,32(1):48-54.
Ma H B, Song J M, Lü X X, et al. Nitrogen forms and their functions in recycling of the Bohai sea sediments[J]. Geochimica, 2003, 32(1): 48-54.
- [21] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].(第四版).北京:中国环境科学出版社,2002.
- [22] 张勇,程祥圣,吴月英,等.锌-镉还原-分光光度法测定地表水中硝酸盐[J].理化检验-化学分册,2008,44(2):139-

141.
Zhang Y, Cheng X S, Wu Y Y, *et al.* Spectrophotometric determination of nitrate in surface water after reduction with Zinc metal in Cd(II) solution [J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis)*, 2008, **44** (2): 139-141.
- [23] 朱元荣, 张润宇, 吴丰昌. 滇池沉积物中氮的地球化学特征及其对水环境的影响 [J]. *中国环境科学*, 2011, **31** (6): 978-983.
Zhu Y R, Zhang R Y, Wu F C. Geochemical characteristics and influence to overlying water of nitrogen in the sediments from Dianchi Lake [J]. *China Environmental Science*, 2011, **31** (6): 978-983.
- [24] 黄廷林, 刘飞, 史建超. 水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价 [J]. *环境科学*, 2016, **37** (1): 166-172.
Huang T L, Liu F, Shi J C. Distribution characteristics and pollution status evaluation of sediments nutrients in a drinking water reservoir [J]. *Environmental Science*, 2016, **37** (1): 166-172.
- [25] 卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 等. 长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价 [J]. *环境科学*, 2012, **33** (2): 393-398.
Lu S Y, Xu M S, Jin X C, *et al.* Pollution characteristics and evaluation of nitrogen, phosphorus and organic matter in surface sediments of Lake Changshouhu in Chongqing, China [J]. *Environmental Science*, 2012, **33** (2): 393-398.
- [26] 罗玉红, 苏青青, 高婷, 等. 底泥泥质与污染物释放量的关系 [J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2012, **34** (1): 19-22.
Luo Y H, Su Q Q, Gao T, *et al.* Relationship between sediment quality and pollutant release quantity [J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2012, **34** (1): 19-22.
- [27] 焦立新. 浅水湖泊表层沉积物氮形态特征及在生物地球化学循环中的功能 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007.
- [28] 韩秀秀, 黄晓虎, 余丽燕, 等. 滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析 [J]. *环境科学*, 2017, **38** (1): 78-86.
Han X X, Huang X H, Yu L Y, *et al.* Sedimentary characteristics and sources of organic matter in sediments of Dianchi Lake [J]. *Environmental Science*, 2017, **38** (1): 78-86.
- [29] 陈云增, 杨浩, 张振克, 等. 相平衡分配法在滇池沉积物环境质量评价中的应用研究 [J]. *环境科学学报*, 2006, **26** (9): 1545-1552.
Chen Y Z, Yang H, Zhang Z K, *et al.* Application of equilibrium partitioning approach to the assessment of sediment quality in Dianchi Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26** (9): 1545-1552.
- [30] 房吉敦, 熊永强, 吴丰昌, 等. 中国典型淡水湖泊沉积物中生物标志物组成特征及源解析 [J]. *环境污染与防治*, 2017, **39** (8): 822-828.
Fang J D, Xiong Y Q, Wu F C, *et al.* Composition and source identification of biomarkers in surface sediments from typical freshwater lakes in China [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2017, **39** (8): 822-828.
- [31] 向速林, 朱梦圆, 朱广伟, 等. 太湖东部湖湾水生植物生长区底泥氮磷污染特征 [J]. *沉积学报*, 2014, **32** (6): 1083-1088.
Xiang S L, Zhu M Y, Zhu G W, *et al.* Pollution characteristics of nitrogen and phosphorus in sediment of the Eastern Bays of Lake Taihu with aquatic macrophytes [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, **32** (6): 1083-1088.
- [32] 周美玲. 七里海潟湖沉积物氮赋存形态分布特征及污染评价 [D]. 石家庄: 河北师范大学, 2018.
- [33] 金晓丹, 吴昊, 陈志明, 等. 长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性 [J]. *环境科学*, 2015, **36** (2): 448-456.
Jin X D, Wu H, Chen Z M, *et al.* Phosphorus fractions, sorption characteristics and its release in the sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36** (2): 448-456.
- [34] 邢友华. 东平湖表层沉积物中磷的形态特征及对富营养化的影响研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2011.
- [35] 王晓蓉, 华兆哲, 徐菱, 等. 环境条件变化对太湖沉积物磷释放的影响 [J]. *环境化学*, 1996, **15** (1): 15-19.
Wang X R, Hua Z Z, Xu L, *et al.* The effects of the environmental conditions on phosphorus release in lake sediments [J]. *Environmental Chemistry*, 1996, **15** (1): 15-19.
- [36] 刘芳, 李占臣, 秦哲, 等. 衡水湖沉积物磷形态特征分析 [J]. *安徽农业科学*, 2015, **43** (5): 215-217, 230.
Liu F, Li Z C, Qin Z, *et al.* Phosphorus forms and its characteristic in sediments of Hengshui Lake [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, **43** (5): 215-217, 230.
- [37] 邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 等. 山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价 [J]. *环境科学*, 2016, **37** (4): 1389-1396.
Qiu Z K, Hu X Z, Yao C, *et al.* Pollution characteristics and evaluation of nitrogen, phosphorus and organic matter in sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China [J]. *Environmental Science*, 2016, **37** (4): 1389-1396.
- [38] 种云霄, 胡洪营, 钱易. 大型水生植物在水污染治理中的应用研究进展 [J]. *环境污染治理技术与设备*, 2003, **4** (2): 36-40.
Chong Y X, Hu H Y, Qian Y. Advances in utilization of macrophytes in water pollution control [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2003, **4** (2): 36-40.
- [39] 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.
- [40] 李强, 霍守亮, 王晓伟, 等. 巢湖及其入湖河流表层沉积物营养盐和粒度的分布及其关系研究 [J]. *环境工程技术学报*, 2013, **3** (2): 147-155.
Li Q, Huo S L, Wang X W, *et al.* Distribution and correlation of nutrients and particle size in surface sediments of Lake Chaohu and its Inflow Rivers [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2013, **3** (2): 147-155.
- [41] 丁二峰. 衡水湖水环境特征分析及改善对策 [J]. *地下水*, 2015, **37** (4): 84-86.
- [42] 隋桂荣. 太湖表层沉积物中 OM、TN、TP 的现状与评价 [J]. *湖泊科学*, 1996, **8** (4): 319-324.
Sui G R. Statement and evaluation of organic matter, total nitrogen and total phosphate in surface layer sediments in Taihu Lake [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1996, **8** (4): 319-324.

CONTENTS

Sources and Control Area Division of Ozone Pollution in Cities at Prefecture Level and Above in China	YAN Hui, ZHANG Wei, HOU Mo, <i>et al.</i> (5215)
Dynamic Assessment of PM _{2.5} Health Damage Value in China from 2015 to 2018	LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (5225)
Analysis of Multi-scale Spatio-temporal Differentiation Characteristics of PM _{2.5} in China from 2011 to 2017	YANG Wen-tao, QIAO Peng, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (5236)
Spatio-temporal Evolution and Population Exposure Risk to PM _{2.5} in the Guanzhong Area	HUANG Xiao-jun, QI Ming-yue, LI Yan-yu, <i>et al.</i> (5245)
Formation Mechanism and Source Analysis of Two Heavy Pollution Periods in Winter in a Central Plains City	JIA Jia, CONG Yi, GAO Qing-min, <i>et al.</i> (5256)
Winter Pollution Characteristics and Physicochemical Properties of PM _{2.5} in a Northwest Industrial City	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, WANG Li-na, <i>et al.</i> (5267)
Characterization of Metal Pollution of Regional Atmospheric PM _{2.5} and Its Sources Based on the PMF Model	DENG Lin-li, ZHANG Kai-shan, YIN Zi-yuan, <i>et al.</i> (5276)
Pollution Characteristics and Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in Core Urban Areas, Chongqing	ZHANG Xia, LIU Bin, XIAO Bo-lin, <i>et al.</i> (5288)
Factors Influencing New Atmospheric Particle Formation in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, WANG Hong-lei, ZHANG Lian-xia, <i>et al.</i> (5295)
Characteristics and Reactivity of Ambient VOCs in Urban Hangzhou, China	JING Sheng-ao, GAO Ya-qin, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (5306)
Characteristics and Sources of Atmospheric Volatile Organic Compounds Pollution in Summer in Chengdu	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (5316)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs and O ₃ in Shijiazhuang	WANG Shuai, CUI Jian-sheng, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (5325)
Analysis of Industrial VOCs Emission Inventory and Countermeasures in Xiamen	WU Dong-yang, ZHUANG Ma-zhan, WU Yan-cong, <i>et al.</i> (5336)
Emission Inventory and Emission Factors of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Architectural Adhesives	LIANG Xiao-ming, SUN Xi-bo, SU Yan-hua, <i>et al.</i> (5345)
Sources and Health Risks of Atmospheric Polychlorinated Biphenyls in an Urban/Industrial Areas, Northwest China	MAO Xiao-xuan, LI Zi-xuan, SONG Shi-jie, <i>et al.</i> (5352)
Vertical Distribution of Surface Formaldehyde in the Pearl River Delta Urban Area Based on Observations at the Canton Tower	HUANG Shan, PEI Cheng-lei, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5362)
Temporal and Spatial Characteristics of Total Phosphorus in the Middle and Lower Yangtze River Mainstem Under New Water and Sediment Conditions	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, WU Yun-li, <i>et al.</i> (5371)
Seasonal Variations in Nitrogen and Phosphorus Concentration and Stoichiometry of Hanfeng Lake in the Three Gorges Reservoir Area	QIAN Tian, HUANG Qi, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5381)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients in Hengshui Lake Sediments	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LIU Li, <i>et al.</i> (5389)
Endogenous Pollution and Release Characteristics of Bottom Sediments of Hengshan Reservoir in Yixing City	CUI Hui-fang, CHEN Shu-yun, YANG Chun-hui, <i>et al.</i> (5400)
Pollution and Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Sediments of Qingliangshan Reservoir in the Meijiang Basin	JIANG Tao, LIN Wei-wen, CAO Ying-jie, <i>et al.</i> (5410)
Influence Factors of Potential Nitrification Rates and Functional Genes Abundance in the Jinshui River and the Qihe River of the Hanjiang River Basin	ZHAO Bin-jie, WANG Xu, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (5419)
Contamination Characteristics and Potential Ecological Risks of Typical Perfluoroalkyl Substances in the Water and Sediment of Coastal Tourism Resorts in Shandong Province	WANG Shi-liang, CAO Xue-zhi (5428)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organophosphate Esters in Key Waters Areas of Taihu Lake	LÜ Jia-pei, ZHANG Zhen-fei, LIU Yang, <i>et al.</i> (5438)
Residual Characteristics and Health Assessment Analysis of OCPs and PCBs in Karst Groundwater	YE Kai, SUN Yu-chuan, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5448)
Biogeographic Distribution Patterns of Diatoms in Lancang River and Their Key Drivers	SUN Sheng-hao, CHEN Juan, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (5458)
Bioaccumulation Characteristics of Quinolones (QNs) in Dominant Fish Species and Their Correlation with Environmental Factors in Baiyangdian Lake	SHEN Li-na, FU Yu, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (5470)
Effect of Biomass Particle Size on the Adsorption of Phosphorus from Aqueous Solution by MgO-loaded Biochar	WANG Peng-fei, ZHI Meng-meng, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (5480)
Photocatalytic Degradation of Tetracycline and Copper Complex by Bi ₂ MoO ₆ /Bi ₂ S ₃ Heterojunction	HUANG Wen-xin, WEI Hu, JIANG Cai-yun, <i>et al.</i> (5488)
Enhancing PPCPs Removal and Membrane Fouling Control of Ultrafiltration Membrane by UiO-66@Fe ₃ O ₄ @UiO-66	YIN Yue, WU Dao-wen, SUN Meng-yao, <i>et al.</i> (5500)
Advanced Treatment of Tail Water Using Pilot-scale Horizontal and Vertical Subsurface Flow Constructed Wetlands in Low-temperature Seasons	LIAO Xue-ke, YAN Han-lu, WANG Zhi-yuan, <i>et al.</i> (5509)
Metagenomic Insights into Salinity Build-up in Microbial Communities and Metabolism of Hydrolytic Bioreactor Treating High-color PDWW	GAO Jing, ZHANG Shao-hua, WANG Rui, <i>et al.</i> (5518)
Performance and Microbial Characteristics of Ammonium-limited and Nitrite-limited ANAMMOX Systems	SONG Jia-jun, ZHU Ming-yi, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (5527)
Microbial Community Structure and Diversity During the Enrichment of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria	YAN Bing, XIA Song, GUI Shuang-lin, <i>et al.</i> (5535)
Enhanced Dewaterability of Waste-Activated Sludge in Presence of Fe(II)-Activated Calcium Peroxide	BI Wei-wei, RUAN Shu-yu, CHEN Wu-ao-xiao, <i>et al.</i> (5544)
Spatial Distribution, Contamination Assessment, and Sources of Heavy Metals in the Urban Green Space Soils of a City in North China	ZHAO Liang, LIANG Yun-ping, CHEN Qian, <i>et al.</i> (5552)
Technological Classification of Cadmium Quality in the Rice Producing Areas of South China	DOU Wei-qiang, AN Yi, QIN Li, <i>et al.</i> (5562)
Distribution Characteristics of Selenium in a Soil-Crop System and the Threshold of Selenium-Rich Soils	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (5571)
Transfer Factor and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Crop System in a High Incidence Area of Nasopharyngeal Carcinoma, Guangdong	YE Mai, ZHANG Jing-ru, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (5579)
DA-6 and GLDA Enhanced <i>Panicum virgatum</i> L. to Phytoextract Cd from Contaminated Soils	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh Mohamed, <i>et al.</i> (5589)
Remediation Performance via the Passivation of a Porous Biomorph Genetic Composite of α -Fe ₂ O ₃ /Fe ₃ O ₄ /C Using a Bamboo Template on As(V) Contaminated Soils	ZHAO Ning-ning, HE Hao, FENG Guo-jie, <i>et al.</i> (5600)
Biodegradation of Expanded Polystyrene Foams in <i>Zophobas morio</i> : Effects of Gut Microbiota	YANG Li, LIU Ying, GAO Jie, <i>et al.</i> (5609)
Isolation, Identification, and Degrading Characteristics of an Oil Resistant Formaldehyde-Degrading Bacterium	HAN Xi, WANG Rong-rong, SHI Chun-zhen (5617)
Characteristics of Phyllosphere and Rhizosphere Bacterial Communities in <i>Bothriochloa ischaemum</i> in Copper Tailings	JIA Tong, YAO Yu-shan, WANG Rui-hong (5628)
Effects of Selected Biochars Application on the Microbial Community Structures and Diversities in the Rhizosphere of Water Spinach (<i>Ipomoea aquatica</i> Forssk.) Irrigated with Reclaimed Water	CUI Bing-jian, CUI Er-ping, HU Chao, <i>et al.</i> (5636)
Effects of Modified Biowaste-based Hydrochar on Rice Yield and Nitrogen Uptake	HOU Peng-fu, XUE Li-hong, FENG Yan-fang, <i>et al.</i> (5648)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil PAHs in Shizuishan City Based on GIS and PMF Model	XIA Zi-shu, WANG Yu-yu, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5656)
Effects of Nitrogen Fertilizer and Straw Returning Methods on N ₂ O Emissions in Wheat-Maize Rotational Soils	XU Hong-wei, LI Na, FENG Yong-zhong, <i>et al.</i> (5668)