

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.04.016

太湖底泥主要营养物质污染特征分析

毛新伟¹, 仵荟颖², 徐 枫¹

(1. 太湖流域水文水资源监测中心, 江苏 无锡 214024; 2. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300202)

摘要:为进一步推进太湖流域水环境综合治理工作, 给太湖水生态清淤提供决策参考, 结合太湖流域管理局2018年组织开展的太湖污染底泥勘察项目调查结果, 对太湖底泥中的有机质、氮磷等营养物质的含量及其平面分布、垂向变化情况进行了分析, 并与2003年底泥调查结果进行了对比。结果表明: 总磷主要集中在竺山湖底泥0~30 cm深度内, 高含量的总氮和有机质主要分布在竺山湖和东太湖; 在外源污染有效控制后, 生态清淤工程有利于降低湖区表层底泥的营养物质含量。

关键词:底泥; 营养物质; 污染特征; 生态清淤; 太湖

中图分类号: TV882.9; X524

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2020)04-0100-05

Analysis of pollution characteristics of main nutrients in Taihu Lake sediment // MAO Xinwei¹, WU Huiying², XU Feng¹ (1. Monitoring Center of Hydrology Water Resources of Taihu Basin, Wuxi 214024, China; 2. China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Co., Ltd., Tianjin 300202, China)

Abstract: In order to further promote the comprehensive treatment of water environment in Taihu Basin and provide decision reference for Taihu Lake water ecological desilting, the content of organic matter, nitrogen, phosphorus and other nutrients in Taihu Lake sediment, as well as their horizontal distribution and vertical changes were analyzed based on the survey results of Taihu Lake polluted sediment investigation project conducted by Taihu Basin Authority in 2018, comparing with those of mud investigation at the end of 2003. The results show that the total phosphorus is mainly distributed in the bottom mud of Zhushan Lake in the depth of 0-30 cm, and the high content of total nitrogen and organic matter are mainly distributed in Zhushan Lake and East Taihu Lake. After the effective control of external pollution, the ecological dredging project is beneficial to reduce the nutrient content of the surface sediment in the lake area.

Key words: sediment; nutrients; pollution characteristics; ecological desilting; Taihu Lake

底泥是湖泊生态系统的重要组成部分,也是营养物质循环的中心环节,底泥的污染状况可间接反映上覆水体的污染状况和湖泊水动力状态^[1]。底泥承接了水体中各类污染物包括营养盐、重金属及有机污染物等,对污染物的迁移转化起着显著的源和汇的作用^[2-4]。20世纪80年代以来,太湖周边地区经济社会迅速发展,但因环境保护措施相对滞后,多年来沉积在底泥中的污染物在某些条件下不断溶出,加上外界污染源的不断流入,导致太湖水质污染和富营养化程度加剧,目前以中度富营养化程度为主,个别水体已达重度富营养化状态^[5-6]。

太湖是一个浅水型湖泊,已有研究表明,当外源污染得到控制时,底泥内源污染释放对水质和蓝藻生成的影响较为明显,其中的营养物质释放将直接影响太湖水质和藻类的聚集暴发^[7-8]。2006—2012

年,相关学者针对太湖底泥有机质、总氮、总磷的污染现状开展了一系列的研究,包括沉积物中氮磷的空间分布特征、沉积物的物理特征及营养盐的时空变化,水生植物氮磷与湖水、底泥氮磷含量的关系,太湖滨湖带底泥氮磷、有机质分布与污染评价情况等^[9-12]。为有效控制底泥对太湖水质的污染,太湖周边各地方政府组织开展了多次生态清淤工作,清除底泥表层的有机质、氮磷等营养物质富集层,切断湖底的物质循环链^[13]。相关研究表明,生态清淤工程可去除大部分底泥污染物,有利于改善水质和水生态环境;然而另有研究表明,99.7%的持续性有害污染物被吸附在直径小于74 μm的细颗粒上,疏浚产生的强烈扰动易引起细颗粒泥沙再悬浮,从而增大了底泥污染物释放的概率^[4,14-16]。2007年太湖蓝藻暴发事件发生后,太湖西北沿岸区、竺山湖、梅梁

湖的西部和北部湖区、贡湖北部沿岸区、东太湖东部等湖区先后实施了生态疏浚,工程量累计达3 910 万 m³^[17]。但生态疏浚能否有效降低底泥中营养物质的含量,也需不同时期的底泥调查历史资料进行对比分析。

为进一步推进太湖水环境综合治理工作,预防蓝藻暴发造成的生态灾害,给太湖生态清淤工作提供决策参考,本文结合太湖流域管理局2018年组织开展的太湖污染底泥勘察项目调查结果,主要对太湖底泥中的有机质、氮磷等营养物质的含量及其平面和垂向分布特征进行分析,并与太湖流域管理局2003年组织开展的底泥调查结果进行对比,研究太湖底泥营养物质污染特征的变化,为下一步实施太湖生态清淤提供依据。

1 材料与方法

1.1 采样点布设

本次调查采样点根据2003年太湖底泥调查得到的污染底泥分布情况分重点区域和一般区域布设,共在全太湖布设316个采样点。重点区域布设在底泥污染较严重的梅梁湖、竺山湖、西北沿岸区、西南沿岸区、东太湖和贡湖,按照2 km×2 km正方形网格布设取样点,主要入湖河道河口在沿水流方向向湖区1 km处布设采样点,沿岸区一般沿距岸线50 m、1.5 km布设采样线,在采样线上间隔1.5 km布设采样点。一般区域布设在湖心区、胥湖、箭湖和漫山湖,按照5 km×5 km正方形网格布设采样点。

1.2 底泥采样与分析方法

调查取样和化验时间为2018年10—12月。底泥采样分层进行,重点区域采集0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~50 cm、50~100 cm的泥样,一般区域采集0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm的泥样。将采集的不同深度底泥进行实验室化验分析,

测定总氮(凯氏定氮法)、总磷(等离子体发射光谱法)和有机质(重铬酸钾氧化-还原容量法)含量。

本文主要研究太湖底泥营养物质的平面和垂向分布特征,并结合2003年太湖底泥调查结果对营养物质变化情况进行历史数据对比分析。平面分布特征分析表层底泥有机质、总氮、总磷各湖区的分布情况,垂向分布特征分析有机质、总氮和总磷垂向分布变化情况,历史数据对比分析2003年和2018年两次调查中表层底泥营养物质的均值前后变化情况。

2 结果与分析

2.1 平面分布特征

2018年太湖表层底泥(0~10 cm)调查结果(表1)显示,全湖有机质质量分数范围在0.36%~7.06%之间,均值为1.62%。全湖有机质质量分数均值可以分为3个区间,1.0%~1.5%的湖区为西南沿岸区和湖心区,1.5%~2.0%的湖区为梅梁湖、西北沿岸区、贡湖、胥湖和箭湖,大于2.0%的湖区为竺山湖、东太湖和漫山湖。有机质质量分数最小值0.36%出现在胥湖,最大值7.06%出现在东太湖,极值相差较大。研究表明,造成表层底泥有机质含量差异的原因与各湖区环境有关。东太湖作为太湖主要的围网养殖区域,养殖生物的排泄物和残余饲料含有丰富的有机物及其他营养物质;东太湖水生植物茂盛,每年近百万吨的生物量腐烂在底泥中形成有机质及其他营养物质。黎丽雯等^[18]的研究表明有机质的分布与人为污染正相关,竺山湖作为太湖主要的来水湖区,生活废水和工业废水通过太湖漕运河、殷村港、雅浦港和沙塘港进入竺山湖,外源污染的不断输入导致营养物质含量较高。漫山湖、箭湖周边区域水草生长旺盛,水生植物死亡沉积使得该区域总氮和有机质含量较高。

全湖总氮质量比范围在346.0~4 730.0 mg/kg

表1 不同湖区表层底泥营养物质含量

Table 1 Nutrient contents in surface sediment of different lake bays

湖 区	有机质质量分数/%			总氮质量比/(mg·kg ⁻¹)			总磷质量比/(mg·kg ⁻¹)		
	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值
梅梁湖	3.22	0.96	1.81	2 450.0	733.0	1 386.0	1 200.0	486.0	653.0
竺山湖	2.98	1.41	2.32	2 280.0	1 200.0	1 784.0	2 124.0	842.0	1 519.0
西北沿岸区	1.93	0.73	1.50	1 560.0	595.0	1 136.0	903.0	397.0	673.0
西南沿岸区	2.37	0.50	1.25	1 890.0	346.0	860.0	979.0	433.0	620.0
东太湖	7.06	1.05	2.69	4 730.0	774.0	1 747.0	840.0	427.0	563.0
贡 湖	2.31	0.61	1.58	1 770.0	622.0	1 273.0	1 187.0	453.0	712.0
湖心区	2.33	0.51	1.37	1 560.0	484.0	1 014.4	1 990.0	317.0	625.8
胥 湖	4.95	0.36	1.56	1 980.0	442.0	1 071.0	647.0	417.0	491.0
箭 湖	3.93	0.91	1.99	1 650.0	774.0	1 267.0	531.0	437.0	477.7
漫山湖	3.09	0.97	2.01	1 940.0	788.0	1 342.0	842.0	481.0	606.0
全 湖	7.06	0.36	1.62	4 730.0	346.0	1 169.7	2 124.0	317.0	674.8

之间,均值为 1 169.7 mg/kg。全湖总氮质量比均值可分为 3 个区间,小于 1 000 mg/kg 的湖区为西南沿岸区,1 000 ~ 1 500 mg/kg 的湖区为梅梁湖、西北沿岸区、贡湖、湖心区、胥湖、箭湖和漫山湖,大于 1 500 mg/kg 的湖区为竺山湖和东太湖。总氮含量高低的原因与有机质相似。

全湖总磷质量比范围在 317.0 ~ 2 124.0 mg/kg 之间,均值为 674.8 mg/kg。全湖总磷质量比均值可分为 3 个区间,小于 500 mg/kg 的湖区为胥湖和箭湖,500 ~ 800 mg/kg 的湖区为梅梁湖、西北沿岸区、西南沿岸区、东太湖、贡湖、湖心区和漫山湖,大于 800 mg/kg 的湖区为竺山湖。竺山湖高含量总磷与生活 and 工业废水的输入有关,加之竺山水流不畅,污染物易于累积。

2.2 垂向分布特征

图 1 为太湖重点区域 0 ~ 100 cm 和一般区域 0 ~ 30 cm 深度内营养物质垂向变化情况。可以看出,重点区域有机质和总氮含量一般随深度增加呈现“S”形变化,有机质和总氮高含量主要集中在 0 ~ 30 cm 深度区间内。一般区域有机质和总氮含量在 0 ~ 30 cm 深度区间内变化趋势相似,在此深度区间内整体差异不大。太湖底泥多年研究结果表明,近百年来太湖现代沉积物的沉积速率在 0.6 ~

3.6 mm/a,均值约为 2.1 mm/a,因此 30 cm 以下的沉积物受近代人类活动影响已经非常微弱。本次调查中营养物质的分布基本符合此规律,在 0 ~ 30 cm 深度内受人类活动的影响营养物质含量较高。外源污染的输入,湖体内大量繁殖的水生动植物在底泥中聚集沉降,并且有机碎屑的沉降速率高于分解速率,导致沉积物中有机质和总氮在浅层底泥中负荷量增加^[19]。

由图 1(c)(f)可以看出,除竺山湖外,总磷含量在重点区域和一般区域垂直变化整体差异较小,竺山湖在 0 ~ 30 cm 深度内总磷含量明显高于其他湖区,在 30 ~ 100 cm 深度内含量与其他区域差异较小。王华等^[20]的研究结果表明,入湖总磷污染负荷量大导致太湖总磷含量居高不下。本次调查发现竺山湖主要入湖河口太滬运河、殷村港、雅浦港和沙塘港的入湖区域底泥总磷含量较高,分析认为竺山湖主要入湖河道水质较差,外源污染的进入加之竺山水流不畅,污染物易于在竺山湖沉积,造成竺山湖总磷在 0 ~ 30 cm 深度的底泥中不断蓄积。另一方面,风浪对底泥的扰动促进底泥再悬浮,造成底泥内源磷释放。此外,藻类的堆积、沉积作用增加了底泥中磷的负荷量,进一步导致了底泥中磷含量的升高^[19]。

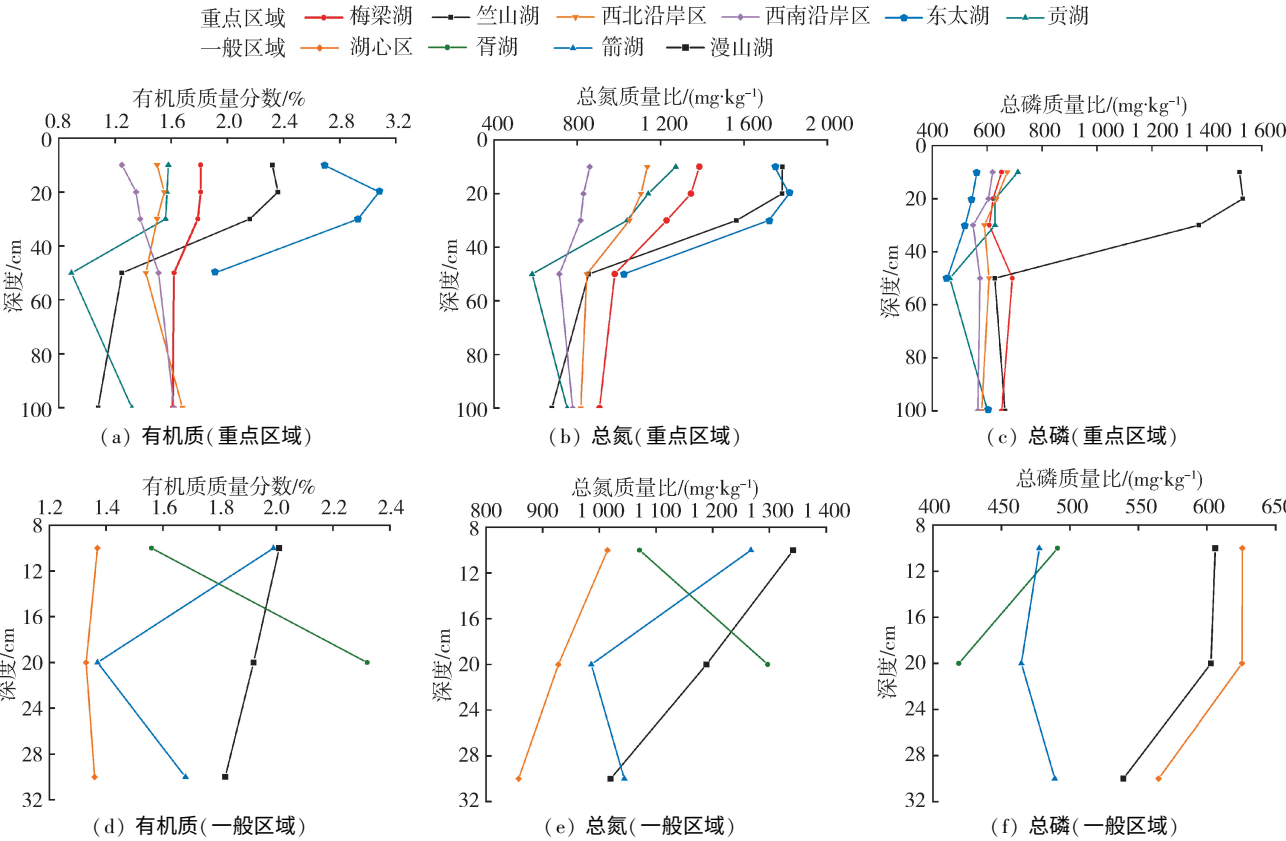


图 1 太湖底泥主要营养物质垂向变化

Fig. 1 Vertical variation of main nutrients in sediment of Taihu Lake

2.3 历史数据对比

2018 年与 2003 年表层底泥营养物质数据对比结果(表 2)显示,2018 年全湖表层底泥有机质含量略有降低,竺山湖、西北沿岸区、西南沿岸区、湖心区、胥湖和箭湖呈升高趋势,梅梁湖、东太湖、贡湖和漫山湖呈降低趋势。2018 年全湖表层底泥总氮含量略有升高,竺山湖、西北沿岸区、西南沿岸区、东太湖、湖心区、胥湖、箭湖和漫山湖呈升高趋势,梅梁湖和贡湖呈降低趋势。2018 年全湖表层底泥总磷含量呈升高趋势,竺山湖、西北沿岸区、西南沿岸区、东太湖、湖心区、胥湖、箭湖和漫山湖呈升高趋势,梅梁湖和贡湖呈降低趋势。

表 2 太湖表层底泥 2003 年与 2018 年营养物质含量对比
Table 2 Nutrient content in surface sediment of Taihu Lake in 2003 and 2018

湖 区	有机质质量 分数/%		总氮质量比/ (mg · kg ⁻¹)		总磷质量比/ (mg · kg ⁻¹)	
	2018 年 均值	2003 年 均值	2018 年 均值	2003 年 均值	2018 年 均值	2003 年 均值
梅梁湖	1.81	2.47	1386.0	1616.5	653.0	983.0
竺山湖	2.32	1.68	1784.0	990.2	1519.0	917.3
西北沿岸区	1.50	1.25	1136.0	936.0	673.0	481.3
西南沿岸区	1.25	1.04	860.0	663.6	620.0	471.8
东太湖	2.69	2.87	1747.0	1615.6	563.0	438.0
贡 湖	1.58	2.64	1273.0	1384.6	712.0	849.5
湖心区	1.37	1.08	1014.4	760.0	625.8	450.6
胥 湖	1.56	1.34	1071.0	700.1	491.0	393.9
箭 湖	1.99	0.97	1267.0	527.1	477.7	422.9
漫山湖	2.01	2.06	1342.0	1122.0	606.0	440.0
全 湖	1.62	1.87	1169.7	1167.6	674.8	598.1

营养物质在竺山湖、西北沿岸区、西南沿岸区、湖心区、胥湖和箭湖的升高趋势与外源污染和藻类的大量堆积有关。太湖浮游植物监测数据显示,2003 年调查期间太湖浮游植物堆积数量总体约为 100 万个/L,而 2018 年约为 9000 万个/L,大量的水生植物堆积、死亡沉积到底泥中对太湖水体和底泥中营养物质产生了巨大的影响。此外,生活污水和工业废水通过太湖西部的入湖河口将污染物排入到湖体中,外源污染不断堆积导致表层底泥营养物质含量呈升高趋势。

梅梁湖和贡湖营养物质有明显的降低趋势主要与太湖的水系变化和必要的生态清淤工程有关。梁溪河和武进港在 2003 年调查期间是梅梁湖的主要入湖河口,在 2018 年调查期间,原本通过武进港进入梅梁湖的生活污水和工业废水改为通过雅浦河和百渎港进入到竺山湖中;贡湖的望虞河由于引江济太工程变为出入湖河口,长江水进入太湖使得水流停留时间缩短,水流条件发生变化,太湖湖流及藻类分布发生根本性变化。在此基础上,太湖自 2008 年

起实施的生态清淤工程使得梅梁湖和贡湖表层底泥营养物质含量有降低趋势。

外源污染及水生植物的大量繁殖可能导致底泥营养物质含量升高。在外源污染控制好,生态清淤工程有利于降低湖区内营养物质的含量。建议有关部门下一步控制好外源污染,治理蓝藻等水生植物,可继续开展太湖底泥污染严重的主要湖区生态清淤工作,清淤的重点湖区是梅梁湖、竺山湖、西北沿岸区、东太湖、贡湖等,生态疏浚主要对象为表层底泥。

3 结 论

- a. 全太湖底泥营养物质含量最高的湖区是竺山湖和东太湖,其次是梅梁湖、贡湖、漫山湖等湖区,其他湖区营养物质含量相对较低。
- b. 就全湖区平均值而言,太湖底泥中营养物质的分布总体上为上层高、下层低,高含量营养物质主要分布在 0 ~ 30 cm 深度内。
- c. 外源污染和水生植物的大量繁殖可能导致营养物质含量升高,而当控制好外源污染后,生态清淤可减少表层底泥的营养物质含量。

参考文献:

[1] 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 Yuanrong, ZHANG Runyu, WU Fengchang. Geochemical characteristics and influence to overlying water of nitrogen in the sediments from Dianchi Lake[J]. China Environmental Science, 2011, 31(6): 978-983. (in Chinese))

[2] 张坤,李彬,王道增. 动态水流条件下河流底泥污染物(COD_{Cr})释放研究[J]. 环境科学学报,2010,30(5): 985-989. (ZHANG Kun, LI Bin, WANG Daozeng. Contaminant(COD_{Cr}) release from river bottom sediments under flow conditions[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010,30(5):985-989. (in Chinese))

[3] 宋宪强,雷恒毅,余光伟,等. 重污染感潮河道底泥重金属污染评价及释放规律研究[J]. 环境科学学报,2008,28(11):2258-2268. (SONG Xianqiang, LEI Hengyi, YU Guangwei,et al. Evaluation of heavy metal pollution and release from sediment in a heavily polluted tidal river[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2008,28(11):2258-2268. (in Chinese))

[4] 方红卫,李晓翠,黄磊,等. 受污染底泥陶粒化回填技术及其底泥修复效果[J]. 水资源保护,2019,35(3):1-6. (FANG Hongwei, LI Xiaocui, HUANG Lei, et al. Ceramization of contaminated sediment backfill technology and its effects of sediment remediation [J]. Water

- Resources Protection, 2019, 35(3):1-6. (in Chinese))
- [5] 毛新伟,徐枫,徐彬,等.太湖水质及富营养化变化趋势分析[J].水资源保护,2009,25(1):48-51. (MAO Xinwei, XU Feng, XU Bin, et al. Changes of water quality and eutrophication in Taihu Lake [J]. Water Resources Protection, 2009, 25(1):48-51. (in Chinese))
- [6] 谢艾玲,徐枫,向龙,等.环太湖主要入湖河流污染负荷量对太湖水质的影响及趋势分析[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(5):391-397. (XIE Ailing, XU Feng, XIANG Long, et al. Trend analysis for pollutant load of major rivers around Taihu Lake and its impact on water quality in Taihu Lake [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(5):391-397. (in Chinese))
- [7] 韩伟明.底泥释磷及其对杭州西湖富营养化的影响[J].湖泊科学,1993(1):71-77. (HAN Weiming. Phosphorus release from the sediments of West Lake in Hangzhou and its effects on lake eutrophication [J]. Journal of Lake Sciences, 1993(1):71-77. (in Chinese))
- [8] 高俊峰.太湖蓝藻水华生态灾害评价[M].北京:科学出版社,2014:3-4.
- [9] 金相灿,姜霞,徐玉慧,等.太湖东北部沉积物可溶性氮、磷的季节性变化[J].中国环境科学,2006,26(4):409-413. (JIN Xiangcan, JIANG Xia, XU Yuxia, et al. Seasonal variation of dissolved nitrogen and phosphorus in sediments in northeast part of Lake Taihu [J]. China Environmental Science, 2006, 26(4):409-413. (in Chinese))
- [10] 赵兴青,杨柳燕,于振洋,等.太湖沉积物理化性质及营养盐的时空变化[J].湖泊科学,2007,19(6):698-704. (ZHAO Xingqing, YANG Liuyan, YU Zhenyang, et al. Temporal and spatial distribution of physicochemical characteristics and nutrients in sediments of Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2007, 19(6):698-704. (in Chinese))
- [11] 雷泽湘,徐德兰,谢贻发,等.太湖水生植物氮磷与湖水和沉积物氮磷含量的关系[J].植物生态学报,2008,32(2):402-407. (LEI Zexiang, XU Delan, XIE Yifa, et al. Relationship between N and P contents in aquatic macrophyte, water and sediment in Taihu Lake, China [J]. Journal of Plant Ecology (Chinese Version), 2008, 32(2):402-407. (in Chinese))
- [12] 王佩,卢少勇,王殿武,等.太湖湖滨带底泥氮、磷、有机质分布与污染评价[J].中国环境科学,2012,32(4):703-709. (WANG Pei, LU Shaoyong, WANG Dianwu, et al. Nitrogen, phosphorous and organic matter spatial distribution characteristics and their pollution status evaluation of sediments nutrients in lakeside zones of Taihu Lake [J]. China Environmental Science, 2012, 32(4):703-709. (in Chinese))
- [13] 杨威武.基于生态理念的太湖底泥疏浚思路探讨[J].科技创新导报,2010(13):151-152. (YANG Weiwu. Discussion on ecological sediment dredging of Lake Taihu [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2010(13):151-152. (in Chinese))
- [14] 柳惠青.湖泊污染内源治理中的环保疏浚[J].水运工程,2000(11):21-27. (LIU Huiqing. Environmental protection dredging in treatment of lake pollution internal cause [J]. Port & Water Engineering, 2000(11):21-27. (in Chinese))
- [15] 陈荷生,房玲娣,张永健,等.太湖底泥生态疏浚研究与探讨[C]//中国水利学会太湖高级论坛交流文集.北京:中国水利学会,2014:59-57.
- [16] 余义瑞,杨白露,董苗苗,等.基于不同疏浚绞刀结构的底泥污染物释放情况分析[J].水资源保护,2017,33(2):74-78. (YU Yirui, YANG Bailu, DONG Miaomiao, et al. Study of sediment contaminants release based on different dredging cutter structures [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2):74-78. (in Chinese))
- [17] 单玉书,沈爱春,刘畅.太湖底泥清淤疏浚问题探讨[J].中国水利,2018(23):11-13. (SHAN Yushu, SHEN Aichun, LIU Chang. Discussions on bottom mud dredging of the Taihu Lake [J]. China Water Resources, 2018(23):11-13. (in Chinese))
- [18] 黎丽雯,潘纲,李梁,等.蓝藻对太湖底泥反硝化过程的影响和机理分析[J].湖泊科学,2013,25(5):628-634. (LI Liwen, PAN Gang, LI Liang, et al. Effect and mechanism of algae bloom on the denitrification processes in the sediments of Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(5):628-634. (in Chinese))
- [19] 方家琪,祁闯,张新厚,等.太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价[J].环境科学,2019,40(12):5367-5374. (FANG Jiaqi, QI Chuang, ZHANG Xinhou, et al. Spatial distribution and pollution evaluation of carbon, nitrogen, and phosphorous in the sediment from Zhushan Bay of Lake Taihu [J]. Environmental Science, 2019, 40(12):5367-5374. (in Chinese))
- [20] 王华,陈华鑫,徐兆安,等.2010—2017年太湖总磷浓度变化趋势分析及成因探讨[J].湖泊科学,2019,31(4):919-929. (WANG Hua, CHEN Huaxin, XU Zhaoan, et al. Variation trend of total phosphours and controlling factors in Lake Taihu, 2010—2017 [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(4):919-929. (in Chinese))

(收稿日期:2019-09-09 编辑:熊水斌)

