

千岛湖沉积物中碳、氮、磷的分布特征及污染评价

张明¹, 唐访良¹, 程新良², 徐建芬¹, 郑文婷¹, 许燕冰¹

(1. 浙江省杭州生态环境监测中心, 浙江 杭州 310007;

2. 杭州市淳安生态环境监测站, 浙江 杭州 311700)

摘要:通过测定千岛湖柱状沉积物中有机质(OM)、总氮(TN)和总磷(TP)含量,分析其污染分布特征,并评价污染水平。结果表明,千岛湖沉积物中OM、TN、TP平均值分别为1.44%、1.86 mg/g、0.89 mg/g。空间分布差异明显,城区库湾、新安江干流沿线污染相对较重;垂直分布,OM、TN、TP整体上均从湖底由下而上呈逐步上升变化过程。相关性分析表明,该湖沉积物中OM、TN、TP具有较高的同源性,氮、磷多以有机形式存在。C/N值表明,该湖沉积物中有机质主要来自内源的水生生物分解。评价结果显示,综合污染指数范围为1.1~4.2,该湖整体上处于重度污染水平,TP污染重于TN;有机指数范围为0.04~0.52,整体上属于轻度污染水平。

关键词:有机质;总氮;总磷;沉积物;分布特征;污染评价;千岛湖

中图分类号:X524;X825 文献标志码:B 文章编号:1006-2009(2024)02-0038-06

Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Sediments of Qiandao Lake

ZHANG Ming¹, TANG Fangliang¹, CHENG Xinliang², XU Jianfen¹, ZHENG Wenting¹, XU Yanbing¹

(1. Zhejiang Hangzhou Ecological and Environmental Monitoring Center, Hangzhou, Zhejiang 310007, China;

2. Hangzhou Chun'an Ecological and Environmental Monitoring Station, Hangzhou, Zhejiang 311700, China)

Abstract: In this paper, the contents of organic matter (OM), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in core sediments of Qiandao Lake were determined, the distribution characteristics were analyzed and the pollution status was evaluated. The results showed that the average contents of OM, TN and TP in sediments were 1.44%, 1.86 mg/g and 0.89 mg/g, respectively. The spatial distribution differences were obvious. The pollution in urban bay area and along the main stream of Xin'an River was relatively severe. In terms of vertical distribution, the contents of OM, TN and TP gradually increased from the bottom to the top of the lake. Correlation analysis showed that OM, TN and TP in sediments had high homology. Nitrogen and phosphorus mostly existed in organic form. The ratio of C/N indicated that organic matter in sediments mainly derived from endogenous decomposition of aquatic organisms. The evaluation results showed that the comprehensive pollution index ranged from 1.1 to 4.2, indicating that the lake was heavily polluted on the whole. TP pollution was heavier than TN. The organic index ranged from 0.04 to 0.52, indicating a light pollution level on the whole.

Key words: Organic matter; Total nitrogen; Total phosphorus; Sediments; Distribution characteristic; Pollution assessment; Qiandao Lake

近年来,随着经济社会的高速发展,生活污水和工业废水的排放量不断增加,当城市污染负荷远远超出当地水环境承载力时,各类水危机和水问题接踵而来,包括日益严峻的湖库水体富营养化问题^[1-3]。湖库沉积物既是所在水体氮、磷等营养盐

及有机质重要的汇,可通过大量接纳污染物的方式

收稿日期:2023-03-08;修订日期:2024-01-24

基金项目:杭州市社会发展科研攻关基金资助项目(20150533B08)

作者简介:张明(1981—),男,浙江三门人,正高级工程师,硕士,主要从事环境监测及相关科研工作。

缓解水体富营养化进程,同时又是重要的源,沉积物中的营养盐可通过地球化学循环再次返回水中,对水体造成二次污染^[4-7]。沉积物中各种营养元素的分布特征一定程度上反映了湖库水体污染程度及其地球化学信息。

千岛湖原名新安江水库,是我国最大的人工湖泊之一,目前相关学者对千岛湖水生态环境质量开展了广泛研究,包括水质营养盐负荷等常规指标^[8-10]、有机污染物指标^[11-12],以及生物指标^[13-14],对于整个湖体沉积物污染情况也开展了部分研究^[15-16],可针对全湖沉积物营养负荷污染特征及评价相关研究较少。今主要分析千岛湖沉积物中碳、氮、磷的含量,研究其分布特征并评价污染水平,从而全面了解营养盐负荷情况,为千岛湖及类似湖库水环境保护提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

千岛湖处于 E118°34' ~ E119°15', N29°23' ~ N29°44' 之间,主体部分位于浙江省杭州市淳安县内,属亚热带季风气候,年均气温约为 17℃。在正常水位时千岛湖水面面积约为 580 km²,上游的新安江是主要入湖河流,来水约占总径流量的 60%。千岛湖蓄水量可达 178 亿 m³,是淳安县、建德市、桐庐县和杭州市主城区的主要饮用水源。

1.2 样品采集和分析

参照《水质采样技术指导》(HJ 494—2009)和《海洋监测规范 第 3 部分:样品采集、贮存和运输》(GB 17378.3—2007)相关要求,结合千岛湖地理形态、位置特点,以及水系和生境分布特征,分别在西北湖区布设街口(S1)、威坪(S2),中心湖区布设排岭(S3)、三潭岛(S4)、西园库湾(S5),东南湖区布设密山(S6)、富文库湾(S7)、大坝前(S8),西南湖区布设茅头尖(S9),东北湖区布设航头岛(S10)等 10 个有代表性的沉积物采样点,点位分布见图 1。其中,S1 为新安江干流(千岛湖最大入湖河流)安徽来水入境点位,S2 考察沿岸威坪镇人类活动的影响,S3 区域旅游活动较频繁,S4 为中心湖区国控断面,S5 为淳安县城库湾,S6 位于杭州市第二水源千岛湖配水工程取水口附近,S7 为沿岸库湾,S8 为千岛湖出境点位,S9 和 S10 是千岛湖淳安县内主要入湖口。

2016 年 12 月使用奥地利生产的 Corer 60 型

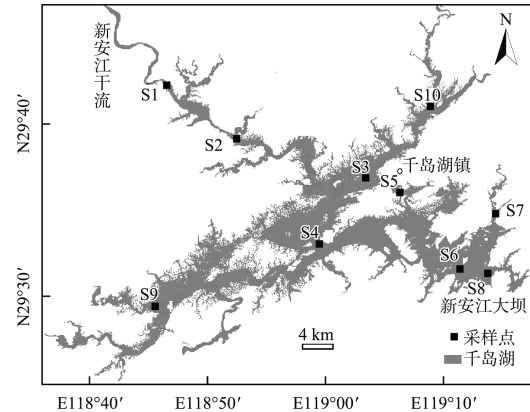


图 1 千岛湖沉积物采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in sediments of Qiandao Lake

UWITEC 柱状采泥器,在每个采样点采集 3 个柱状沉积物样品,迅速运回实验室后,以 10 cm 的间隔分样,根据采集的沉积物柱状样的长度分别切割成 3 ~ 5 层,其中第 1 层(0 cm ~ 10 cm)、第 2 层(10 cm ~ 20 cm)、第 3 层(20 cm ~ 30 cm)、第 4 层(30 cm ~ 40 cm)、第 5 层(40 cm ~ 50 cm)。将采集于同一采样点的同深度的 3 个沉积物样品混匀后,平铺在干净的搪瓷盘上自然风干,去除枝叶及石子等杂物,充分研磨后过 100 目筛,筛分后将样品密封装入特制牛皮纸袋,于 -20℃ 下冷冻保存备用。分别采用《土壤检测 第 6 部分:土壤有机质的测定》(NY/T 1121.6—2006)《土壤质量 全氮的测定 凯氏法》(HJ 717—2014)和《土壤 总磷的测定 碱熔-钼锑抗分光光度法》(HJ 632—2011)测定沉积物有机质(OM)、全氮(TN)和总磷(TP)指标。采用 Excel 2013 软件进行数据统计和分布图绘制,使用 SPSS 24 软件计算沉积物 OM、TN 和 TP 之间的 Pearson 相关系数。

1.3 污染评价方法

目前评价湖库沉积物污染状况比较常用的方法有综合污染指数法和有机指数法^[17]。综合污染指数法选取 TN、TP 作为评价参数,并将两项指标的评价结果综合成一个概括的指数值,用于表征沉积物污染程度,可该方法忽略了有机碳(OC)和有机氮(ON)的复合影响;而有机指数法仅考虑了 OM 和 TN,忽略了 TP 的影响。今将上述两种方法相结合来评价千岛湖柱状沉积物的污染情况。

1.3.1 综合污染指数法

综合污染指数法计算公式如下:

$$S_i = C_i / C_s \quad (1)$$

$$F_z = \sqrt{\frac{F^2 + F_{\max}^2}{2}} \quad (2)$$

式中: i 为评价因子; S_i 为各单项的评价指数; C_i 为评价因子 i 的实测值; C_s 为评价因子 i 的评价标准

值; F 为 n 项污染指数的平均值; F_{\max} 为最大单项污染指数; F_z 为综合污染指数。TN 的 C_s 取值 1.0 mg/g , TP 的 C_s 取值 0.42 mg/g ^[1], 根据公式 (1)(2) 计算得到 F_z , 按照相应标准及分级 (见表 1) 对研究区域沉积物综合污染程度进行评价^[2]。

表 1 沉积物综合污染程度分级
Table 1 Classification of sediment comprehensive pollution degree

等级	S_{TN}	S_{TP}	F_z	类型
1	$S_{\text{TN}} < 1.0$	$S_{\text{TP}} < 0.5$	$F_z < 1.0$	清洁(无影响)
2	$1.0 \leq S_{\text{TN}} \leq 1.5$	$0.5 \leq S_{\text{TP}} \leq 1.0$	$1.0 \leq F_z \leq 1.5$	轻度污染
3	$1.5 < S_{\text{TN}} \leq 2.0$	$1.0 < S_{\text{TP}} \leq 1.5$	$1.5 < F_z \leq 2.0$	中度污染
4	$S_{\text{TN}} > 2.0$	$S_{\text{TP}} > 1.5$	$F_z > 2.0$	重度污染

1.3.2 有机指数评价法

有机指数评价法计算公式如下:

$$\text{OI} = \text{OC} \times \text{ON} \quad (3)$$

$$\text{ON} = \text{TN} \times 0.95 \quad (4)$$

$$\text{OC} = \text{OM} / 1.724 \quad (5)$$

式中: OI 为有机指数, %; OC 为有机碳, %; ON 为有机氮, %; TN 为全氮, %; OM 为有机质, %。

根据 OI 值评价 OC 和 ON 对千岛湖沉积物的复合影响程度: 当 $\text{OI} < 0.05$ 时为 I 级, OC 和 ON 对沉积物基本无影响; 当 $0.05 \leq \text{OI} < 0.2$ 时为 II 级, OC 和 ON 对沉积物有轻度影响; 当 $0.2 \leq \text{OI} < 0.5$ 时为 III 级, OC 和 ON 对沉积物有中度影响; 当 $\text{OI} \geq 0.5$ 时为 IV 级, OC 和 ON 对沉积物有重度影响。

2 结果与讨论

2.1 千岛湖沉积物中碳氮磷分布特征

千岛湖各层沉积物中 OM、TN、TP 分布情况分别见图 2(a)(b)(c)。在千岛湖采集了 10 个沉积柱, 共 41 个分层样品, 检测结果显示, 沉积物样品中 OM 质量分数范围为 $0.84\% \sim 2.72\%$, 平均值为 1.44% 。由图 2(a) 可见, 总体上 S1 和 S8 点位的 OM 值最高, 两个点位沉积柱中 OM 均值均为 1.69% , 除了第 1 层 S8 点位的 OM 值为全湖同层最高外, 其余 4 层均是 S1 点位的 OM 值为全湖同层最高; 其次是 S4 点位, 沉积柱 OM 均值为 1.65% ; S3、S6 和 S7 等 3 个点位沉积柱 OM 均值分别为 1.44% 、 1.44% 和 1.38% , 与全湖平均值接近; 而 S2、S9 和 S10 点位沉积柱 OM 均值分别为

1.14% 、 1.25% 和 1.16% , 明显低于全湖平均水平。千岛湖各点位沉积物中 OM 值垂直变化特征各异, 全湖 OM 平均值从湖底由下而上呈逐步上升的变化过程; 分点位来看, S3、S5、S6、S10 点位 OM 值垂直变化趋势与均值基本一致, S1、S2、S9 点位呈现先升后降的趋势, 而 S4、S7、S8 点位则呈现先降后升的变化过程。

千岛湖沉积物样品中 TN 质量比范围为 $0.92 \text{ mg/g} \sim 3.49 \text{ mg/g}$, 平均值为 1.86 mg/g 。由图 2(b) 可见, 总体上 S4 点位最高, 沉积柱 TN 均值为 2.28 mg/g ; 其次是 S1 和 S8, 沉积柱 TN 均值分别为 2.04 mg/g 和 2.03 mg/g , 除了第 1 层 S8 点位的 TN 值为全湖同层最高外, 其余 4 层均是 S1 点位的 TN 值为全湖同层最高; 还有 S3 和 S5 点位沉积柱 TN 均值分别为 1.98 mg/g 和 1.94 mg/g , 高于全湖 TN 平均值; 其余点位沉积柱 TN 均值均低于全湖 TN 平均值, 其中 S2 点位 TN 均值最低, 为 1.53 mg/g 。各点位沉积物 TN 值垂直变化特征与 OM 基本一致, 全湖 TN 平均值从湖底由下而上呈先升后降再上升的变化过程; 分点位来看, S2 点位 TN 值垂直变化趋势与全湖平均值基本一致, S3、S4、S5、S6、S10 均呈逐层上升趋势, S1、S9 点位均呈先升后降的相似趋势, 而 S7、S8 点位则均呈现先降后升的变化过程。

千岛湖沉积物样品中 TP 质量比范围为 $0.49 \text{ mg/g} \sim 1.97 \text{ mg/g}$, 平均值为 0.89 mg/g 。由图 2(c) 可见, 总体上 S5 点位最高, 沉积柱 TP 均值为 1.13 mg/g , 其中第 1 层、第 2 层、第 3 层的 TP 值均为全湖同层最高; 其次是 S4 点位, 沉积柱 TP 均

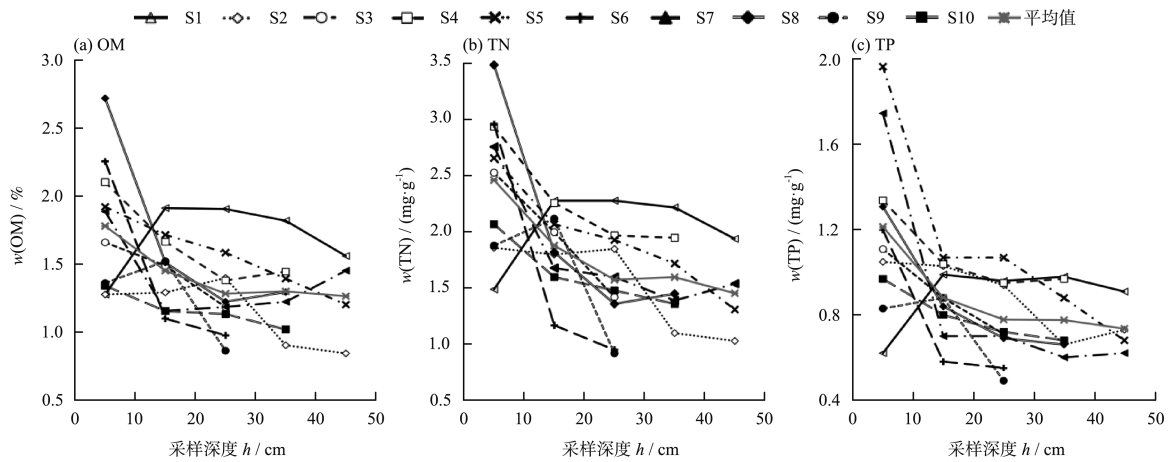


图 2 千岛湖沉积物中 OM、TN、TP 分布情况

Fig. 2 Distribution of OM, TN and TP in sediments of Qiandao Lake

值为 1.08 mg/g; S3 和 S1 点位沉积柱 TP 均值分别为 0.90 mg/g 和 0.89 mg/g, 略高或等于全湖平均值, 其中 S1 点位第 4 层、第 5 层沉积物中 TP 值为全湖同层最高; S6、S9 和 S10 点位的沉积柱 TP 均值分别为 0.78 mg/g、0.73 mg/g 和 0.79 mg/g, 明显低于全湖平均水平。千岛湖沉积物中 TP 全湖平均值垂直变化特征与 OM、TN 相似, 自湖底由下而上呈逐渐上升趋势, 可各点位变化特征差异较大。分点位来看, S3、S5、S6、S8、S10 点位 TP 值自湖底由下而上呈逐步上升变化过程; S2、S4、S7 点位均呈先降后升的相似趋势; 而 S9 点位则呈先升后降的变化过程; S1 点位除了第 1 层 TP 值明显较低外, 其余各层 TP 值均较接近, 呈锯齿形变化过程。

2.2 OM、TN 和 TP 相关性分析

沉积物中 OM、TN、TP 之间的相关性可被用来判断这些指标是否具有相同来源, 通常相关系数越高, 说明来源越相似。千岛湖沉积物中 OM 与 TN 呈极显著高度正相关 ($r=0.950, P<0.01$), 说明沉积物中 OM 和 TN 具有很高的同源性, TN 多以有机态形式存在, 这是由于碳、氮在生物体内含量比较恒定, 主要来源于内源的生物体分解。有研究认为, 水体沉积物总氮中 70%~90% 以有机氮的形式存在^[18]。千岛湖沉积物中 OM 与 TN 的相关关系从侧面验证了该研究结果。TN 与 TP 之间呈极显著高度正相关 ($r=0.831, P<0.01$), 表明表层沉积物中的氮、磷来源及其在水中的迁移转化存在明显关联。OM 与 TP 之间存在极显著中等正相关 ($r=0.738, P<0.01$), 这说明千岛湖沉积物中 TP 的来源与 OM 的富集有一定同源关系, 表明有机质也是

磷的重要载体。相关研究显示^[19], 沉积物中的有机质参与了多种生物化学和地球化学作用, 且与沉积物中的磷特别是有机磷密切相关, 有机质的矿化降解过程通常伴随着剧烈的氮、磷等营养盐的释放, 可能会对水质造成严重污染^[20]。

2.3 沉积物中碳氮比

沉积物的碳氮比 (C/N) 可有效指示其有机质的主要来源^[21]。研究表明^[22]: 当 C/N 值为 14.0~23.0 时, 沉积物中富集的 OM 主要来源于高等植物的分解; 当 C/N 值为 5.0~14.0 时, 沉积物中 OM 主要来源于浮游动植物的分解; 而当 C/N 值 < 5.0 时, OM 的来源则以水生生物的分解为主。总体来说, C/N 值越大, 说明陆源输入的有机质占比越大, 反之则说明有机质更多来源于内源。以沉积物中 OM 与 TN 含量的比值来表征沉积物中的 C/N, 千岛湖柱状沉积物中 C/N 值在 0.65~1.03 之间, 平均值为 0.78, 皆远低于 5.0, 说明千岛湖沉积物中有机质的主要来源可能为水生生物的分解。

2.4 沉积物污染评价

2.4.1 综合污染指数评价

采用综合污染指数法评价千岛湖沉积物的污染程度, 结果见表 2。由表 2 可知, TN 的单项污染指数 (S_{TN}) 范围为 0.9~3.5, 平均值为 1.9, 整体上处于中度污染程度。在 41 个沉积物样品中, 有 2.4% 处于清洁状态, 31.7% 属于轻度污染, 34.2% 属于中度污染, 有 31.7% 属于重度污染。TP 的单项污染指数 (S_{TP}) 范围为 1.2~4.7, 平均值为 2.2, 整体上处于重度污染水平。在 41 个沉积物样品中, 有 14.6% 为中度污染, 85.4% 为重度污染。可见, TP 的

污染程度比 TN 严重。综合污染指数 (F_z) 范围为 1.1 ~ 4.2, 平均值为 2.1, 整体上属于重度污染水平。在 41 个沉积物样品中, 轻度污染占 22.0%, 分别为 S1 第 1 层、S2 第 4 层、S5 第 5 层、S6 第 2 层、S6 第 3 层、S7 第 4 层、S7 第 5 层、S8 第 4 层、S9 第 3 层, 其余均为中-重度污染, 其中 21 个分层样品达到重度污染, 占比 51.2%。城区库湾、新安江干流沿线(西北湖区、东南湖区)点位 F_z 值较高, 说明千岛湖营养盐输入受人类活动影响较大, 新安江干流沿线是湖水及沉积物中氮、磷的主要来源。

2.4.2 有机指数评价

千岛湖沉积物 OC 和 ON 的复合影响程度评价结果见表 2。由表 2 可知, 有机指数 (OI) 范围为 0.04 ~ 0.52, 平均值为 0.15, 整体上属于轻度影

响。在 41 个沉积物样品中, 70.8% 样品处于轻度影响水平, 24.4% 样品处于中度影响水平, 重度影响水平样品占比 2.4%, 另有 2.4% 样品处于无影响水平。第 1 层沉积物评价结果为中-重度影响的点位分别为 S3、S4、S5、S6、S7、S8, 主要位于新安江干流沿线, 其中出境点位 S8 受影响最重。沉积物的营养物质含量与水体的营养程度有一定的关联。根据中国环境监测总站发布的全国地表水水质月报^[23], 千岛湖 2016 年各月度水质营养状态指数在 22.4 ~ 35.7 范围内, 处于贫营养和中营养状态。另外, 沉积物类型及其中的无机营养盐含量水平对深水区底栖动物群落结构均有一定影响, 为更准确探明千岛湖底栖动物群落结构对沉积物特征的响应规律, 有待下一步深入研究。

表 2 千岛湖沉积物综合污染指数和有机指数评价结果

Table 2 Evaluation results of comprehensive pollution index and organic index in sediments of Qiandao Lake

点 位	层数	综合指数评价				有机指数评价				点 位	层数	综合指数评价				有机指数评价			
		S_{TN}	S_{TP}	F_z	等级	OC/ %	ON/ %	OI	等级			S_{TN}	S_{TP}	F_z	等级	OC/ %	ON/ %	OI	等级
S1	第 1 层	1.5	1.5	1.5	2	0.74	0.14	0.10	II	S6	第 5 层	1.3	1.6	1.5	2	0.70	0.12	0.08	II
	第 2 层	2.3	2.4	2.3	4	1.11	0.22	0.24	III		第 1 层	3.0	2.9	2.9	4	1.31	0.28	0.37	III
	第 3 层	2.3	2.3	2.3	4	1.10	0.22	0.24	III		第 2 层	1.2	1.4	1.3	2	0.64	0.11	0.07	II
	第 4 层	2.2	2.3	2.3	4	1.06	0.21	0.22	III		第 3 层	1.0	1.3	1.2	2	0.57	0.09	0.05	II
	第 5 层	1.9	2.2	2.1	4	0.90	0.18	0.16	II		S7	第 1 层	2.8	4.2	3.8	4	1.10	0.26	0.29
S2	第 1 层	1.9	2.5	2.4	4	0.74	0.18	0.13	II	第 2 层		1.7	1.7	1.7	3	0.67	0.16	0.11	II
	第 2 层	1.8	2.5	2.3	4	0.75	0.17	0.13	II	第 3 层		1.6	1.7	1.6	3	0.69	0.15	0.10	II
	第 3 层	1.8	2.2	2.1	4	0.81	0.18	0.15	II	第 4 层		1.4	1.4	1.4	2	0.71	0.13	0.09	II
	第 4 层	1.1	1.6	1.5	2	0.52	0.10	0.05	II	第 5 层		1.5	1.5	1.5	2	0.84	0.15	0.13	II
S3	第 1 层	2.5	2.6	2.6	4	0.96	0.24	0.23	III	S8	第 1 层	3.5	3.1	3.4	4	1.58	0.33	0.52	IV
	第 2 层	2.0	2.1	2.1	4	0.86	0.19	0.16	II		第 2 层	1.8	2.0	2.0	3	0.88	0.17	0.15	II
	第 3 层	1.4	1.7	1.6	3	0.68	0.13	0.09	II		第 3 层	1.4	1.6	1.6	3	0.71	0.13	0.09	II
S4	第 1 层	2.9	3.2	3.1	4	1.22	0.28	0.34	III		第 4 层	1.4	1.6	1.5	2	0.75	0.14	0.10	II
	第 2 层	2.3	2.5	2.4	4	0.96	0.21	0.20	III	S9	第 1 层	1.9	2.0	2.0	3	0.79	0.18	0.14	II
	第 3 层	2.0	2.3	2.2	4	0.80	0.19	0.15	II		第 2 层	2.1	2.1	2.1	4	0.88	0.20	0.18	II
	第 4 层	2.0	2.3	2.2	4	0.84	0.19	0.16	II		第 3 层	0.9	1.2	1.1	2	0.50	0.09	0.04	I
S5	第 1 层	2.7	4.7	4.2	4	1.11	0.25	0.28	III	S10	第 1 层	2.1	2.3	2.2	4	0.78	0.20	0.16	II
	第 2 层	2.1	2.5	2.4	4	0.99	0.20	0.20	III		第 2 层	1.6	1.9	1.8	3	0.67	0.15	0.10	II
	第 3 层	1.9	2.5	2.4	4	0.92	0.18	0.17	II		第 3 层	1.5	1.7	1.7	3	0.66	0.14	0.09	II
	第 4 层	1.7	2.1	2.0	3	0.81	0.16	0.13	II		第 4 层	1.4	1.6	1.6	3	0.59	0.13	0.08	II
										全湖	均值	1.9	2.2	2.1	4	0.84	0.18	0.15	II

作为重要的碳库之一, 湖泊沉积物有机碳是生态系统碳循环不可或缺的一部分, 在全球碳循环中也起着重要作用^[24]。水库可从集水区和库区内积累有机物从而实现碳埋藏, 且研究表明水库比天然湖泊埋藏碳的速率更高^[25], Mendonca 等^[25]估计, 全球范围内, 水库中有机碳的埋藏率超过水库中碳

的排放率, 即水库为碳汇。而 Keller 等^[26]研究表明, 考虑消落区面积的影响, 全球水库的气态碳排放量将大大超过有机碳埋藏。因此, 在全球碳循环过程中, 水库更倾向于碳源而非碳汇。对于千岛湖, 后续开展其消落区沉积物中有机碳含量及其变化特征的研究, 具有重要的现实意义。

3 结论

(1) 千岛湖沉积物中 OM 质量分数范围为 0.84% ~ 2.72%, 平均值为 1.44%, TN 质量比范围为 0.92 mg/g ~ 3.49 mg/g, 平均值为 1.86 mg/g, TP 质量比范围为 0.49 mg/g ~ 1.97 mg/g, 平均值为 0.89 mg/g。污染程度空间分布差异明显, 城区库湾、新安江干流沿线点位碳氮磷污染相对较重, 3 个主要入湖口以新安江干流入湖口污染程度最高; 垂直分布, OM、TN、TP 整体上均从湖底由下而上呈逐步上升变化过程。

(2) 相关性分析表明, OM 与 TN、OM 与 TP、TN 与 TP 均呈显著正相关关系, 说明千岛湖沉积物中 OM、TN、TP 具有同源性, 氮、磷多以有机形式存在。C/N 值分析结果表明, 千岛湖沉积物中的有机质主要来自内源的水生生物分解。

(3) 综合污染指数评价结果显示, F_z 值范围为 1.1 ~ 4.2, 平均值为 2.1, 表明千岛湖沉积物整体上属于重度污染水平, 其中约有 65.9% 的样品 TN 处于中-重度污染、85.4% 的样品 TP 处于重度污染, TP 的污染总体上略重于 TN。有机指数评价结果显示, OI 值范围为 0.04 ~ 0.52, 平均值为 0.15, 千岛湖沉积物整体处于轻度影响状态, 其中 70.8% 样品处于轻度影响水平, 24.4% 的样品处于中度影响水平, 重度影响和无影响水平样品各占 2.4%, 出境点位第 1 层样品受影响情况相对较重。

[参考文献]

- [1] 李芬芳, 黄代中, 莲花, 等. 洞庭湖及其入湖口表层沉积物氮、磷、有机质的分布及污染评价[J]. 生态环境学报, 2018, 27(12): 2307-2313.
- [2] 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): 129-135.
- [3] 朱梦圆, 程新良, 朱可嘉, 等. 千岛湖大气氮磷干湿沉降特征及周年入库负荷[J]. 环境科学研究, 2022, 35(4): 877-886.
- [4] 李云鹏, 李致春, 余宝宝, 等. 宿州市沱河沉积物氮磷和有机碳分布及评价[J]. 环境监测管理与技术, 2017, 29(5): 25-28.
- [5] 刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 等. 湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险[J]. 环境科学, 2022, 43(6): 3058-3065.
- [6] 马玉坤, 朱翔, 庞晴晴, 等. 基于 DGT 技术的黄河上游典型水库沉积物氮磷释放与污染源解析[J]. 环境科学, 2022, 43(5): 2527-2536.
- [7] 刘昔, 邓兆林, 张露, 等. 洪湖沉积物内源污染及其氮磷释放特征[J]. 环境科学研究, 2022, 35(1): 80-88.
- [8] 金赞芳, 岑佳蓉, 胡宇铭, 等. 千岛湖水体氮的垂向分布特征及来源解析[J]. 中国环境科学, 2019, 39(8): 3441-3449.
- [9] 韩轶才, 李恒鹏, 刘明亮, 等. 千岛湖流域主要土地利用方式氮收支平衡特征[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(5): 682-686.
- [10] 朱广伟, 程新良, 吴志旭, 等. 千岛湖水体营养盐时空变化及水环境挑战[J]. 环境科学研究, 2022, 35(4): 852-863.
- [11] 唐访良, 张明, 徐建芬, 等. 千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2014, 35(5): 1735-1741.
- [12] 张明, 唐访良, 程新良, 等. 千岛湖(新安江水库)表层水中全氟化合物的残留水平及分布特征[J]. 湖泊科学, 2020, 32(2): 337-345.
- [13] 王吉毅, 霍翟, 国超旋, 等. 千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2022, 43(7): 3575-3586.
- [14] 胡月, 胡东, 于鑫, 等. 千岛湖水源地微生物安全性评价[J]. 环境科学学报, 2021, 41(2): 634-640.
- [15] 陈峰, 唐访良, 徐建芬, 等. 千岛湖表层沉积物中有机氯农药的残留特征及生态风险评价[J]. 湖泊科学, 2014, 26(4): 593-599.
- [16] 张明, 唐访良, 吴志旭, 等. 千岛湖表层沉积物中多环芳烃污染特征及生态风险评价[J]. 中国环境科学, 2014, 34(1): 253-258.
- [17] 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.
- [18] 李辉, 潘学军, 史丽琼, 等. 湖泊内源氮磷污染分析方法及特征研究进展[J]. 环境化学, 2011, 30(1): 281-292.
- [19] RIBEIRO D C, MARTINS G, NOGUEIRA R, et al. Phosphorus fractionation in volcanic lake sediments (Azores-Portugal) [J]. Chemosphere, 2008, 70(7): 1256-1263.
- [20] ANGELER D G, SÁNCHEZ-CARRILLO S, GARCÍA G, et al. The influence of *Procambarus clarkii* (Decapoda) on water quality and sediment characteristics in a Spanish floodplain wetland [J]. Hydrobiologia, 2001, 464: 89-98.
- [21] 刘方平, 汪怀建, 苏甜, 等. 鄱阳湖平原区农村门塘形态特征及底泥营养状况分析[J]. 环境监测管理与技术, 2021, 33(6): 35-39.
- [22] 魏伟伟, 叶春, 李春华. 太湖竺山湾缓冲带内湿地表层沉积物氮、磷和有机质的分布特征及评价[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(5): 588-591.
- [23] 中国环境监测总站. 2016 年全国地表水水质月报(1月—12月) [EB/OL]. (2017-06-06) [2023-03-01]. <https://www.cnemc.cn/jcbg/qgdbsszyb/>.
- [24] 于玲红, 王铭浩, 李卫平, 等. 包头南海湖沉积物有机碳空间分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(3): 538-545.
- [25] MENDONÇA R, MÜLLER R A, CLOW D, et al. Organic carbon burial in global lakes and reservoirs [J]. Nature Communications, 2017, 8: 1694.
- [26] KELLER P S, MARCÉ R, OBRADOR B, et al. Global carbon budget of reservoirs is overturned by the quantification of draw-down areas [J]. Nature Geoscience, 2021, 14: 402-408.

本栏目编辑 谢咏梅