

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.041.

张涵丹, 党宁, 林雪锋, 等. 长潭水库水体沉积物营养盐分布特征及其污染评价[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 438-443.
ZHANG Handan, DANG Ning, LIN Xuefeng, et al. Distribution Characteristics of Nutrients and Pollution Status Evaluation of Sediments in Changtan Reservoir[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 438-443.

长潭水库水体沉积物营养盐分布特征及其污染评价

张涵丹¹, 党宁¹, 林雪锋², 邹奕巧², 吴江³, 马桂莲³, 陈光才¹

(1.中国林业科学研究院 亚热带林业研究所, 杭州 311400; 2.台州市国土空间整治与生态修复中心, 浙江 台州 318000; 3.台州市黄岩区林业技术推广总站, 浙江 台州 318020)

摘 要:探究长潭水库库区沉积物中碳(C)、氮(N)、磷(P)含量特征及其污染状况,可为区域水环境质量提升提供理论依据。研究于 2021 年 9 月在水库中心区及 8 条入库支流断面设置 28 个采样点,对表层沉积物中的总有机碳(TOC)、总氮(TN)、总磷(TP)含量进行测定,并采用单因子指数法、综合污染指数法和有机污染指数法对库区污染状况进行了评价。结果表明:库区表层沉积物中 TOC、TN 和 TP 含量分别为(13.67±3.81) g/kg, (1.46±0.37) g/kg, (0.43±0.17) g/kg;其中,以柔极溪(RJR)含量较高,其 TOC 含量显著高于库中心区与其余入库支流($p<0.05$)。表层沉积物中 C/N、C/P、N/P 比值范围分别为 7.72~15.07, 15.28~63.20, 1.66~6.26。由单因子指数法和综合污染指数法分析可知,整个库区水体沉积物 TN 污染严重,基本属于重度污染;有机氮评价结果进一步表明库区整体处于Ⅲ级污染水平(尚清洁),其中以库中心区和 RJR 污染较重,存在有机氮污染(等级为Ⅳ级)。长潭水库存在一定的内源污染,且以有机污染为主。未来应加强库区水体沉积物营养盐含量动态的监测研究。

关键词:长潭水库; 沉积物; 总有机碳; 总氮; 总磷; 化学计量特征; 污染评价

中图分类号:X524 文献标识码:A 文章编号:1005-3409(2023)02-0438-06

Distribution Characteristics of Nutrients and Pollution Status Evaluation of Sediments in Changtan Reservoir

ZHANG Handan¹, DANG Ning¹, LIN Xuefeng², ZOU Yiqiao²,
WU Jiang³, MA Guilian³, CHEN Guangcai¹

(1.Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China;
2.Taizhou National Land Space Improvement and Ecological Restoration Center, Taizhou, Zhejiang 318000, China;
3.Forestry Technology Promotion Station of Huangyan District, Taizhou, Zhejiang 318020, China)

Abstract: The aim of this study is to investigate the characteristics of the contents of carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) in the sediments of Changtan Reservoir and the pollution status, thus to provide theoretical basis for the improvement of regional water environment quality. This study set up 28 sampling points within the reservoir in September 2021, which included 8 inlet tributary sections and the central area of the reservoir. The surface sediments were selected to measure the contents of total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP). Meanwhile, the pollution status of the reservoir was evaluated by single factor index method, integrated pollution index method, and organic pollution index method. Results showed that the contents of TOC, TN and TP in the surface sediments of the reservoir area were (13.67±3.81) g/kg, (1.46±0.37) g/kg, and (0.43±0.17) g/kg, respectively; specifically, the TOC content in RJR was significantly higher than that in other sampling sites ($p<0.05$); the C/N, C/P and N/P ratios in the surface sediments ranged from 7.72 to 15.07, 15.28 to 63.20, and 1.66 to 6.26, respectively;

according to the single factor index and comprehensive pollution index, the whole reservoir was suffering from heavy TN pollution; the organic nitrogen index further indicated that the reservoir was at the level III, among which the central area and RJR were heavily polluted by organic nitrogen (level IV); there was a certain amount of endogenous pollution in Changtan Reservoir, mainly for the organic pollution. More attentions should be paid to the dynamics of nutrients in the sediments of Changtan Reservoir.

Keywords: Changtan Reservoir; sediment; TOC; TN; TP; chemometric characteristics; pollution evaluation

沉积物是河流、湖泊、水库等生态系统的重要组成部分,是氮、磷、有机质等营养盐的重要储存库和归宿地^[1-2],大量外源输入的营养物质经积聚、沉淀、吸附及生物富集等方式不断沉积,是水体污染物重要的“汇”。然而,当外界条件,如温度、溶解氧、氧化还原电位等发生改变时,沉积物中的氮、磷等营养元素可释放进入水体,进而引发水体污染^[3-5]。碳作为最基本的生源要素之一,其循环和代谢过程直接影响着湖库生态系统的物质循环和能量流动^[6-7]。因此,研究沉积物中碳、氮、磷含量及其分布特征对于防控水体富营养化、保障水环境安全,改善生态环境具有重要意义^[8-9]。

已有研究表明,沉积物是上覆水环境重要的营养源,在外源输入得到有效控制的情况下,内源污染释放依旧会维持水体富营养化长达数年甚至数十年之久^[8-10]。狄贞珍等^[11]在太湖的研究指出,沉积物向上覆水体释放的正磷酸盐和氨氮通量分别为 64.6 t/a, 1 756 t/a,为上覆水体总磷和总氮的贡献浓度为 0.013 mg/L, 0.134 mg/L。孟亚媛等^[12]对滇池的研究表明,其沉积物中潜在可矿化氮约占 32.9%,具有较大的潜在释放风险。南漪湖沉积物中约有 60% 的磷较容易释放到上覆水中^[13],存在较大的生态风险。此外,研究表明,沉积物中的有机质含量及其分布特征对氮、磷等污染物释放产生动力学影响^[14-15]。

长潭水库是台州地区唯一一座大型地表水饮用水水源地,关系着台州市城区及温岭市、玉环市近 300 万市民的生活用水、数万家企业的生产用水、以及下游百万公顷农田灌溉及生态用水,是台州市的重要水源地和“生命线”,对保障区域经济发展、社会稳定具有重要作用。然而,其在建设之初以防洪、灌溉为主,并没有考虑生活供水,后期随着人口规模和饮水安全保障需求的同步增加,逐步转为以供水功能为主。近年来,为保障水环境安全,对库区周边的外源输入(工农业生产、居民生活源排放等)进行了有效控制,同时进行了大规模的防护林带建设^[16],然其仍季节性爆发水华,对居民的生产、生活造成了严重影响^[17-18]。本研究以长潭水库为主要研究对象,在库中心区及 8 条入库支流断面共设置 28 个采样点,对表层沉积物中的总有机碳(TOC)、总氮(TN)、总磷(TP)含量进行测定,旨

在全面揭示长潭水库的水体富营养化程度以及碳、氮、磷含量之间的相互关系,以期为长潭水库富营养化的控制与治理提供理论和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

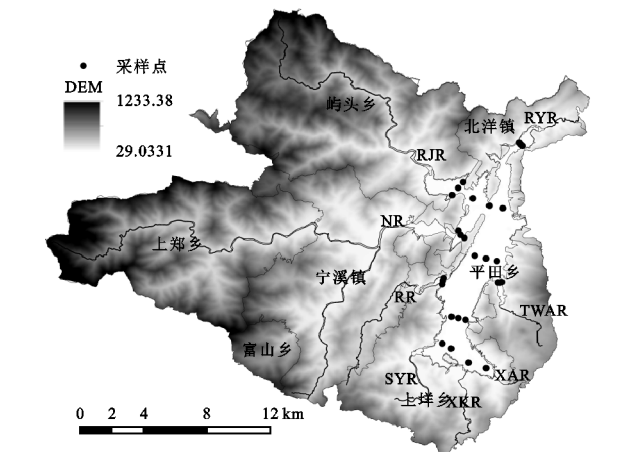
长潭水库(28°30′—28°40′N, 121°00′—121°04′E)隶属于浙江省台州市黄岩区,地处我国中亚热带浙闽沿海山地常绿阔叶林区,属于亚热带海洋性季风气候,温暖湿润,四季分明。年均温 17℃,年无霜期 250 d 左右,年平均降水量 1 675 mm,多集中于 6—9 月,其中 8 月、9 月份常受台风侵袭,降雨量较多,可将近 1 000 mm;年平均蒸发量 777 mm,主要集中在 7—8 月,每月达 145 mm。库区周边土壤以红壤为主,有机质丰富,土层较厚,适宜林、果、茶等植物生长。常绿阔叶林是该区域的地带性植被,主要有青冈、栲属、石栎、木荷、楠木等优势树种。长潭水库始建于 1958 年,于 1964 年完工,库区总面积 441.3 km²,年均径流量 5.04×10⁸ m³,总库容 7.32×10⁸ m³,是以防洪、灌溉、供水为主,兼顾发电等综合利用的大型水库。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集与分析 长潭水库周边共有 8 条入库支流,分别为永宁溪(NR)、柔极溪(RJR)、日溪(RR)、瑞岩溪(RYR)、上垟溪(SYR)、桐外岙溪(TWAR)、小坑溪(XKR)和象岙溪(XAR)。2021 年 9 月,对长潭水库库中心区及各支流入库断面的表层沉积物(0—10 cm)进行采集,共设置 28 个采样点。由于近几年库区周边进行了大规模的防护林带设置,对入库区域的底泥进行挖掘再利用,现已极难采集到底泥,为尽可能减少人为干扰造成的影响,又能代表各入库支流,各入库断面的底泥采集点位均适当往库区内靠近,具体见图 1。底泥沉积物采集主要采用抓斗式底泥采集器,每个样点样品为 3~5 次取样混合样,均匀混合后取出 500 g 左右样品放入自封袋中,置于保温箱中冷藏,带回实验室,置于阴凉通风处自然风干,研磨,过 100 目筛备用。表层沉积物样品采集的同时,记录采样点地理位置信息,水位深度等。

沉积物测定指标主要包含有机碳(TOC)、总氮(TN)、

总磷(TP)。TOC 采用重铬酸钾滴定法(GB9834—1988)测定^[14];TN 采用凯氏定氮法(LYT1228—2015)测定^[19];TP 采用钼锑抗比色法(LYT1232—2015)测定^[19]。



注: RYR 表示瑞岩溪; RJR 表示柔极溪; NR 表示永宁溪; RR 表示日溪; SYR 表示上垌溪; XKR 表示小坑溪; XAR 表示象岙溪; TWAR 表示桐外岙溪。下同。

图 1 研究区概况与采样点位

1.2.2 沉积物污染评价方法与评价标准 为更好地评估长潭水库富营养化程度, 本文采用单因子指数法^[20-21]和综合污染指数法^[22-23]对沉积物污染情况进行评价, 同时考虑入库支流携带的有机污染物的影响, 采用有机污染指数法^[14, 24-25]对沉积物中营养盐污染状况进行综合评价。评价标准见表 1 和表 2。

单因子指数法公式如下:

$$S_i = C_i / C_s \tag{1}$$

式中: S_i 为单项因子的评价指数; C_i 为评价因子 i 的实测值(g/kg); C_s 为评价因子 i 的标准值(g/kg)。参照加拿大安大略省环境和能源部制定的沉积物环境评价标准^[22-26], TN 的 C_s 为 0.55 g/kg; TP 的 C_s 值为 0.60 g/kg。

综合污染指数法公式如下:

$$FF = \sqrt{\frac{F^2 + F_{\max}^2}{2}} \tag{2}$$

式中: FF 为综合污染指数; F 为 n 项污染物污染指数的平均值; F_{\max} 为最大单项污染指数。

有机污染指数法公式如下:

有机指数 = 有机碳(%) × 有机氮(%) $\tag{3}$

有机氮 = 总氮(%) × 0.95 $\tag{4}$

1.3 统计分析

采用 SPSS 19.0 对数据进行处理和统计分析; 用描述性统计功能计算沉积物中 TOC, TN 和 TP 的极大值、极小值、均值、标准差和变异系数等; 采用相关分析功能分析沉积物中 TOC, TN 和 TP 之间的相关性; 采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和 LSD 多重比较方法对库中心区和各支流断面的 C, N, P 含量进行显著性检

验, 显著性水平为 $p < 0.05$ 。数据表述方式为均值 ± 标准差。此外, 采用 ArcGIS 10.2 绘制研究区示意图和采样点分布图, 用 Origin 2020 绘制沉积物 TOC, TN, TP 含量及其线性相关图。

表 1 表层沉积物污染程度分级

等级	S_{TN}	S_{TP}	FF	类型
1	<1.0	<0.5	<1.0	清洁
2	[1.0, 1.5]	[0.5, 1.0]	[1.0, 1.5]	轻度污染
3	(1.5, 2.0]	(1.0, 1.5]	(1.5, 2.0]	中度污染
4	>2.0	>1.5	>2.0	重度污染

表 2 沉积物有机指数与有机氮评价标准

等级	有机指数	有机氮/%	类型
I	<0.05	<0.033	清洁
II	[0.05, 0.20)	[0.033, 0.066)	较清洁
III	[0.20, 0.50)	[0.066, 0.133)	尚清洁
IV	≥0.50	≥0.133	有机污染

2 结果与分析

2.1 长潭水库水体沉积物碳、氮、磷含量与分布特征

2.1.1 水库中心区沉积物碳、氮、磷含量特征 水库中心区有机碳含量 9.83~18.60 g/kg, 均值为(14.49±3.01) g/kg (表 3), 其含量高于汤浦水库(12.23 g/kg)^[27], 但较密云水库(15.1 g/kg)^[7]略低。库中心区有机碳存在一定的空间差异, 由北向南呈现递减趋势。表层沉积物 TN 含量在 1.10~2.37 g/kg 之间, 均值为(1.74±0.44) g/kg, 与太湖(1.75 g/kg)^[28]、巢湖(1.09 g/kg)等^[22]长江中下游地区典型富营养化湖泊浓度类似, 其变异系数为 25.30%, 呈现与 TOC 相似的空间变化特征。表层沉积物 TP 含量为 0.31~0.64 g/kg, 均值为(0.49±0.11) g/kg, 略低于太湖 0.76 g/kg^[28]、巢湖(0.59 g/kg)^[22]、洪湖(0.69 g/kg)等^[23]湖泊, 与汤浦水库^[27]和龙门口水库^[29]含量相当, 其分布特征与 TN 和 TOC 略有不同, 呈现中间低南北高的“凹”型分布。

2.1.2 入库支流断面沉积物碳、氮、磷含量特征 入库支流断面 TOC 含量 7.82~26.09 g/kg, 均值为(13.30±4.14) g/kg, 其中以 RJR, TWAR 和 NR 支流断面的 TOC 含量较高(表 3)。入库支流断面的 TOC 含量整体略低于库中心区, 这与携带的污染物经水流的冲刷、沉积等作用有关, 入库断面的沉积物不断向中心区汇集。此外, 分析发现, 入库支流中, RJR 表层沉积物中 TOC 含量显著高于库中心区及其他支流($p < 0.05$)(表 3), 对库区 TOC 含量的影响较大。

入库支流断面表层沉积物 TN 含量为 0.90~1.73 g/kg, 均值(1.33±0.25) g/kg, 以 RJR, XAR 和 TWAR 的 TN 含量较高, 但整体略低于库中心区(表

3)。其中,NR 和 SYR 支流断面的 TN 含量显著低于库中心区($p<0.05$),与其余支流之间无显著性差异;入库支流断面表层沉积物 TP 含量为 0.17~0.93

g/kg,均值为(0.41±0.18) g/kg,以 TWAR,NR 和 RJR 支流断面较高。表层沉积物 TP 在库中心区及各支流之间均无显著性差异($p>0.05$)。

表 3 库中心区和入库支流断面沉积物 TOC,TN,TP 含量及其化学计量比

样点	TOC/(g·kg ⁻¹)	TN/(g·kg ⁻¹)	TP/(g·kg ⁻¹)	N:P	C:N	C:P
库中心区 CT	14.49±3.01b	1.74±0.44a	0.49±0.11a	3.66a	8.44a	30.68a
宁溪 NR	13.47±1.94b	1.25±0.16b	0.48±0.15a	2.85a	10.75b	30.86a
柔极溪 RJR	19.74±5.82a	1.60±0.14ab	0.45±0.24a	4.23a	12.21ab	50.61a
日溪 RR	12.78±0.53b	1.29±0.12ab	0.41±0.06a	3.18a	9.94ab	31.41a
瑞岩溪 RYR	11.27±2.03b	1.34±0.26ab	0.35±0.03a	3.81a	8.41a	31.90a
上垵溪 SYR	9.59±1.05b	1.08±0.23b	0.24±0.02a	4.71a	8.81a	41.47a
桐外岙溪 TWAR	13.62±4.02b	1.38±0.27ab	0.53±0.36a	3.22a	9.72ab	31.04a
象岙溪 XAR	13.14±2.52b	1.49±0.32ab	0.40±0.13a	3.82a	8.81a	33.72a
小坑溪 XKR	11.36±3.55b	1.30±0.41ab	0.32±0.16a	4.31a	8.77a	37.77a

注:TOC 表示总有机碳;TN 表示总氮;TP 表示总磷。下同。同一列不同字母表示各采样点相应指标在 0.05 水平差异显著。

2.2 水体沉积物 C,N,P 比值变化特征

由表 3 可知,长潭水库区域水体沉积物 C/N 范围为 7.72~15.07,均值为 9.41±1.53;N/P 为 1.66~6.26,均值 3.70±1.05;C/P 为 15.28~63.20,均值 34.48±10.90。其中,库中心区水体沉积物的 C/P,C/N,N/P 均略低于均值,各入库支流断面 C,N,P 比值差异较大,其中,RJR,NR,RR 和 RWAR 这四条入库支流水体沉积物 C/N 比值高于平均值;SYR,XKR,RJR,XAR 和 RYR 这几条支流水体沉积物的 N/P 比值较高;RJR,SRY 和 XKR 的 C/P 比值较高。

沉积物 C/N 在某种程度上可以反映沉积物中有机质来源的差异性^[6,26,30]。研究表明,当 C/N<10 时,沉积物中的有机质主要来源于内源有机质,且当比值范围在 4~10 之间时以藻源性有机质为主^[31];陆源高等植物由于富含纤维素导致较高的 C/N 比,一般大于 20^[7,32]。由分析结果可知(表 3),RJR 和 NR 水体沉积物有机质为 10~20,表现为陆源、内源混合来源的特征,其入库支流对库区水质影响较大;库中心区及其余支流断面则以内源藻类为主,与太湖^[20]及部分水库^[7,29]的研究结果相一致。此外,C/N 比值常被用于判断土壤氮矿化能力和有机质分解能力是否受氮限制^[33]。本研究中,长潭水库库区沉积物 C/N 在 7.72~15.07 之间,均值为 9.41±1.53,远小于 C/N=25,说明库区水体沉积物中的有机物质整体以内源有机质为主,且有机质分解不受氮元素限制,这与库区近几年水体富营养化频发的现状相一致,大量的藻类与浮游生物迅速繁殖后,其残体不断在库区沉积,在水流扰动、微生物分解等作用下,形成一定的内源污染^[34]。

沉积物中 N,P 含量及其比值通常被用于反映水体 N,P 聚积/沉积以及沉积物溶出/释放的动态过程^[33]。库区沉积物中 N/P 比值在 1.66~6.26 之间,

均值为 3.70±1.05,低于全国平均水平^[35-36],表明沉积物中保留的 N 含量相对较低而 P 含量相对较高。这与氮、磷的迁移转化过程密切相关^[22,26,37]。研究指出,内源氮主要通过反硝化、厌氧氨氧化等作用不断被分解释放^[37];表层沉积物中的磷主要来源于上覆水体中颗粒态磷的沉降,且多以有机态形式存在,在各种生物化学作用下逐渐沉积或释放^[22]。不同湖库沉积物中,氮磷沉积、释放速率的差异是导致其比值不同的主要原因^[26,33,38]。通常,生物残体中 P 的分解速率略高于 C,因而 P 含量会相对降低,导致沉积物中 C/P 比值相对较高^[15,33]。本研究中,库区沉积物 C/P 比值为 15.28~63.20,均值为 34.48±10.90,低于全国平均水平^[35-36],说明沉积物中 C 含量较低而 P 的保有量相对较高。

此外,对表层沉积物 TOC,TN,TP 含量进行相关性分析表明(图 2),TN 和 TOC 含量呈显著正相关($R^2=0.56,p<0.01$),线性方程为 $TOC=7.81TN+2.26$,TOC 含量随 TN 含量的增加而增加,TN 与 TOC 沉积具有协同性。TP 与 TOC,TP 与 TN 虽相关系数较低,但亦显著相关,表明沉积物 TP 与 TOC 以及 TP 与 TN 具有一定的相似性,与太湖^[28]、巢湖^[39]的研究结果相一致。

2.3 库区污染评价

根据加拿大安大略省环境和能源部 1922 年发布的沉积物环境质量标准可知,能够引起最低级别生态毒性效应的 TN 和 TP 含量分别为 0.55 g/kg 和 0.60 g/kg;严重级别含量为 4.80 g/kg 和 2.00 g/kg^[22,26]。长潭水库表层沉积物污染评价结果见表 4,整个库区水体沉积物 TN 污染严重,库中心区及各入库支流断面 TN 的污染指数(S_{TN})为 1.972~3.166,除 SYR 入库断面外,均超过重度污染等级限值($S_{TN}=2.0$),属于

重度污染;TP 污染相对较轻,污染指数(S_{TP})为 0.397~0.878,属于轻度污染。整个库区综合污染指数(FF)为 1.832~3.351,仅 SYR 处于中度污染,其余均属于重度污染。研究表明,湖库表层沉积物氮磷含量与氮磷的释放速率呈正相关关系^[15,40]。本研究中,库区表层沉积物氮磷污染严重,或将促使氮磷由沉积物向水体中释放,加剧水体富营养化,影响库区水质安全。

长潭水库四面环山,集雨区包含平田乡、上郑乡、上垌乡、屿头乡、富山乡、宁溪镇、和北洋镇 7 个乡镇(图 1)。据 2020 年调查资料显示,全区共计常住人

口 3.28 万,居民日常生活、生产排放的废弃物亦是库区污染的重要来源之一。考虑入库支流携带有机污染物的影响,进一步采用有机污染指数法对库区污染状况进行分析(表 5),可知,库中心区有机指数介于 0.103~0.418 之间,均值为 0.251,处于Ⅲ等级,属于尚清洁范畴;入库支流断面除 RJR 处于尚清洁范畴,其余均属于较清洁地区(Ⅱ等级);全库区有机氮为 0.086%~0.225%,平均值为 0.139%,总体处于尚清洁水平(等级为Ⅲ级),其中以库中心区、RJR 和 XAR 污染较重,存在有机氮污染(等级为Ⅳ级)。

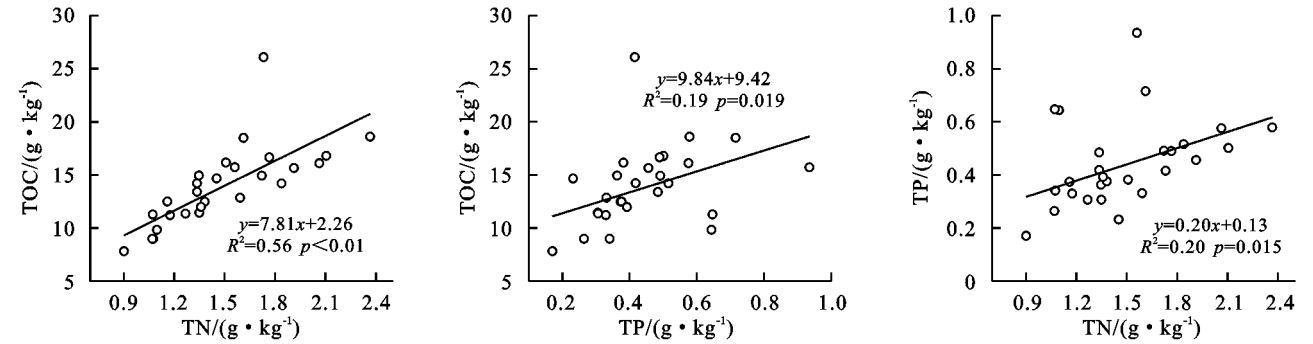


图 2 表层沉积物 TOC,TN,TP 回归分析

表 4 长潭水库水体沉积物污染程度评价结果

样点	S_{TN}		S_{TP}		FF	
	均值	类型	均值	类型	均值	类型
库中 CT	3.166	重度污染	0.814	轻度污染	3.351	重度污染
宁溪 NR	2.276	重度污染	0.793	轻度污染	2.043	重度污染
柔极溪 RJR	2.907	重度污染	0.757	轻度污染	2.576	重度污染
日溪 RR	2.350	重度污染	0.686	轻度污染	2.075	重度污染
瑞岩溪 RYR	2.440	重度污染	0.591	轻度污染	2.310	重度污染
上垌溪 SYR	1.972	中度污染	0.397	轻度污染	1.832	中度污染
桐外岙溪 TWAR	2.509	重度污染	0.878	轻度污染	2.337	重度污染
象岙溪 XAR	2.717	重度污染	0.665	轻度污染	2.515	重度污染
小坑溪 XKR	2.358	重度污染	0.538	轻度污染	2.438	重度污染
平均	2.654	重度污染	0.719	轻度污染	3.266	重度污染

注： S_{TN} 和 S_{TP} 分别代表 TN 和 TP 的单因子指数;FF 为综合污染指数。

表 5 长潭水库水体沉积物有机污染状况评价结果

样点	有机指数					有机氮/%				
	最大值	最小值	均值	类型	等级	最大值	最小值	均值	类型	等级
库中 CT	0.418	0.103	0.251	尚清洁	Ⅲ	0.225	0.104	0.165	有机氮污染	Ⅳ
宁溪 NR	0.191	0.115	0.162	较清洁	Ⅱ	0.128	0.102	0.119	尚清洁	Ⅲ
柔极溪 RJR	0.429	0.202	0.305	尚清洁	Ⅲ	0.164	0.138	0.152	有机氮污染	Ⅳ
日溪 RR	0.170	0.138	0.157	较清洁	Ⅱ	0.131	0.110	0.123	尚清洁	Ⅲ
瑞岩溪 RYR	0.194	0.092	0.147	较清洁	Ⅱ	0.151	0.102	0.127	尚清洁	Ⅲ
上垌溪 SYR	0.137	0.067	0.102	较清洁	Ⅱ	0.120	0.068	0.103	尚清洁	Ⅲ
桐外岙溪 TWAR	0.233	0.091	0.185	较清洁	Ⅱ	0.148	0.102	0.131	尚清洁	Ⅲ
象岙溪 XAR	0.244	0.137	0.190	较清洁	Ⅱ	0.163	0.102	0.142	有机氮污染	Ⅳ
小坑溪 XKR	0.244	0.067	0.149	较清洁	Ⅱ	0.163	0.086	0.123	尚清洁	Ⅲ
平均			0.199	较清洁	Ⅱ			0.139	有机氮污染	Ⅳ

3 结论

长潭水库沉积物 TOC, TN 和 TP 含量较高且具有一定的空间异质性,整体表现为由北向南的递减趋势。与入库支流相比,其库中心区的含量相对较高;在入库支流中则以北侧的柔极溪(RJR)含量较高,其 TOC 含量显著高于其他支流。沉积物中 C/N 比值为 9.41 ± 1.53 , 其内源释放影响较大,且以藻源性浮游生物为主;C/P, N/P 的比值较低,沉积物中 P 的保有量相对较高,存在一定的潜在污染风险。沉积物中 TOC, TN, TP 含量呈现显著正相关关系,整个库区水体沉积物 TN 污染严重,整体处于有机氮污染水平(等级为Ⅳ级),其中以库中心区和 RJR 污染较重。

参考文献:

- [1] Gao X L, Song J M, Li X G, et al. Sediment quality of the Bohai Sea and the northern Yellow Sea indicated by the results of acid-volatile sulfide and simultaneously extracted metals determinations[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 155:111147.
- [2] Hossain G M, Bhuiyan M A H. Spatial and temporal variations of organic matter contents and potential sediment nutrient index in the Sundarbans mangrove forest, Bangladesh [J]. *Ksce Journal of Civil Engineering*, 2016, 20(1):163-174.
- [3] 李运奔,匡帅,王臻宇,等.东巢湖沉积物—水界面氮、磷、氧迁移特征及意义[J].*湖泊科学*, 2020, 32(3):688-700.
- [4] 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.
- [5] 袁轶君,刘娜娜,陈传红,等.环境因子对鄱阳湖沉积物中内源磷释放的影响[J].*江苏农业科学*, 2020, 48(5):227-235.
- [6] Dinçer A R, Yümün S, Önce M, et al. Investigation of inland pollution using total carbon(TC), total organic carbon(TOC), inorganic carbon(IC), total nitrogen(TN)and TOC/TN ratios[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2019, 17(6):14751-14765.
- [7] 房吉敦,熊永强,吴丰昌,等.典型水库沉积有机质组成特征及其源解析[J].*环境科学与技术*, 2018, 41(2):41-46.
- [8] Ma T, Shi L, Li Z, et al. Eutrophication trend analysis and forewarning model construction of water source reservoirs:Gaozhou Reservoir, China [J]. *Ecohydrology*, 2022, 15(2):e2371.
- [9] 丁洋,赵进勇,张晶,等.松花湖水水质空间差异及富营养化空间自相关分析[J].*环境科学*, 2021, 42(5):2232-2239.
- [10] Jeppesen E, Meerhoff M, Jacobsen B A, et al. Resto-

ration of shallow lakes by nutrient control and biomanipulation—the successful strategy varies with lake size and climate[J]. *Hydrobiologia*, 2007, 581(1):269-285.

- [11] 狄贞珍,张洪,单保庆.太湖内源营养盐负荷状况及其对上覆水水质的影响[J].*环境科学学报*, 2015, 35(12):3872-3882.
- [12] 孟亚媛,王圣瑞,焦立新,等.滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力[J].*环境科学*, 2015, 36(2):471-480.
- [13] 谢发之,罗锐,朱元荣,等.南太湖沉积物磷的赋存形态及对上覆水的影响研究[J].*中国环境科学*, 2022, DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20220616.024.
- [14] Wang L F, Xia J, Yu J J, et al. Spatial Variation, Pollution Assessment and Source Identification of Major Nutrients in Surface Sediments of Nansi Lake, China [J]. *Water*, 2017, 9:DOI:10.3390/w9060444.
- [15] Yu J, Zeng Y, Chen J, et al. Organic phosphorus regeneration enhanced since eutrophication occurred in the sub-deep reservoir [J]. *Environmental Pollution*, 2022, 306:119350.
- [16] 徐宜雪,魏伟伟,李春华,等.长潭水库湖滨带、缓冲带范围划定及生态修复实践[J].*环境工程技术学报*, 2022, DOI:10.12153/j.issn.1674-991X.2021051[17]
肖喆,李文攀,张靖天,等.长潭水库生态问题诊断与对策研究[J].*环境工程技术学报*, 2021, 11(4):670-677.
- [18] 屠林初.浅析近年来长潭水库环境水文指标的变动趋势[J].*吉林农业*, 2018(7):74-75.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Zhang Y, Li M, Dong J, et al. A critical review of methods for analyzing freshwater eutrophication [J]. *Water*, 2021, 13: 225.
- [22] 王艳平,徐伟伟,韩超,等.巢湖沉积物氮磷分布及污染评价[J].*环境科学*, 2021, 42(2):699-711.
- [23] 潘雄,顾文俊,李欢,等.洪湖沉积物碳氮磷分布特征及污染评价[J].*长江科学院院报*, 2021, 38(8):41-46.
- [24] 程先,孙然好,孔佩儒,等.海河流域水体沉积物碳、氮、磷分布与污染评价[J].*应用生态学报*, 2016, 27(8):2679-2686.
- [25] 冀峰,王国祥,韩睿明,等.太湖流域农村黑臭河流表层沉积物营养盐的污染特征[J].*水土保持通报*, 2016, 36(3):81-87, 93.
- [26] 尹德超,王雨山,祁晓凡,等.白洋淀湿地不同植物群落区表层沉积物碳氮磷化学计量特征[J].*湖泊科学*, 2022, 34(2):506-516.

- 性状、酶活性及黄瓜产量的影响[J].水土保持学报, 2017, 31(6): 272-278.
- [20] 郜茹茹.花生壳及其生物质炭施用对旱地红壤肥力及红薯产量的影响[D].南昌:南昌工程学院, 2020.
- [21] Spokas K A. Impact of biochar field aging on laboratory greenhouse gas production potentials [J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2012, 5(2): 165-176.
- [22] 靖彦,陈效民,李秋霞,等.生物质炭对红壤中硝态氮和铵态氮的影响[J].水土保持学报, 2013, 27(6): 265-269.
- [23] Eykelbosh A J, Johnson M S, Couto E G. Biochar decreases dissolved organic carbon but not nitrate leaching in relation to vinasse application in a Brazilian sugarcane soil[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 149: 9-16.
- [24] 闫翠萍,裴雪霞,王姣爱,等.秸秆还田与施氮对冬小麦生长发育及水肥利用率的影响[J].中国生态农业学报, 2011, 19(2): 271-275.
- [25] 邓建强.鄂西南土地整治区水土流失阻控及生物质炭改土效应研究[D].南京:南京农业大学, 2017.
- [26] 韩光明.生物炭对不同类型土壤理化性质和微生物多样性的影响[D].沈阳:沈阳农业大学, 2013.
- [27] 杨少斌,孙向阳,张骏达,等.北京市五环内绿地土壤4种重金属的形态特征及其生物有效性[J].水土保持通报, 2018, 38(3): 79-85, 93.
- [28] Igalavithana A D, Lee S E, Lee Y H, et al. Heavy metal immobilization and microbial community abundance by vegetable waste and pine cone biochar of agricultural soils[J]. *Chemosphere*, 2017, 174: 593-603.
- [29] Ahmad M, Ok Y S, Kim B Y, et al. Impact of soybean stover and pine needle-derived biochar on Pb and As mobility, microbial community, and carbon stability in a contaminated agricultural soil[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 166: 131-139.
- ~~~~~
- (上接第443页)
- [27] 刘鹄,孟婷,程文,等.汤浦水库沉积物碳、氮、磷的分布与评价[J].水土保持通报, 2017, 37(2): 333-338.
- [28] 杨洋,刘其根,胡忠军,等.太湖流域沉积物碳氮磷分布与污染评价[J].环境科学学报, 2014, 34(12): 3057-3064.
- [29] 胡强,吴晓彬,王姣,等.江西省典型水库沉积物碳·氮·磷分布及污染评价[J].江西水利科技, 2021, 47(3): 214-218.
- [30] Carneiro L M, Zucchi M D, de Jesus T B, et al. $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ and TOC/TN as indicators of the origin of organic matter in sediment samples from the estuary of a tropical river[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 172: 112857.
- [31] 祁闯,方家琪,张利民,等.太湖藻型湖区沉积物中生物易降解物质组成及分布规律[J].湖泊科学, 2019, 31(4): 941-949.
- [32] 朱晓磊,张洪,雷沛,等.官厅水库沉积物中大量元素的历史分布特征[J].环境科学学报, 2016, 36(2): 442-449.
- [33] 张智博,刘涛,曹起孟,等.东平湖沉积物—菹草系统碳、氮、磷空间分布及化学计量特征[J].环境化学, 2020, 39(8): 2263-2271.
- [34] 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.
- [35] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98: 139-151.
- [36] Zhang J H, Li M X, Xu L, et al. C:N:P stoichiometry in terrestrial ecosystems in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 795: 148849.
- [37] 向速林,吴涛哲,龚聪远,等.鄱阳湖沉积物与水界面氮的迁移特征及污染评价[J].生态环境学报, 2021, 30(4): 781-786.
- [38] 张紫霞,刘鹏,王妍,等.不同类型岩溶湿地表层沉积物碳氮磷生态化学计量学特征时空分布[J].水土保持研究, 2020, 27(4): 23-30.
- [39] 苗慧,沈峥,蒋豫,等.巢湖表层沉积物氮、磷、有机质的分布及污染评价[J].生态环境学报, 2017, 26(12): 2120-2125.
- [40] 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.