

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

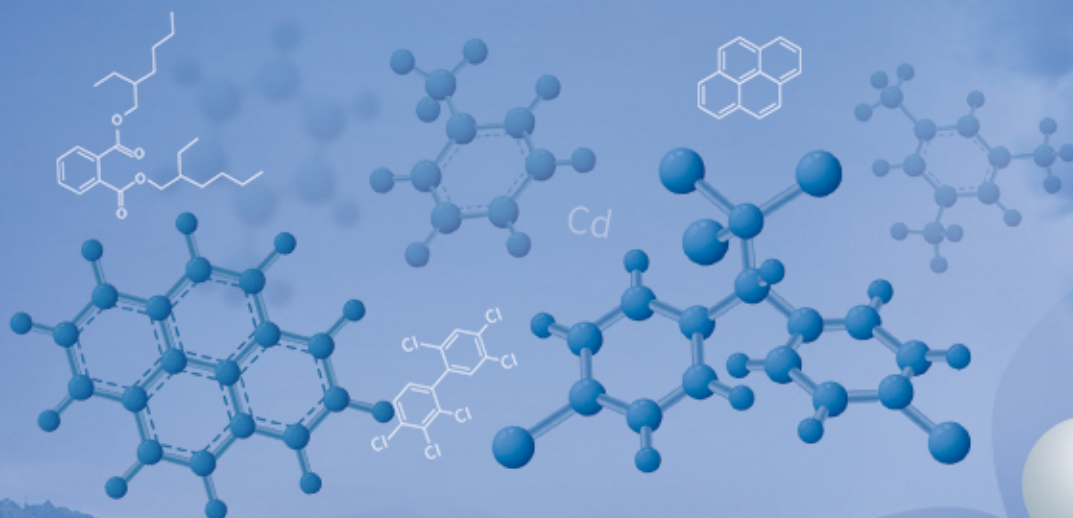
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价

龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华



PAHs

VOCs

HMs

PCBs

PAEs

OCPs

ANTs

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年10月

第42卷 第10期
Vol.42 No.10

目次

PM _{2.5} 化学组分连续观测在污染事件源解析中的应用	蔡凡涛, 尚玥, 戴维, 谢鸣捷 (4575)
汾渭平原 PM _{2.5} 空间分布的地形效应	黄小刚, 赵景波, 孙从建, 汤慧玲, 梁旭琦 (4582)
华中地区冬季灰霾天气下 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价: 以湖北黄冈为例	李星谕, 毛瑶, 陈展乐, 刘威杰, 程铖, 石明明, 许安, 苏业旺, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (4593)
华北区域大气中羰基化合物体积分数水平及化学反应活性	黄禹, 陈曦, 王迎红, 刘子锐, 唐贵谦, 李杏茹 (4602)
成都市春季 O ₃ 污染特征及关键前体物识别	韩丽, 陈军辉, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波, 钱骏, 刘政 (4611)
基于边界观测的长三角某工业区 O ₃ 来源特征	黄晴, 黄银芝, 张珊, 金丹, 高松, 修光利 (4621)
廊坊开发区 8~9 月 O ₃ 污染过程 VOCs 污染特征及来源分析	张敬巧, 王宏亮, 方小云, 刘锐泽, 丁文文, 凌德印, 王淑兰 (4632)
广东省家具行业基于涂料类型的 VOCs 排放特征及其环境影响	曾春玲, 邵霞, 刘锐源, 姚懿娟, 李银松, 侯墨, 刘洋, 范丽雅, 叶代启 (4641)
厦门湾空气质量对新冠疫情管控的响应	徐超, 吴水平, 刘怡靖, 钟雪芬 (4650)
北京平原和延庆地区山谷风异同及对污染的影响	吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 韩婷婷, 邱雨露, 马小会, 李颖若, 朱晓娟 (4660)
两湖盆地冬季区域大气颗粒物污染特征及独特的风场和下垫面影响	朱燕, 赵天良, 白永清, 徐家平, 孙晓芸, 胡未央, 常嘉成, 杨婕, 朱从祯 (4669)
燃煤电厂颗粒物中硫酸根与硝酸根离子的转化规律	杨柳, 何晴, 盛重义 (4678)
长江流域主要干/支流化学特征及外源酸的影响	王琪, 于爽, 蒋萍萍, 孙平安 (4687)
土地利用对太湖入湖河道营养盐的影响	连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 康丽娟, 朱梦圆, 许海 (4698)
基于 eDNA 技术的渭河浮游动物多样性及关键种生态位特征	梁东, 夏军, 宋进喜, 常剑波, 吴琼, 程丹东, 张怡恒, 孔飞鹤, 任源鑫 (4708)
三亚市水体中 PPCPs 的污染水平、分布特征及生态风险评价	任丙南, 耿静 (4717)
升金湖水体优先污染物筛选与风险评价	龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华 (4727)
天目湖沙河水库水生态安全状况长期变化及影响因素	杨文斌, 段文秀, 崔扬, 朱广伟, 吴天浩, 许海, 朱梦圆 (4739)
华中地区供水水库抗生素抗性基因的季节变化及影响因素	张凯, 辛蕊, 李观家, 王倩, 王亚南, 许智恒, 崔向超, 魏巍 (4753)
快速城镇化进程中珠江三角洲硝酸型地下水赋存特征及驱动因素	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 张玉玺 (4761)
盐城地区地表水化学空间特征及控制因素分析	王建, 张华兵, 许君利, 彭俊 (4772)
基于沉积物中总氮和总磷垂向分布与吸附解吸特征的白洋淀清淤深度	周亚婷, 陈兴宏, 李立青, 张伟军, 张美一, 王东升, 王洪杰 (4781)
硼酸和磷酸对 PMS/Co ²⁺ 均相催化氧化有机物的影响因素与机制	万琪琪, 陈铸昊, 曹瑞华, 王静怡, 文刚 (4789)
磁性生物炭负载 α-MnO ₂ 活化过一硫酸盐降解 2,2',4,4'-四溴联苯醚	李鑫, 尹华, 罗昊昱, 欧阳晓芳, 刘航, 祝铭韩 (4798)
紫外活化过硫酸钠灭活水中噬菌体 MS2 的特性及机制	张崇森, 杨昊明, 王真 (4807)
铈改性水葫芦生物炭对磷酸盐的吸附特性	王光泽, 曾薇, 李帅帅 (4815)
低温地下水净化工艺中氨氮去除性能及机制	李冬, 刘孟浩, 张瑞苗, 曾辉平, 张杰 (4826)
我国城市污泥中重金属的赋存形态与生态风险评价	耿源濂, 张传兵, 张勇, 黄豆豆, 闫姝晓, 孙腾飞, 程柳, 王静, 毛宇翔 (4834)
不同气候类型下污水厂活性污泥中微生物群落比较	杨思航, 秦泽生, 梁漫春 (4844)
部分亚硝化-厌氧氨氧化协同反硝化处理生活污水脱氮除碳	秦彦荣, 袁忠玲, 张明, 张民安, 刘安迪, 付雪, 马娟, 陈永志 (4853)
同步短程硝化-厌氧氨氧化-短程反硝化颗粒污泥培育过程及其性能	周峰, 刘勇弟, 厉巍 (4864)
多种微塑料提取方法在中国典型土壤中的应用	赵小丽, 刘子涵, 从辰宇, 韩剑桥 (4872)
柴达木盆地表土重金属污染与来源分析	陈亮, 张西营, 唐启亮, 耿盛, 王二龙, 李姜瑶 (4880)
快速城市化区域不同用地类型土壤重金属含量分布特征及生态风险	李梦婷, 沈城, 吴健, 黄沈发, 李大雁, 王敏 (4889)
广西都安县典型水田土壤地球化学特征及影响因素	刘飞, 杨柯, 徐仁廷, 唐世琪 (4897)
炭化苹果枝通过减少土壤 DTPA-Cd 降低苹果砷木镉积累和镉伤害	邓波, 荀咪, 张玮玮, 杨洪强 (4908)
海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险	杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 严慧, 胡树起, 唐世新, 龚晶晶 (4916)
环境中抗生素抗性基因丰度与抗生素和重金属含量的相关性分析: 基于 Web of Science 数据库检索	苗荪, 陈磊, 左剑恶 (4925)
银川市农田土壤中四环素类抗生素的污染特征及生态风险评估	张小红, 陶红, 王亚娟, 马志义, 周泽英 (4933)
施用不同来源粪肥对土壤中抗生素淋溶的影响	李斌绪, 朱昌雄, 宋婷婷, 马金莲, 张治国, 李红娜 (4942)
我国典型森林土壤微生物驱动的氮代谢途径特征解析	吕雪丽, 赵永鹏, 林清火, 彭显龙, 尹云锋, 蒋先军 (4951)
青藏高原高寒湿地春夏两季根际与非根际土壤反硝化速率及 nirS 型反硝化细菌群落特征分析	李玉倩, 马俊伟, 高超, 霍守亮, 夏星辉 (4959)
松嫩平原芦苇湿地退化与修复过程中土壤细菌和甲烷代谢微生物的群落结构	王秋颖, 王娜, 刘颖, 陈功, 何辉, 高婕, 庄绪亮, 庄国强 (4968)
不同轮作休耕下潮土细菌群落结构特征	南镇武, 刘柱, 代红翠, 张磊, 王娜, 徐杰, 刘开昌, 孟维伟, 王旭清 (4977)
稻田土壤光合细菌群落对镉污染的响应	罗路云, 金德才, 王殿东, 陈昂, 张德咏, 曾军, 匡炜, 张卓, 刘勇 (4988)
铁尾矿芦苇根际微生物和根内生菌群落分布及其限制性因子解析	曹曼曼, 王飞, 周北海, 陈辉伦, 袁蓉芳 (4998)
有机无机氮配施对不同程度盐渍土硝化和反硝化作用的影响	周慧, 史海滨, 张文聪, 王维刚, 苏永德, 闫妍 (5010)
水稻产量、稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放对长期大气 CO ₂ 浓度升高的响应	于海洋, 宋开付, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (5021)
原料和热解温度对生物炭中可溶性有机质的影响	闫代红, 马亚培, 宋凯悦, 马红亮, 高人, 尹云锋 (5030)
中国 84 个主要城市大气热岛效应的时空变化特征及影响因素	李宇, 周德成, 闫章美 (5037)
室内建筑装饰装修材料气味物质及其释放研究进展	张万众, 张彭义 (5046)
《环境科学》征订启事 (4814) 《环境科学》征稿简则 (4871) 信息 (4907, 5009, 5029)	

基于沉积物中总氮和总磷垂向分布与吸附解吸特征的白洋淀清淤深度

周亚婷¹, 陈兴宏¹, 李立青^{1*}, 张伟军¹, 张美一², 王东升², 王洪杰³

(1. 中国地质大学环境学院, 武汉 430074; 2. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 3. 河北大学生命科学学院生态与环境治理研究所, 保定 071002)

摘要: 针对白洋淀清淤示范区 2 种主要水体类型: 开阔淀和鱼塘, 采用沉积物总氮(TN)和总磷(TP)的垂向分布拐点法和吸附解吸平衡浓度法, 开展了清淤深度确定研究。根据沉积物 TN 和 TP 含量垂向分布拐点法与吸附解吸平衡浓度分别确定的清淤深度是一致的。南刘庄示范区淀水体清淤深度为 (50 ± 10) cm, 南刘庄示范区鱼塘水体清淤深度为 (30 ± 10) cm, 采蒲台示范区鱼塘水体清淤深度为 (30 ± 10) cm。沉积物对 NH_4^+ -N 吸附/解吸平衡浓度 (ENC_0) 与交换态 NH_4^+ -N 含量和 TN 含量显著正相关; 沉积物对溶解态活性磷(SRP)吸附/解吸平衡浓度 (EPC_0) 与沉积物交换态 SRP 含量和 TP 显著正相关。沉积物 TN 和 TP 含量可以预测沉积物对上覆水体释放氮、磷的风险。南刘庄和采蒲台清淤示范区沉积物有向上覆水释放氮、磷的趋势, 沉积物是水体营养的来源。建议判别清淤深度 TN 控制值为 $750 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、TP 控制值为 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 沉积物剖面 TN 含量大于 $750 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、TP 含量大于 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 可设计为清淤层。

关键词: 白洋淀; 清淤工程示范区; 清淤深度; 氮、磷吸附解吸; 总氮和总磷垂向分布

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)10-4781-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202101188

Identification of Dredging Depths Based on Sediment Vertical Distribution Profiles of Total Nitrogen and Total Phosphorus and Their Adsorption-desorption Equilibria

ZHOU Ya-ting¹, CHEN Xing-hong¹, LI Li-qing^{1*}, ZHANG Wei-jun¹, ZHANG Mei-yi², WANG Dong-sheng², WANG Hong-jie³

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Institute of Ecology and Environmental Governance, College of Life Sciences, Hebei University, Baoding 071002, China)

Abstract: A dredging demonstration project in the Baiyangdian Lake included open waters and fishing ponds to reduce the internal release of nitrogen and phosphorus from bottom sediments. The dredging depth design was determined by both the sediment vertical distribution profile of total nitrogen and phosphorus, and the sediment adsorption-desorption equilibrium method. The determined dredging depths were very similar and coincident. The dredging depth for the demonstration area of open waters in Nanliuzhuang was identified as (50 ± 10) cm; and the dredging depths for fishing ponds were (30 ± 10) cm in both the Nanliuzhuang and Caiputai demonstration areas. The equilibrium nitrogen (NH_4^+ -N) and phosphorus (SRP) concentrations at zero net sorption or desorption (ENC_0 and EPC_0) were significantly positively correlated with both exchangeable and total nitrogen and phosphorus in the sediments. The total nitrogen and phosphorus in the sediments were also used to predict the risk of their release from the bottom sediments to the overlying water column. The sediment layers with ENC_0 and EPC_0 values greater than the NH_4^+ -N and SRP in the overlying water column indicated the sediments act as a source of dissolved nitrogen and phosphorus to the overlying water column in the Nanliuzhuang and Caiputai demonstration areas. Accordingly, the sediment layers with both total nitrogen concentrations greater than $750 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and total phosphorus concentrations greater than $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ should be identified as dredging layers.

Key words: Baiyangdian Lake; dredging demonstration project; dredging depths; equilibrium nitrogen and phosphorus concentrations; vertical distribution of total nitrogen and phosphorus concentrations

淡水湖泊富营养化是近几十年全球关注的环境问题^[1]。过量氮、磷等营养盐输入被认为是湖泊富营养化的主要原因^[2]。但是, 主要控制外源磷的输入不一定能够解决湖泊富营养化问题。产生这一问题的主要原因是在湖泊富营养化发展过程中内源磷负荷的形成, 沉积物向上覆水体释放营养盐, 从而增加湖泊的初级生产, 影响湖泊富营养状况^[3, 4]。

白洋淀作为华北地区最大的淡水湖泊, 为地区社会经济发展提供了重要的生态服务功能。自雄安新区设立之后, 水环境质量与生态状况进一步提升受到前所未有的重视。1990~2010年, 外源营养输入、淀中村生活、生产以及养殖活动下, 白洋淀水

体遭受污染与富营养化^[5, 6]。自2010年, 特别是新区设立以来, 在加大外源控制、禁养力度, 白洋淀水质得到明显改善^[7~9]。但是, 多年来由于外源污染输入和沉积, 养殖饵料投加, 以及藻类死亡沉降, 使得沉积物成为总氮(TN)和总磷(TP)的主要蓄积库^[10~12]。沉积物内源氮磷释放成为影响水体富营养化的关键因素^[13, 14]。因此, 有效控制内源污染对白

收稿日期: 2021-01-21; 修订日期: 2021-03-13

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2018ZX07110004)

作者简介: 周亚婷(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染修复, E-mail: zhouyating2020@163.com

* 通信作者, E-mail: li-liqing@163.com

洋淀水体水质的进一步提升意义重大。

通过直接去除富含污染物的表层沉积物来控制污染物释放的疏浚工程,已被应用于包括太湖、滇池和巢湖的内源污染与富营养化控制^[15~17]。疏浚深度是环保疏浚工程设计的关键参数之一。目前针对内源营养负荷控制应用较多的清淤深度确定方法包括 TN 和 TP 垂直分布拐点法、吸附解吸法和分层释放法^[15,18]。宋倩文^[19]的研究分析了太湖梅梁湾沉积物 TP 垂向变化,确定梅梁湾的疏浚深度为 17 cm。王雯雯等^[20]的研究应用吸附解吸法对太湖竺山湾环保疏浚示范工程确定的疏浚深度为 0.4~0.7 m,同时建立了氮、磷吸附解吸平衡浓度与沉积物 TN 和 TP 含量对应关系。太湖五里湖清淤工程根据分层释放法确定的疏浚深度为 0.2~0.7 m,与拐点法确定的清淤深度相差不大^[15]。杨盼等^[21]通过研究巢湖南淝河河口底泥 TN、TP 和重金属垂向分布特征,确定了南淝河河口区域的重点疏浚区域清淤深度为 0.3 m。

在疏浚深度确定方法上 TN 和 TP 垂向分布拐点法、吸附解吸方法和分层释放法等 3 种方法具有相似性。沉积物对氮、磷吸附解吸平衡浓度本质上反映了沉积物中交换态氮、磷的含量^[22,23]。而沉积物交换态氮、磷含量除了与沉积物中 TN 和 TP 相关外,还受沉积物所处氧化还原条件、有机质矿化和降解过程影响^[24]。分层释放法是在实验室模拟自然条件下沉积物中有机质矿化、降解和吸附解吸等过程对氮、磷释放的影响^[25]。因此,这 3 种方法确定的疏浚深度,都与沉积物中 TN 和 TP 垂向分布变化密切相关。

白洋淀生态清淤关键技术与资源化工程示范项目选择了白洋淀 2 种主要水体类型:开阔淀和鱼塘开展内源治理示范。本研究采用沉积物 TN 和 TP 垂向分布拐点法与吸附解吸平衡浓度法,开展了清淤深度确定研究,探讨并建立了白洋淀沉积物对氮、磷吸附解吸平衡浓度与沉积物 TN 和 TP 含量的关系,以期对白洋淀清淤示范工程疏浚深度设计提供科学依据,并为以沉积物 TN 和 TP 含量作为清淤判别依据提供参考。

1 材料与方法

1.1 水样与沉积物样品采集

白洋淀位于河北省雄安新区,地理位置为 115°38′~116°07′E, 38°43′~39°02′N,四周以堤坝为界,是华北地区最大的淡水湖泊。调查研究白洋淀面积为 315.6 km²。其中,苇地 104.7 km²,开阔水体 48.2 km²,坑塘 42.6 km²,住宅用地 15.6 km²,娱乐用地 1.6 km²,水田 24.3 km²,旱地 78.1 km²,林地 0.5 km²(图 1)。白洋淀水体主要由苇地、开阔水体和坑塘组成,苇地占比 33.2%,开阔水体占比 15.3%,坑塘占比 13.5%,合计占比 61.9%(图 1)。

白洋淀生态清淤关键技术与资源化工程示范项目针对 2 种主要水体类型:开阔淀和鱼塘开展清淤工程示范,包括南刘庄片区和采蒲台片区(图 1)。南刘庄清淤示范区位于南刘庄村东府河入淀区南侧,水体类型为淀(0.25 km²)和鱼塘养殖区(0.26 km²)。采蒲台清淤示范区位于采蒲台村南侧,引黄补淀通道上,主要为鱼塘养殖区(0.37 km²)。2019 年 8 月对白洋淀府河入淀区、府河入淀

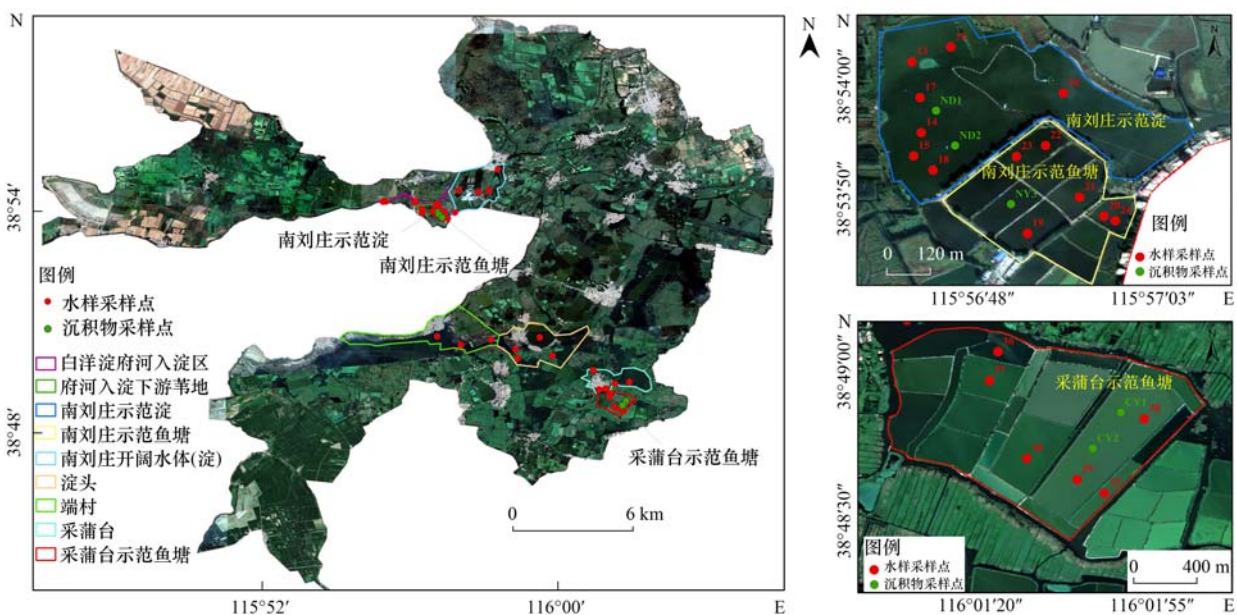


图 1 白洋淀南刘庄与采蒲台清淤示范工程区与采样点分布

Fig. 1 Location of dredging demonstration areas and sampling sites in the Baiyangdian Lake

下游苇地、南刘庄示范淀、南刘庄示范鱼塘、南刘庄开阔水体(淀)、淀头、端村、采蒲台和采蒲台示范鱼塘的9个片区共47个样点进行水质监测、采样和分析(图1)。

为了研究确定白洋淀沉积物清淤深度,对南刘庄清淤示范区开阔水体淀采集2个沉积柱(ND1和ND2),南刘庄示范鱼塘采集1个沉积柱(NY3,图1),采蒲台清淤示范区鱼塘采集2个沉积柱(CY1和CY2,图1),柱样采集后迅速运至实验基地,柱状样以10 cm间隔分层,并进行样品颜色性状描述记录。每个样品均匀分为3份,分别用于冷冻保存、鲜样测定和冷冻干燥处理。同时对于0~10 cm和10~20 cm表层样品,取适量鲜样,离心过滤收集孔隙水。冷冻干燥后样品,经研磨和过筛(1 mm)后保存,待测定。

1.2 水质与沉积物基本理化性质测定

现场采用YSI便携式多参数水质仪(ProPlus)测定:水温(T)、pH、EC、DO和ORP。室内测定分析的水指标包括:COD、Chl-a、TN、PON、DN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、DON、TP、PP、DP、DOP和SRP,均参照文献[26]的方法测定。沉积物测定指标包括:含水率、pH、TN、TP、KCl浸提态 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、KCl浸提态 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和KCl浸提态SRP,均按照文献[27]的方法测定。

1.3 沉积物氮、磷吸附解吸实验

称取0.40 g沉积物样品于50 mL离心管中,按水土比100:1加入用 NH_4Cl 配制的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为0、0.15、0.20、0.50、1.00、1.50、2.00、4.00和8.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 溶液。于25℃下振荡2 h,离心(10 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$, 10 min),取上清液过0.45 μm 混合纤维滤膜后用纳氏试剂分光光度法测定水样中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度。本实验平行3次。

称取0.40 g沉积物样品于50 mL离心管中,按水土比100:1加入用 KH_2PO_4 配制含P浓度为0、0.01、0.02、0.025、0.05、0.10、0.20、0.40和0.80 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 溶液。于25℃下振荡48 h,离心(10 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$, 10 min),取上清液过0.45 μm 混合纤维滤膜后用钼锑抗分光光度法测定水样中溶解反应磷(SRP)。本实验平行3次。

1.4 数据处理与分析方法

单位质量沉积物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与SRP的吸附/解吸量 $Q(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ 根据式(1)计算:

$$Q = (c_0 - c_e) \times V/W \quad (1)$$

式中, c_0 为溶液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 或SRP初始浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; c_e 为吸附解吸平衡时溶液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 或SRP浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; V 为溶液体积,mL; W 为沉积物质量,g。

当溶液浓度较低时沉积物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与SRP吸附等温式可表达为:

$$Q = K_d c_e - Q_0 \quad (2)$$

式中, Q 为沉积物 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与SRP的吸附/解吸量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; K_d 为沉积物-水体系 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 或SRP固液分配系数($\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$),表征沉积物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 或SRP吸附解吸强度; c_e 为吸附解吸平衡时溶液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 或SRP浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); Q_0 为当溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与SRP初始浓度为0时,沉积物 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与SRP解吸量。利用回归法即可计算出沉积物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 或SRP吸附/解吸量 Q 为0时,对应溶液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 或SRP浓度,分别称为 ENC_0 和 EPC_0 。

2 结果与讨论

2.1 白洋淀清淤示范区与其他片区水质现状

白洋淀南刘庄、采蒲台清淤示范区与其他片区水质见表1。府河、府河下游苇地、南刘庄示范淀、南刘庄示范鱼塘、南刘庄、淀头、端村、采蒲台和采蒲台示范鱼塘水体pH的变化范围为7.60~8.61,均值8.28,变异系数为3.8%。府河入淀断面pH低于其他8个片区水体pH。9个片区水体TN浓度的变化范围为1.28~4.74 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值2.54 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,变异系数为45.3%,具有明显的空间差异。府河、府河下游苇地、南刘庄示范淀和南刘庄水体TN浓度分别为4.74、3.73、3.14和2.59 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,明显高于淀头、端村和采蒲台水体TN浓度。淀头、端村和采蒲台水体为IV~V类水质,采蒲台鱼塘水体TN浓度(2.51 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)明显高于南刘庄鱼塘水体(1.65 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。府河方向是白洋淀水体氮素的主要来源。9个片区水体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化范围为0.45~1.72 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值为0.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,变异系数51.6%,具有明显的空间差异。府河、府河下游苇地和南刘庄示范淀水体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别为1.72、1.19和0.84 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,明显高于淀头、端村和采蒲台水体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度。白洋淀9个片区水体TP浓度变化范围为0.1~0.78 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值0.25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,变异系数87.4%,具有明显的空间差异。南刘庄和采蒲台示范淀鱼塘水体TP浓度分别为0.78 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和0.39 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,显著高于其他7个片区。其他7个片区水体TP浓度范围为0.10~0.17 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。SRP浓度变化范围为0.01~0.55 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值0.09 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,变异系数196.8%,具有明显空间差异。府河和南刘庄示范淀鱼塘水体SRP浓度分别为0.10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和0.55 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。明显高于其他7个片区,其余片区水体SRP浓度变化范围为0.01~0.03 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。9个片

区 Chl-a 浓度变化范围为 26.4 ~ 101.3 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 均
值 54.2 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 变异系数为 45.3%, 具有明显的空
间差异. 采蒲台示范鱼塘水体 Chl-a 浓度明显高于
其他 8 个片区.

表 1 白洋淀清淤示范工程区及其他片区水质现状

Table 1 Water quality in the dredging demonstration areas and other areas in the Baiyangdian Lake													
片区	n	pH		TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		$\text{NH}_4^+/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		SRP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		Chl-a/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	
		均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
1 府河入淀区	8	7.60	0.29	4.74	0.37	1.72	0.44	0.23	0.06	0.10	0.07	26.4	13.3
2 府河下游苇地	3	8.19	0.15	3.73	0.67	1.19	0.21	0.16	0.02	0.03	0.01	40.5	38.6
3 南刘庄示范淀	7	8.53	0.15	3.14	0.50	0.84	0.20	0.16	0.01	0.03	0.01	79.2	32.6
4 南刘庄示范鱼塘	6	8.59	0.19	1.65	0.51	0.59	0.38	0.78	0.44	0.55	0.41	27.1	13.4
5 南刘庄开阔水体	5	8.17	0.21	2.59	0.26	0.72	0.04	0.15	0.04	0.02	0.01	67.2	23.2
6 淀头区开阔水体	4	8.30	0.30	1.60	0.41	0.45	0.13	0.10	0.03	0.01	0.00	49.8	23.8
7 端村区开阔水体	3	8.16	0.13	1.28	0.12	0.61	0.07	0.17	0.05	0.01	0.01	51.9	14.4
8 采蒲台开阔水体	6	8.40	0.28	1.65	0.19	0.45	0.05	0.11	0.04	0.02	0.02	44.6	19.3
9 采蒲台示范鱼塘	5	8.61	0.13	2.51	0.60	0.63	0.20	0.39	0.11	0.03	0.02	101.3	75.5
最小值		7.60		1.28		0.45		0.10		0.01		26.4	
最大值		8.61		4.74		1.72		0.78		0.55		101.3	
平均值		8.28		2.54		0.80		0.25		0.09		54.2	
标准差		0.31		1.15		0.41		0.22		0.18		24.5	
变异系数/%		3.8		45.3		51.6		87.4		196.8		45.3	

2.2 清淤工程示范区沉积物中含水率、有机碳
(TOC)、TN 和 TP 垂直分布特征

清淤示范区南刘庄淀、鱼塘和采蒲台示范区鱼
塘沉积物中含水率、TOC、TN 和 TP 垂直分布见图
2. 5 个样点的含水率、TOC、TN 和 TP 都表现为随
深度增加而减小, 并出现明显的拐点, 至一定深度以
下含水率、TOC、TN 和 TP 含量稳定、保持不变. 表
层沉积物有机碳、TN 和 TP 显著高于下层, 因此可
根据有机碳、TN 和 TP 垂直变化特点判别沉积物污
染层. 南刘庄示范区淀 ND1 样点 TOC、TN 和 TP 含
量减小的拐点出现的深度约为 (50 ± 10) cm, 对应
TOC、TN 和 TP 含量分别为 0.50% (质量分数, 下
同)、 $750 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 同时含水率也从
50 cm 开始低于 50%, 并保持不变. 南刘庄示范区淀
ND2 样点 TOC、TN 和 TP 含量减小的拐点出现的深
度约为 (40 ± 10) cm, 对应 TOC、TN 和 TP 含量与

ND1 拐点处量基本相同, 同时含水率也从 40 cm 开
始低于 50%, 并保持不变. 因此南刘庄清淤示范区淀
水体沉积物污染层为 40 ~ 50 cm. 南刘庄示范区鱼
塘 NY1 样点综合 TOC、TN 和 TP 含量垂直变化, 拐
点出现深度约为 (30 ± 10) cm, 是鱼塘水体沉积物的
污染层. 采蒲台示范区鱼塘 2 个样点 CY1 和 CY2 的
沉积物中 TOC、TN 和 TP 含量随深度变化非常相
似, TOC、TN 和 TP 含量减小的拐点出现深度约为
 (30 ± 10) cm, 对应 TOC、TN 和 TP 含量也分别为
0.50%、 $750 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 同时含水率也
从 30 cm 开始低于 50%, 并保持不变, 0 ~ 30 cm 是
沉积物的主要污染层.

因此根据沉积物中 TOC、TN 和 TP 含量垂向变
化及拐点出现深度, 南刘庄示范区淀水体清淤深度
建议为 (50 ± 10) cm, 南刘庄示范区鱼塘清淤深度建
议为 (30 ± 10) cm, 采蒲台示范区鱼塘水体清淤深度

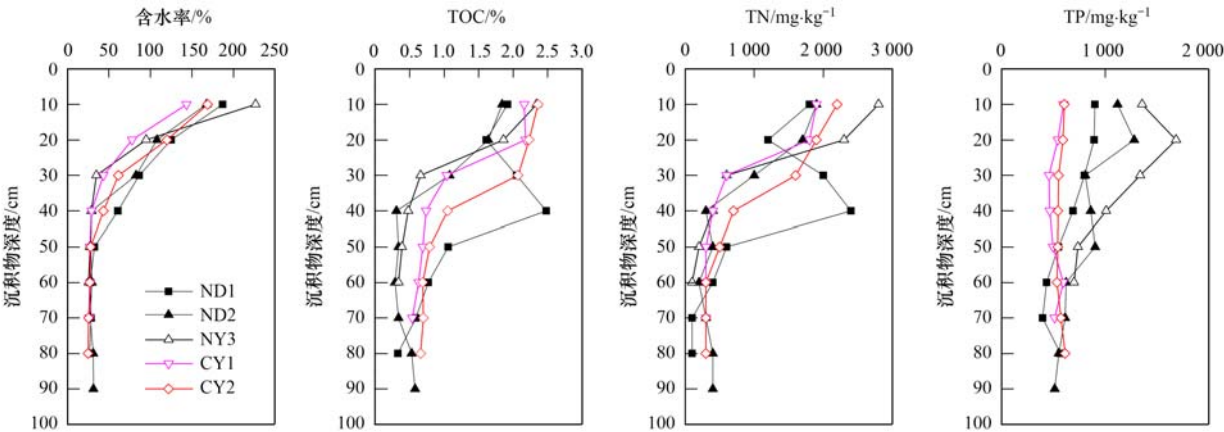


图 2 清淤工程示范区沉积物中含水率、有机碳、总氮和总磷垂直分布特征

Fig. 2 Vertical distribution of water content, TOC, TN, and TP in sediments from the dredging demonstration areas in the Baiyangdian Lake

建议为 (30 ± 10) cm.

2.3 清淤工程示范区不同深度沉积物对氮、磷吸附/解吸特征的影响

沉积物对水溶液 NH_4^+ -N 与 SRP 吸附/解吸特征, 可作为沉积物内源向上覆水体释放氮、磷风险的主要参考. 通过对不同深度沉积物对 NH_4^+ -N 与 SRP 吸附/解吸特征研究, 获取不同深度沉积物 NH_4^+ -N 与 SRP 吸附/解吸平衡浓度 (ENC_0 和 EPC_0), 并与上覆水体水质或水体目标水质比较, 找出沉积物 ENC_0 或 EPC_0 大于上覆水体相应 NH_4^+ -N 和 SRP 浓度的层, 是水体氮或磷源, 相应的沉积物厚度可设计为清淤深度. 南刘庄和采蒲台清淤示范区 5 个样点沉积物对 NH_4^+ -N 与 SRP 吸附/解吸平衡浓度 (ENC_0 和 EPC_0) 垂直分布见图 3. 5 个样点沉积物 NH_4^+ -N 吸附解吸平衡浓度随沉积物深度增加均表现出明显的下降趋势, 表明随深度增加沉积物对 NH_4^+ -N 释放风险降低. 以上覆水体水质 IV 类 TN ($1.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 为目标判别, 南刘庄示范区淀水体 ND1 和 ND2 样点沉积物清淤深度应达到 (50 ± 10) cm. 南刘庄示范区鱼塘水体 NY3 样点沉积物清淤深度应达到 30 cm. 采蒲台示范区鱼塘 CY1 和 CY2 样点沉积物清淤深度应达到 20 ~ 30 cm.

5 个样点沉积物 SRP 吸附解吸平衡浓度随深度增加整体上表现为下降趋势, 但是存在波动. 另外南刘庄示范区鱼塘沉积物在 0 ~ 60 cm 剖面上 SRP 吸附/解吸平衡浓度明显高于其他 3 个样点, 这可能与其上覆水体高 SRP 浓度密切相关. 以上覆水体水质 IV 类 TP ($0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 为目标判别, 南刘庄示范区清淤示范区淀 ND1 和 ND2 样点沉积物清淤深度应达到 (50 ± 10) cm, 与沉积物 NH_4^+ -N 吸附解吸平衡浓度判别一致. 而南刘庄示范区鱼塘沉积物 SRP 吸附

解吸平衡浓度垂直分布特点不适作为清淤深度的判别依据. 采蒲台示范区鱼塘 CY1 样点沉积物 SRP 吸附解吸平衡浓度垂向变化不明显, 也不适作为清淤深度判别的依据.

2.4 沉积物对 NH_4^+ -N 与 SRP 吸附/解吸平衡浓度与 TN 和 TP 含量相关性

鉴于采用沉积物氮、磷含量垂向分布拐点法与吸附解吸平衡浓度确定的清淤深度具有明显的相似性与一致性. 本研究分析了南刘庄和采蒲台清淤示范区 5 个样点沉积物对 NH_4^+ -N 吸附/解吸平衡浓度 (ENC_0) 与 KCl 交换态 NH_4^+ -N 和 TN 含量相关性 (图 4). KCl 交换态 NH_4^+ -N 含量是影响 ENC_0 变化的主要因素 ($R^2 = 0.81, P < 0.01$), 因此 ENC_0 本质上反映了沉积物可交换态 NH_4^+ -N 含量. 虽然 ENC_0 与沉积物 TN 含量相关性 ($R^2 = 0.58, P < 0.01$) 没有与 KCl 交换态 NH_4^+ -N 含量相关性高, 但是也达到了显著水平. 沉积物 TN 含量也是影响 ENC_0 的主要因素, 沉积物 TN 含量越高, 交换态 NH_4^+ -N 含量越高, 沉积物向上覆水体释放 NH_4^+ -N 风险越高. 因此可以通过 ENC_0 间接建立沉积物 TN 含量对上覆水体释放 NH_4^+ -N 的风险. 同样, 南刘庄、采蒲台清淤示范区不同层沉积物对 SRP 吸附/解吸平衡浓度 (EPC_0) 与 KCl 浸提态磷和 TP 也存在不同程度的相关性, 相关系数 R^2 分别为 0.72 和 0.58, 所以交换态磷和 TP 是影响 EPC_0 的主要因素.

从图 4 中可以看出, 当沉积物 TN 含量为 $750 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, NH_4^+ -N 吸附解吸平衡浓度为 $1.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 随着沉积物 TN 含量升高 ENC_0 呈线性增加的趋势. 同样, 当沉积物 TP 含量为 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, SRP 吸附解吸平衡浓度为 $0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 随着沉积物 TP 含量升高 EPC_0 呈线性增加的趋势. 因此根据沉积物 TN 和 TP 含量垂向分布拐点法与吸附解吸平衡浓度法分别确定的清淤深度是一致的, 利用沉积物 TN 和 TP 含量可以预测沉积物对上覆水体释放氮、磷的风险. 当沉积物 TN 和 TP 含量分别大于 $750 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 沉积物 ENC_0 和 EPC_0 分别大于 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 特别是表层 0 ~ 30 cm 沉积物 ENC_0 和 EPC_0 最高可达到 $7.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而目前南刘庄和采蒲台清淤示范区水质都低于这一数值 (表 1), 所以可以认为南刘庄、采蒲台清淤示范区沉积物有向上覆水体释放氮、磷的趋势, 沉积物是水体营养的来源. 清淤深度沉积物 TN 和 TP 控制值建议分别选择 $750 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 南刘庄示范区淀水体清淤深度为 (50 ± 10) cm, 南刘庄示范区鱼塘清淤

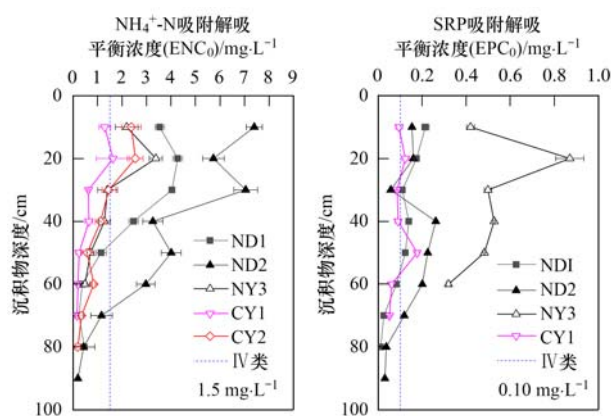


图3 白洋淀清淤工程示范区沉积物 NH_4^+ -N 与 SRP 吸附解吸平衡浓度 (ENC_0 和 EPC_0) 垂向分布

Fig. 3 Vertical distribution of the equilibrium N and P concentrations at zero net sorption and desorption (ENC_0 and EPC_0) in sediments from the dredging demonstration areas in the Baiyangdian Lake

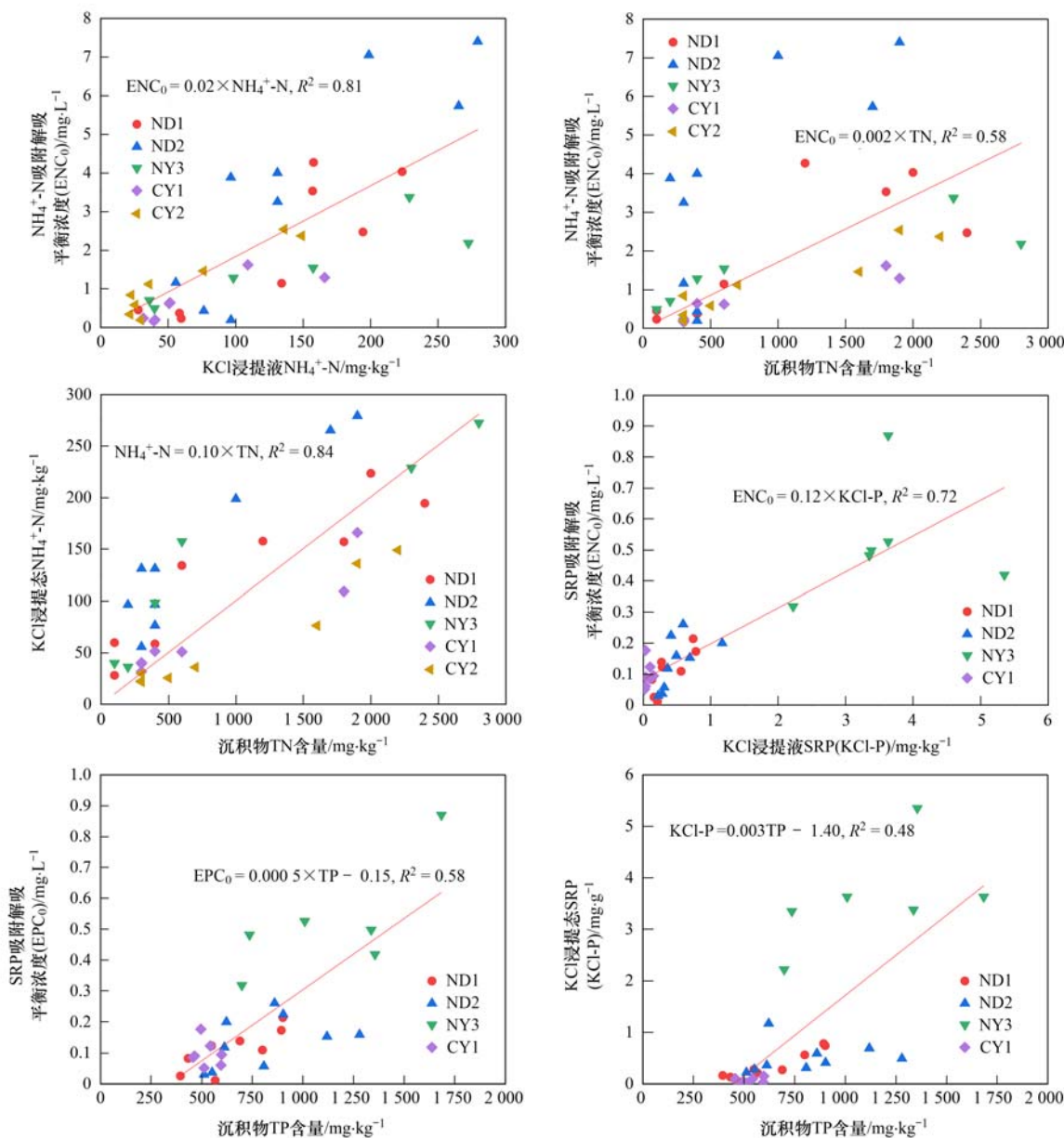


图4 沉积物吸附解吸平衡浓度NH₄⁺-N与SRP吸附/解吸平衡浓度(ENC₀和EPC₀)与沉积物交换态氮/磷、总氮/磷相关性

Fig. 4 Relationships between the equilibrium N and P concentrations at zero net sorption and desorption (ENC₀ and EPC₀) and exchangeable and total nitrogen and phosphorus in sediments

深度为(30±10)cm,采蒲台示范区鱼塘清淤深度为(30±10)cm.王雯雯等^[20]提出太湖竺山湾沉积物TN和TP控制值分别为1377和497mg·kg⁻¹(目标水质Ⅳ).宋倩文^[19]提出太湖梅梁湾沉积物TP清淤控制值为561mg·kg⁻¹.白洋淀清淤沉积物TP控制值与太湖竺山湾和梅梁湾沉积物TP控制值相似,TN控制值低于太湖梅梁湾沉积物TN控制值.

3 结论

(1)白洋淀清淤工程示范区根据沉积物TN和TP含量垂向分布拐点法与吸附解吸平衡浓度法分别确定的清淤深度是一致的.南刘庄示范区淀水体

清淤深度为(50±10)cm,南刘庄示范区鱼塘清淤深度为(30±10)cm,采蒲台示范区鱼塘水体清淤深度为(30±10)cm.

(2)沉积物对NH₄⁺-N与SRP吸附/解吸平衡浓度(ENC₀和EPC₀)与沉积物氮、磷交换态含量和总量显著相关,利用沉积物TN和TP含量可以预测沉积物向上覆水体释放氮、磷的风险.

(3)南刘庄和采蒲台清淤示范区沉积物有向上覆水释放氮、磷的趋势,沉积物是水体营养的来源.判别清淤深度的沉积物TN和TP控制值建议分别选择750mg·kg⁻¹和500mg·kg⁻¹,沉积物剖面TN含量大于750mg·kg⁻¹、TP含量大于500mg·kg⁻¹,可设计为清淤层.

参考文献:

- [1] Huisman J, Codd G A, Paerl H W, *et al.* Cyanobacterial blooms [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2018, **16**(8): 471-483.
- [2] Søndergaard M, Lauridsen T L, Johansson L S, *et al.* Nitrogen or phosphorus limitation in lakes and its impact on phytoplankton biomass and submerged macrophyte cover [J]. *Hydrobiologia*, 2017, **795**(1): 35-48.
- [3] Tu L Y, Jarosch K A, Schneider T, *et al.* Phosphorus fractions in sediments and their relevance for historical lake eutrophication in the Ponte Tresa basin (Lake Lugano, Switzerland) since 1959 [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **685**: 806-817.
- [4] Yang C H, Yang P, Geng J, *et al.* Sediment internal nutrient loading in the most polluted area of a shallow eutrophic lake (Lake Chaohu, China) and its contribution to lake eutrophication [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **262**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114292.
- [5] 易雨君, 林楚翘, 唐彩红. 1960s 以来白洋淀水文、环境、生态演变趋势[J]. *湖泊科学*, 2020, **32**(5): 1333-1347.
- Yi Y J, Lin C Q, Tang C H. Hydrology, environment and ecological evolution of Lake Baiyangdian since 1960s [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(5): 1333-1347.
- [6] 王欢欢, 白洁, 刘世存, 等. 白洋淀近 30 年水质时空变化特征[J]. *农业环境科学学报*, 2020, **39**(5): 1051-1059.
- Wang H H, Bai J, Li S J, *et al.* Spatial and temporal variations in the water quality of Baiyangdian Lake in the recent 30 years [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(5): 1051-1059.
- [7] 阳小兰, 张茹春, 毛欣, 等. 白洋淀水体氮磷时空分布与富营养化分析[J]. *江苏农业科学*, 2018, **46**(24): 370-373.
- Yang X L, Zhang R C, Mao X, *et al.* Analysis of spatial and temporal distribution of nitrogen and phosphorus and eutrophication of water in Baiyangdian Lake [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, **46**(24): 370-373.
- [8] 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 等. 雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体溶解性有机物的空间分布、光谱特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 213-223.
- Zhou S L, Sun Y, Zhang Y R, *et al.* Spatial distribution, spectral characteristics, and sources analysis of dissolved organic matter from Baiyangdian Lake in Xiong'an New District during the winter freezing period [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 213-223.
- [9] 李娜, 周绪申, 孙博闻, 等. 白洋淀浮游植物群落的时空变化及其与环境因子的关系[J]. *湖泊科学*, 2020, **32**(3): 772-783.
- Li N, Zhou X S, Sun B W, *et al.* Spatiotemporal variation of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in the Lake Baiyangdian [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(3): 772-783.
- [10] 孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 等. 基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2624-2631.
- Kong X L, Wang S Q, Ding F, *et al.* Source of nitrate in surface water and shallow groundwater around Baiyangdian Lake area based on hydrochemical and stable isotopes [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2624-2631.
- [11] 刘鑫, 史斌, 孟晶, 等. 白洋淀水体富营养化和沉积物污染时空变化特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(5): 2127-2136.
- Liu X, Shi B, Meng J, *et al.* Spatio-temporal variations in the characteristics of water eutrophication and sediment pollution in Baiyangdian Lake [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 2127-2136.
- [12] 汪敬忠, 刘卓, 魏浩, 等. 白洋淀表层沉积物元素的空间特征、风险评价及来源分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 224-231.
- Wang J Z, Liu Z, Wei H, *et al.* Spatial characteristics, risk assessment, and source analysis of elements in surface sediments from the Baiyangdian Lake [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 224-231.
- [13] 朱曜曜, 金鑫, 孟鑫, 等. 白洋淀沉积物氨氮释放通量研究[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(6): 2435-2444.
- Zhu Y Y, Jin X, Meng X, *et al.* Study on ammonia nitrogen release flux in the sediment-water interface of Baiyangdian Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(6): 2435-2444.
- [14] 杜奕衡, 刘成, 陈开宁, 等. 白洋淀沉积物氮磷赋存特征及其内源负荷[J]. *湖泊科学*, 2018, **30**(6): 1537-1551.
- Du Y H, Liu C, Chen K N, *et al.* Occurrence and internal loadings of nitrogen and phosphorus in the sediment of Lake Baiyangdian [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(6): 1537-1551.
- [15] 范成新, 钟继承, 张路, 等. 湖泊底泥环保疏浚决策研究进展与展望[J]. *湖泊科学*, 2020, **32**(5): 1254-1277.
- Fan C X, Zhong J C, Zhang L, *et al.* Research progress and prospect of environmental dredging decision-making of lake sediment [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(5): 1254-1277.
- [16] 范成新. 湖泊沉积物—水界面研究进展与展望[J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(5): 1191-1218.
- Fan C X. Advances and prospect in sediment-water interface of lakes: a review [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(5): 1191-1218.
- [17] 吴永红, 胡俊, 金向东, 等. 滇池典型湖湾沉积物氮磷化学特性及疏浚层推算[J]. *环境科学*, 2005, **26**(4): 77-82.
- Wu Y H, Hu J, Jin X D, *et al.* Chemical characteristics of nitrogen and phosphorus in the sediments of the typical bays in Dianchi Lake and calculation of their dredging layers [J]. *Environmental Science*, 2005, **26**(4): 77-82.
- [18] 周小宁, 姜霞, 金相灿, 等. 太湖梅梁湾沉积物磷的垂直分布及环保疏浚深度的推算[J]. *中国环境科学*, 2007, **27**(4): 445-449.
- Zhou X N, Jiang X, Jin X C, *et al.* Vertical profiles of phosphorus in the sediments of Meiliang Bay of Taihu Lake in China and calculation of environmental dredging depth [J]. *China Environmental Science*, 2007, **27**(4): 445-449.
- [19] 宋倩文. 太湖沉积物磷形态空间分布的研究及其环保疏浚范围的确定[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- Song Q W. The distribution of phosphorus fractions in the sediments in Taihu Lake and the range of dredging [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013.
- [20] 王雯雯, 姜霞, 王书航, 等. 太湖竺山湾污染底泥环保疏浚深度的推算[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(6): 1013-1018.
- Wang W W, Jiang X, Wang S H, *et al.* Calculation of environmental dredging depth of contaminated sediments in Zhushan Bay of Taihu Lake [J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(6): 1013-1018.
- [21] 杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 等. 巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 712-722.
- Yang P, Yang C H, Ma X Y, *et al.* Sediment pollution characteristics and dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 712-722.
- [22] 姜霞, 王秋娟, 王书航, 等. 太湖沉积物氮磷吸附/解吸特征分析[J]. *环境科学*, 2011, **32**(5): 1285-1291.

- Jiang X, Wang Q J, Wang S H, *et al.* Characteristic analysis of the adsorption/desorption of nitrogen and phosphorus in the sediments of Taihu Lake[J]. *Environmental Science*, 2011, **32** (5): 1285-1291.
- [23] 庞燕, 金相灿, 王圣瑞, 等. 长江中下游浅水湖沉积物对磷的吸附特征—吸附等温线和吸附/解吸平衡质量浓度[J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(S1): 18-23.
- Pang Y, Jin X C, Wang S R, *et al.* Characters of phosphorus sorption in sediment of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River: sorption isotherms and adsorption-desorption equilibrium mass concentration [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, **17**(S1): 18-23.
- [24] McDowell R W. Relationship between sediment chemistry, equilibrium phosphorus concentrations, and phosphorus concentrations at baseflow in rivers of the New Zealand national river water quality network [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2015, **44**(3): 921-929.
- [25] 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 M, 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.
- [26] 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.
- [27] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.



CONTENTS

Continuous PM _{2.5} Composition Measurements for Source Apportionment During Air Pollution Events	CAI Fan-tao, SHANG Yue, DAI Wei, <i>et al.</i> (4575)
Orographic Influences on the Spatial Distribution of PM _{2.5} on the Fen-Wei Plain	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, SUN Cong-jian, <i>et al.</i> (4582)
Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Under Winter Haze Conditions in Central China: A Case Study of Huanggang, Hubei Province	LI Xing-yu, MAO Yao, CHEN Zhan-le, <i>et al.</i> (4593)
Concentration and Reactivity of Carbonyl Compounds in the Atmosphere of North China	HUANG Yu, CHEN Xi, WANG Ying-hong, <i>et al.</i> (4602)
Characteristics of O ₃ Pollution and Key Precursors in Chengdu During Spring	HAN Li, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (4611)
O ₃ Source Characteristics of an Industrial Area in the Yangtze River Delta Based on Boundary Observations	HUANG Qing, HUANG Yin-zhi, ZHANG Shan, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics and Source of VOCs During O ₃ Pollution Between August to September, Langfang Development Zones	ZHANG Jing-qiao, WANG Hong-liang, FANG Xiao-yun, <i>et al.</i> (4632)
Coating-derived VOCs Emission Characteristics and Environmental Impacts from the Furniture Industry in Guangdong Province	ZENG Chun-ling, SHAO Xia, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (4641)
Response of Air Quality to COVID-19 Lockdown in Xiamen Bay	XU Chao, WU Shui-ping, LIU Yi-jing, <i>et al.</i> (4650)
Similarities and Differences of Valley Winds in the Beijing Plain and Yanqing Areas and Its Impact on Pollution	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4660)
Characteristics of Atmospheric Particulate Matter Pollution and the Unique Wind and Underlying Surface Impact in the Twain-Hu Basin in Winter	ZHU Yan, ZHAO Tian-liang, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (4669)
Conversion Characterizations of Sulfate Ion and Nitrate Ion in Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	YANG Liu, HE Qing, SHENG Zhong-yi (4678)
Water Chemical Characteristics and Influence of Exogenous Acids in the Yangtze River Basin	WANG Qi, YU Shi, JIANG Ping-ping, <i>et al.</i> (4687)
Effects of Land Use on Nutrient Concentrations in the Inflow River of Lake Taihu, China	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4698)
Diversity of Zooplankton and Niche Characteristics of Keystone Species in the Weihe River Based on eDNA	LIANG Dong, XIA Jun, SONG Jin-xi, <i>et al.</i> (4708)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical and Personal Care Products in the Aquatic Environment of Sanya City, China	REN Bing-nan, GENG Jing (4717)
Screening of Priority Pollutants and Risk Assessment for Surface Water from Shengjin Lake	GONG Xiong-hu, DING Qi-qi, JIN Miao, <i>et al.</i> (4727)
Long-term Changes and Drivers of Ecological Security in Shahe Reservoir, China	YANG Wen-bin, DUAN Wen-xiu, CUI Yang, <i>et al.</i> (4739)
Seasonal Variation and Influencing Factor Analysis of Antibiotic Resistance Genes in Water Supply Reservoirs of Central China	ZHANG Kai, XIN Rui, LI Kuang-jia, <i>et al.</i> (4753)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of NO ₃ -Type Groundwater in the Rapidly Urbanizing Pearl River Delta	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (4761)
Spatial Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water in the Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i> (4772)
Identification of Dredging Depths Based on Sediment Vertical Distribution Profiles of Total Nitrogen and Total Phosphorus and Their Adsorption-desorption Equilibria	ZHOU Ya-ting, CHEN Xing-hong, LI Li-qing, <i>et al.</i> (4781)
Role of Borate and Phosphate Buffers in the Degradation of Organic Compounds in a PMS/Co ²⁺ System: Influencing Factors and Mechanisms	WAN Qi-qi, CHEN Zhu-hao, CAO Rui-hua, <i>et al.</i> (4789)
Degradation 2,2',4,4'-Tetrabromodiphenyl Ether by Activated Peroxymonosulfate Using Magnetic Biochar Supported α -MnO ₂	LI Xin, YIN Hua, LUO Hao-yu, <i>et al.</i> (4798)
Characteristics and Mechanisms of Bacteriophage MS2 Inactivation in Water by UV Activated Sodium Persulfate	ZHANG Chong-miao, YANG Hao-ming, WANG Zhen (4807)
Adsorption Characteristics of Phosphate on Cerium Modified Water Hyacinth Biochar	WANG Guang-ze, ZENG Wei, LI Shuai-shuai (4815)
Removal Efficiency and Mechanism of Ammonia Nitrogen in a Low Temperature Groundwater Purification Process	LI Dong, LIU Meng-hao, ZHANG Rui-miao, <i>et al.</i> (4826)
Speciation and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal(loid)s in the Municipal Sewage Sludge of China	GENG Yuan-meng, ZHANG Chuan-bing, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (4834)
Meta-analysis of Microbial Communities in the Activated Sludge of Wastewater Treatment Plants Under Different Climate Types	YANG Si-hang, QIN Ze-sheng, LIANG Man-chun (4844)
Partial Nitrification and Anaerobic Ammonia Oxidation Synergistic Denitrification to Remove Nitrogen and Carbon from Domestic Sewage	QIN Yan-rong, YUAN Zhong-ling, ZHANG Ming, <i>et al.</i> (4853)
Cultivation and Performance Analysis of Simultaneous Partial Nitrification, ANAMMOX, and Denitrification Granular Sludge	ZHOU Feng, LIU Yong-di, LI Wei (4864)
Application of Various Methods to Extract Microplastic from Typical Soils in China	ZHAO Xiao-li, LIU Zi-han, CONG Chen-yu, <i>et al.</i> (4872)
Evaluation and Sources of Heavy Metal Pollution in the Surface Soil of the Qaidam Basin	CHEN Liang, ZHANG Xi-ying, TANG Qi-liang, <i>et al.</i> (4880)
Content and Ecological Risks of Heavy Metals in Soil with Different Land Uses in a Rapidly Urbanizing Area	LI Meng-ting, SHEN Cheng, WU Jian, <i>et al.</i> (4889)
Selenium Geochemical Characteristics and Influencing Factors of Paddy Fields in Du'an County, Guangxi	LIU Fei, YANG Ke, XU Ren-ting, <i>et al.</i> (4897)
Carbonized Apple Branches Decrease the Accumulation and Damage of Cadmium on Apple Rootstock by Reducing DTPA-Cd in Soil	DENG Bo, XUN Mi, ZHANG Wei-wei, <i>et al.</i> (4908)
Accumulation and Health Risk of Heavy Metals in Cereals, Vegetables, and Fruits of Intensive Plantations in Hainan Province	YANG Jian-zhou, WANG Zhen-liang, GAO Jian-weng, <i>et al.</i> (4916)
Correlation Analysis among Environmental Antibiotic Resistance Genes Abundance, Antibiotics Concentrations, and Heavy Metals Concentrations Based on Web of Science Searches	MIAO Sun, CHEN Lei, ZUO Jian-e (4925)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Farmland Soil in Yinchuan	ZHANG Xiao-hong, TAO Hong, WANG Ya-juan, <i>et al.</i> (4933)
Effect of Manure from Different Sources on the Leaching of Antibiotics in Soil	LI Bin-xu, ZHU Chang-xiong, SONG Ting-ting, <i>et al.</i> (4942)
Analysis of the Traits of Nitrogen Metabolism Pathways for Several Forest Soils in Eastern China	LÜ Xue-li, ZHAO Yong-peng, LIN Qing-huo, <i>et al.</i> (4951)
Denitrification Rates and <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria Community Structure Characteristics of Bulk and Rhizosphere Soil in Spring and Summer in the Alpine Wetlands of the Qinghai-Tibet Plateau	LI Yu-qian, MA Jun-wei, GAO Chao, <i>et al.</i> (4959)
Microbial Community Structure of Soil Methanogens and Methanotrophs During Degradation and Restoration of Reed Wetlands in the Songnen Plain	WANG Qiu-ying, WANG Na, LIU Ying, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Fluvio-aquic Soil Under Different Rotation Fallow	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, DAI Hong-cui, <i>et al.</i> (4977)
Response of Photosynthetic Bacterial Community to Cadmium Contamination in Paddy Soil	LUO Lu-yun, JIN De-cai, WANG Dian-dong, <i>et al.</i> (4988)
Community Distribution of the Rhizospheric and Endophytic Bacteria of <i>Phragmites australis</i> and Their Limiting Factors in Iron Tailings	CAO Man-man, WANG Fei, ZHOU Bei-hai, <i>et al.</i> (4998)
Effects of Combination of Organic and Inorganic Nitrogen on Nitrification and Denitrification in Two Salinized Soils	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, ZHANG Wen-cong, <i>et al.</i> (5010)
Response of Yield, CH ₄ , and N ₂ O Emissions from Paddy Fields to Long-term Elevated CO ₂ Concentrations	YU Hai-yang, SONG Kai-fu, HUANG Qiong, <i>et al.</i> (5021)
Effects of Feedstock Material and Pyrolysis Temperature on Dissolved Organic Matter in Biochars	YAN Dai-hong, MA Ya-pei, SONG Kai-yue, <i>et al.</i> (5030)
Spatiotemporal Variations in Atmospheric Urban Heat Island Effects and Their Driving Factors in 84 Major Chinese Cities	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei (5037)
Research Progress in the Odorants and Their Emissions from Indoor Building Decoration Materials	ZHANG Wan-zhong, ZHANG Peng-yi (5046)