

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2021112205

王斌, 黄廷林, 翟振起, 等. 水源水库沉积物碳氮磷分布特征及污染评价[J]. 环境化学, 2023, 42(4): 1304-1312.

WANG Bin, HUANG Tinglin, ZHAI Zhenqi, et al. Distribution characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in sediments of water source reservoir and pollution assessment[J]. Environmental Chemistry, 2023, 42 (4): 1304-1312.

水源水库沉积物碳氮磷分布特征及污染评价*

王斌¹ 黄廷林^{1**} 翟振起² 陈凡¹ 周闪闪¹

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西省环境工程重点实验室, 西安, 710055; 2. 深圳市北部水源工程管理处茜坑水库管理所, 深圳, 518110)

摘要 茜坑水库作为深圳市重要的水源水库, 对当地经济发展和社会稳定有着重要作用. 为探究茜坑水库沉积物中营养物质的空间分布特征及污染状况, 测定了茜坑水库 14 个点位表层沉积物中总氮 (TN)、总磷 (TP) 和总有机碳 (TOC) 的含量, 分析了 TN、TP、TOC 之间的相关性及 TOC/TN, 并对沉积物污染状况进行了评价. 结果表明, 茜坑水库表层沉积物 TN 平均含量为 3442 mg·kg⁻¹, TP 平均含量为 1648 mg·kg⁻¹, TOC 平均含量为 1.477%, 碳、氮、磷污染严重且空间分布差异明显, 旧库区主库及库湾碳、氮、磷含量均大于新库区. 相关性分析表明, TOC 与 TN、TOC 与 TP、TN 与 TP 均呈显著正相关关系 ($P < 0.05$, r^2 分别为 0.95, 0.63, 0.69), 表明茜坑水库表层沉积物氮磷多以有机形式存在, 且氮磷具有同源性. TOC/TN 表明茜坑水库沉积物中的有机质多来自于藻类, 还有一小部分来自水生生物. 综合污染指数和有机指数评价结果均表明茜坑水库各个点位沉积物污染程度严重, 氮、磷、有机质具有潜在的内源释放的风险.

关键词 水源水库, 沉积物, 碳氮磷, 分布特征, 污染评价.

Distribution characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in sediments of water source reservoir and pollution assessment

WANG Bin¹ HUANG Tinglin^{1**} ZHAI Zhenqi² CHEN Fan¹ ZHOU Shanshan¹

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology, Ministry of Education, Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, 710055, China; 2. XiKeng Reservoir Management Institute, North Water Resources Engineering Management Office, Shenzhen City, Shenzhen, 518110, China)

Abstract As an important water source reservoir in Shenzhen, Xikeng Reservoir plays an important role in local economic development and social stability. To explore the spatial distribution characteristics and pollution status of nutrients in the sediments of the Xikeng Reservoir, this study determined the total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and total organic carbon (TOC) of the surface sediments at 14 points in the Xikeng Reservoir, analyzed the correlation between TN, TP, TOC and TOC/TN, and evaluated the sediment pollution. The results showed that the average content of TN in the surface sediments of Xikeng Reservoir was 3442 mg·kg⁻¹, the average content of TP was 1648 mg·kg⁻¹, the average content of TOC was 1.477%, the pollution of carbon, nitrogen, and

2021年11月22日收稿(Received: November 22, 2021).

* 国家自然科学基金(51979217)和国家重点研发计划(2019YFD1100101)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51979217) and National Key Research and Development Program (2019YFD1100101).

** 通信联系人 **Corresponding author**, Tel: 13991975631, E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn

phosphorus was serious and the spatial distribution difference was obvious. The carbon, nitrogen and phosphorus contents of the main reservoir and reservoir bay in the old reservoir area were higher than those in the new reservoir area. The correlation showed that TOC and TN, TOC and TP, TN and TP were all significantly positively correlated ($P < 0.05$, r^2 was 0.95, 0.63, 0.69, respectively), indicated that the nitrogen and phosphorus in the surface sediments of Xikeng Reservoir mostly existed in organic form, and nitrogen and phosphorus had homology. TOC/TN indicated that the organic matter in the sediments of Xikeng Reservoir mostly came from algae, and a small part came from aquatic organisms. The evaluation results of the comprehensive pollution index and the organic index indicated that the sediment pollution at each point of the Xikeng Reservoir was serious, and there were potential risks of internal release of nitrogen, phosphorus, and organic matter.

Keywords water source reservoir, sediment, carbon, nitrogen and phosphorus, distribution characteristics, pollution evaluation.

水体富营养化及蓝藻水华仍然是目前湖泊、水库所面临的最主要的生态环境问题^[1]。据生态环境部最新发布的《2020 中国生态环境状况公报》显示,开展水质监测的 112 个重要湖库中 IV-V 类、劣 V 类水质占 23.2%,总磷是主要污染指标之一;110 个监测营养状态的湖库中,轻度富营养状态、中度富营养状态和重度富营养状态占 29.0%,湖库富营养化态势严峻^[2]。在湖库生态系统中,沉积物作为碳、氮、磷等营养元素和其他污染物的主要蓄积库,在外源污染得到有效控制的情况下,沉积物的内源释放依旧会导致严重的富营养化问题^[3]。因此在湖库富营养化防治过程中,沉积物中的碳、氮、磷是备受关注的重要指标。

对河流、湖泊沉积物中氮磷等营养盐含量及其分布特征目前已经开展了较多的研究^[4-5]。近年来,水库逐渐成为城市供水的主要水源^[6]。相较于天然湖泊,水源水库水体停留时间更长,对污染物的截留沉积效果更加明显^[7]。同时,由于季节性热分层的存在,导致水库底层水体长期处于厌氧或者缺氧状态,诱发沉积物营养物质释放,造成水库蓝藻水华爆发,严重危及饮用水安全^[8-9]。因此,探明水源水库沉积物中碳、氮、磷的污染负荷及分布特征,揭示其污染现状,对水库水体富营养化控制、保障饮用水安全具有重要意义。

随着深圳经济的高速发展和用水需求的不断增长,水安全问题备受关注。茜坑水库作为深圳市西北片区最重要的饮用水水库,对经济发展和社会稳定有着重要作用^[10-11]。目前,对茜坑水库表层沉积物中碳、氮、磷污染状况还缺乏系统的调查。本研究通过采集茜坑水库 14 个点位表层沉积物,测定各点位表层沉积物总有机碳(TOC)、总氮(TN)、总磷(TP)的含量,研究表层沉积物中 TOC、TN、TP 空间分布特征,分析 TOC、TN、TP 的相关关系和 TOC/TN,沉积物的污染状况采用综合污染指数法和有机指数法进行评价。

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 研究区域概况

茜坑水库位于广东省深圳市龙华区(113.994—114.022°E, 22.690—22.711°N),始建于 1993 年,2002 年完成新库区扩建,坝址以上集雨面积 4.79 km²,总库容 1917 万 m³,正常库容 1857 万 m³,最大水深约 20 m。水库地处北回归线以南,属于亚热带海洋性季风气候,年平均气温 22 °C,平均降雨量 1800 mm。茜坑水库是深圳市西北部最大的供水调蓄水库,承担着向龙华、大浪、观澜街道供水或转输原水的重要任务。

1.2 样品采集与处理

根据茜坑水库的地形地貌特征,在全库共设置 14 个采样点,采样点涵盖新旧库区主库及库湾。研究区域及采样点分布示意如图 1 所示。14 个点位的表层沉积物样品于 2021 年 3 月下旬用彼得森抓泥斗现场采集,运回实验室进行后续处理。参考刘飞等^[12]的处理方法,将运回实验室的沉积物样品自然

风干, 去除杂质后, 经玛瑙研钵研磨过 100 目(0.149 mm)筛后, 置于自封袋后 4 °C 保存以供后续分析, 各点位沉积物特征描述见表 1.

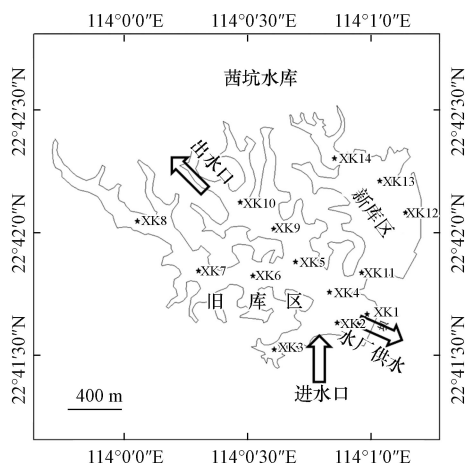


图 1 茜坑水库平面图及采样点分布示意

Fig.1 Map of Xikeng Reservoir and sampling points

表 1 采样点位置及表层沉积物性状

Table 1 Sampling point location and sediments properties

点位 Point	位置 Location	泥质 Sediment quality
XK1	坝前最深点	表层颜色较浅, 内层发黑, 泥较黏稠
XK2	入水口	颜色很浅, 沙砾较多, 臭味大
XK3	旧库区库湾	颜色深黑, 有臭味
XK4	入水口	沙砾最多, 颜色最浅
XK5	旧库区主库	内层颜色发黑, 泥呈松散稀软状
XK6	旧库区库湾	表层颜色较浅, 内层发黑, 泥较黏稠
XK7	旧库区库湾	内层颜色发黑, 泥呈松散稀软状
XK8	旧库区库湾	内层颜色深黑
XK9	旧库区主库	内层颜色发黑, 泥呈松散稀软状
XK10	出水口	内层颜色发黑, 泥呈松散稀软状
XK11	新库区主库	表层颜色较浅, 内层发黑
XK12	新库区主库	颜色深黑, 有臭味
XK13	新库区主库	有少许沙砾, 内层颜色较黑
XK14	新库区库湾	内层颜色发黑, 泥呈松散稀软状

1.3 分析方法

沉积物 TN 采用过硫酸盐消化法测定^[13], TP 采用过硫酸钾氧化分光光度计法^[14], 沉积物 TOC 使用总有机碳分析仪(德国, Vario CUBE)进行测定. 采用 Excel2019 软件进行数据处理, SPSS 21.0 软件进行 Pearson 相关性分析($P < 0.05$ 表示显著相关), Origin 2021 进行图形绘制, 表层沉积物 TOC、TN、TP 空间分布采用 ArcGis 10.6 软件进行空间插值绘图分析.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 表层沉积物 TN、TP 分布特征

如图 2(a), 茜坑水库表层沉积物 TN 含量变化范围为 1354—4536 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 3442 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. TN 空间分布差异显著, 总体上表现为旧库区 > 新库区的特点, 其平均含量呈现旧库区库湾(XK3、XK6、XK7、XK8) > 旧库区主库(XK1、XK5、XK9) > 新库区库湾(XK14) > 新库区主库(XK11、XK12、

XK13)>出水口(XK10)>入水口(XK2、XK4)的特点,旧库区库湾 TN 含量最高($>4000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),这些点位水体流动性较差,泥沙淤积时间较长,再加之其靠近居民生活区,外源氮污染影响较大,导致沉积物中 TN 含量最高.入水口表层沉积物 TN 含量最低,该点位水流明显,水动力交换强,不利于沉积物沉积,导致其 TN 污染程度较轻.当水流从进水口流入主库区时,断面拓宽,流速减慢,泥沙逐渐沉积,导致 XK5、XK9 点位 TN 含量较高;近坝区的 XK1 和 XK12 采样点水深最深,且大坝对水体截留效果明显,导致该点位沉积物 TN 也处于较高水平.

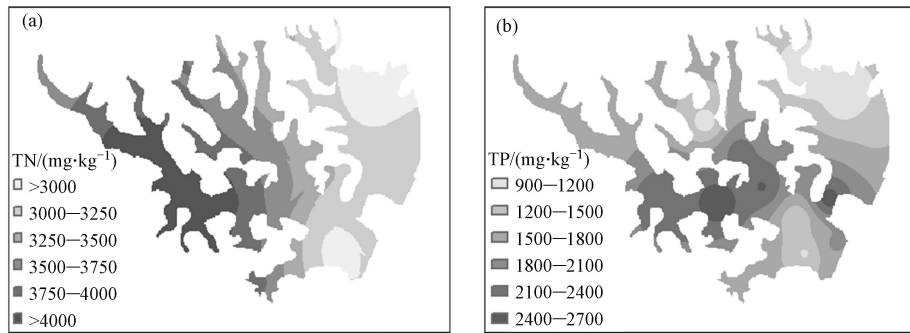


图 2 茜坑水库表层沉积物 TN、TP 空间分布

Fig.2 Spatial distribution of TN and TP in surface sediments of Xikeng Reservoir

如图 2(b),茜坑水库表层沉积物 TP 含量变化范围为 $916\text{--}2516 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均为 $1648 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,TP 含量的变化幅度小于 TN.与 TN 类似,沉积物 TP 平均含量也呈现旧库区>新库区特点,旧库区库湾 XK6 采样点表层沉积物 TP 含量最高.在空间分布上,呈现旧库区主库(XK1、XK5、XK9)>旧库区库湾(XK3、XK6、XK7、XK8)>新库区主库(XK11、XK12、XK13)>入水口(XK2、XK4)>出水口(XK10)>新库区库湾(XK14)的特点.与 TN 来源略有不同,调水携带的大量泥沙是沉积物 TP 的主要来源,旧库区主库(XK1、XK5、XK9)水流变缓,泥沙逐渐沉积,导致该区域表层沉积物 TP 含量最高.

2.2 表层沉积物 TOC 分布特征

碳是沉积物中的营养元素之一,也是氮、磷迁移转化的重要载体,在藻华暴发以及水环境的物理、化学和生物反应中都扮演了非常重要的角色^[15].TOC 可以综合反映水中有机物的污染程度.如图 3,茜坑水库表层沉积物 TOC 质量分数变化范围为 $0.388\%\text{--}2.140\%$,平均为 1.477% .与沉积物 TN 类似,旧库区库湾(XK3、XK6、XK7、XK8)表层沉积物 TOC 含量最高,入水口(XK2、XK4)沉积物 TOC 含量最低.TOC 空间分布呈现旧库区库湾(XK3、XK6、XK7、XK8)>新库区库湾(XK14)>旧库区主库(XK1、XK5、XK9)>新库区主库(XK11、XK12、XK13)>出水口(XK10)>入水口(XK2、XK4)的分布形式.旧库区库湾和新库区库湾处表层沉积物 TOC 含量较高,这可能是库湾处流速降低,大量有机碎屑逐渐沉降堆积所导致的.相比之下,开敞库区以及受水流动力作用影响下的进出水口,藻类和有机碎屑不易堆积,导致沉积物 TOC 含量较低.

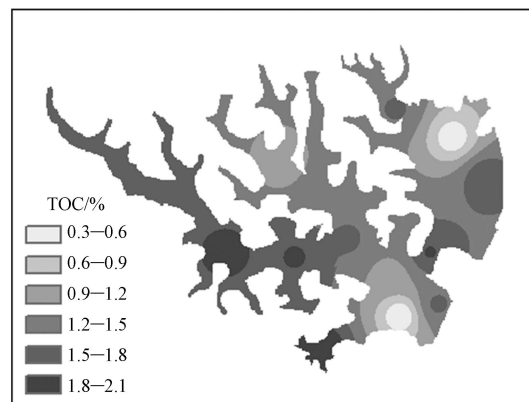


图 3 茜坑水库表层沉积物 TOC 空间分布

Fig.3 Spatial distribution of TOC in surface sediments of Xikeng Reservoir

2.3 TN、TP、TOC 相关关系及 TOC/TN

沉积物 TN、TP、TOC 之间的相关性可以反映污染物之间的相关关系,并判断它们是否具有相同的来源,相关性系数越高则说明来源越相似^[16]。茜坑水库表层沉积物 TOC、TN、TP 的相关关系如表 2 所示,表层沉积物中 TOC 与 TN 呈显著正相关($r^2=0.95, P<0.05$),表明茜坑水库表层沉积物中的 TN 多以有机态的形式存在。李芬芳等^[17]的研究表明,水体沉积物中的总氮 70%—90% 为有机氮,本研究进一步证实了以上结论。TOC 与 TP 呈正相关关系($r^2=0.63, P<0.05$),表明有机质也是磷的重要载体。有研究表明^[18],沉积物中的有机质与磷尤其是有机磷密切相关。沉积物中的有机质参与了多种生物化学和地球化学作用,有机质的矿化降解伴随着剧烈的氮、磷等营养元素的释放,可能造成严重的水质污染问题^[19]。表层沉积物 TN 和 TP 呈正相关关系($r^2=0.69, P<0.05$),表明表层沉积物中的氮、磷来源及其在水中的迁移转化具有一定的相似性^[20]。

表 2 茜坑水库表层沉积物 TN、TP、TOC 相关关系

Table 2 Correlation of TN, TP and TOC in surface sediments of Xikeng Reservoir

	TOC	TN	TP
TOC	1		
TN	0.95*	1	
TP	0.63*	0.69*	1

TOC/TN 可以在一定程度上反映有机质来源差异性^[21],许多湖库表层沉积物 TOC/TN 为 6—14。水生生物 TOC/TN 为 2.8—3.4,藻类的 TOC/TN 一般为 4—10,浮游植物 TOC/TN 为 6—13,无纤维束植物 TOC/TN 为 4—12,有纤维束植物碎屑一般大于 20^[22]。总体来说,TOC 与 TN 比值越大,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。茜坑水库表层沉积物 TOC/TN 变化范围为 2.9—5.0,平均为 4.2(图 4),TOC 与 TN 比值较小,说明茜坑水库沉积物中的有机质多来自于藻类,还有一小部分来自水生生物。

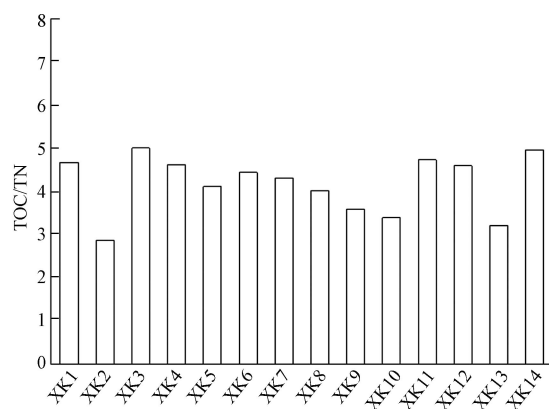


图 4 茜坑水库表层沉积物 TOC/TN

Fig.4 TOC/TN of sediments in Xikeng Reservoir

2.4 TN、TP、TOC 污染评价

目前对湖库沉积物的污染状况,尚无统一的评价方法和标准,有部分学者采用加拿大安大略省环境和能源部(1992)制定的环境质量评价标准,将沉积物中的污染物对底栖生物的生态毒性效应进行分级^[23],此标准虽然对沉积物中的碳、氮、磷等营养元素污染状况均进行了评价,但该评价标准源于对海洋沉积物的生态毒性进行分析,对水源水库的适用性还有待进一步考证。常用的综合污染指数法忽略了 TOC 指标,有机指数法缺乏对 TP 的评价,本研究采用综合污染指数法来评价茜坑水库表层沉积物氮、磷的污染状况,采用有机指数法来补充评价有机碳和有机氮污染状况,评价标准见表 3。

表 3 沉积物污染评价标准^[24]

Table 3 Standard of pollution for sediments

等级 Grade	综合污染指数 Comprehensive pollution index			有机污染指数 Organic pollution index		污染程度 Pollution degree
	S_{TN}	S_{TP}	FF	有机指数	有机氮/%	
				Organic index	Organic nitrogen	
1	<1.0	<0.5	≤1.0	<0.05	<0.033	未受污染
2	1.0—1.5	0.5—1.0	1.0—1.5	0.05—0.2	0.033—0.066	轻度污染
3	1.5—2.0	1.0—1.5	1.5—2.0	0.2—0.5	0.066—0.133	中度污染
4	≥2.0	≥1.5	≥2.0	≥0.5	≥0.133	重度污染

综合污染指数可由单项污染指数公式计算得到^[24]:

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

$$FF = \sqrt{(F^2 + F_{\max}^2) / 2} \quad (2)$$

根据王佩等^[25]对太湖湖滨带底泥评价标准, S_i 为单项评价指数或标准指数, S_i 大于 1 表示因子 i 含量超过评价标准值; C_i 为评价因子 i 的实测含量; C_s 为评价因子 i 的评价标准值. TN 的 C_s 取 $670 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, TP 的 C_s 取 $440 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. F 为 n 项评价因子的评价指数平均值, F_{\max} 为最大单项评价指数 (S_{TN} 和 S_{TP} 中最大者).

有机指数常用于评价沉积物的营养状况, 而有机氮是衡量湖泊表层沉积物是否受到氮污染的重要指标^[26], 计算方法及评价标准如下 ($1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} = 0.1\%$):

$$\text{有机指数} = \text{有机碳}(\%) \times \text{有机氮}(\%) \quad (3)$$

$$\text{有机氮}(\%) = \text{总氮}(\%) \times 0.95 \quad (4)$$

如表 4 所示, 茜坑水库表层沉积物 TN 的单项污染指数范围为 2.02—6.77, 平均为 4.93, 所有点位的沉积物 TN 均处于重度污染水平; TP 的单项污染指数范围为 2.08—5.72, 平均为 3.72, 所有点位的沉积物 TP 均处于重度污染水平. 全库沉积物综合污染指数范围为 2.20—6.32, 平均为 4.75, 所有点位均处于重度污染水平. 对比 S_{TN} 、 S_{TP} 和 FF 在新旧库区的情况, 与 TN 和 TP 污染负荷空间分布相同, TN、TP 单项污染和综合污染在旧库区也均比新库区严重. 茜坑水库表层沉积物有机污染指数范围为 0.05—0.87, 平均为 0.52, 有机氮指数范围为 0.13—0.43, 平均为 0.32. 综合污染指数法和有机指数法评价结果均表明, 茜坑水库各个点位沉积物受到一定程度的污染, 沉积物碳、氮、磷具有潜在的内源释放的风险.

表 4 茜坑水库表层沉积物污染评价结果

Table 4 Evaluation results of surface sediment pollution in Xikeng Reservoir

点位 Point	S_{TN}	污染程度 Pollution degree	S_{TP}	污染程度 Pollution degree	FF	污染程度 Pollution degree	有机指数 Organic index	污染程度 Pollution degree	有机氮指数 Organic nitrogen index	污染程度 Pollution degree
XK1	5.14	重度	3.95	重度	4.85	重度	0.53	重度	0.33	重度
XK2	2.02	重度	2.64	重度	2.49	重度	0.05	轻度	0.13	中度
XK3	6.38	重度	3.58	重度	5.72	重度	0.87	重度	0.41	重度
XK4	3.51	重度	2.69	重度	3.31	重度	0.24	中度	0.22	重度
XK5	5.81	重度	5.16	重度	5.65	重度	0.59	重度	0.37	重度
XK6	6.38	重度	5.72	重度	6.22	重度	0.77	重度	0.41	重度
XK7	6.77	重度	4.90	重度	6.32	重度	0.84	重度	0.43	重度
XK8	6.66	重度	3.45	重度	5.92	重度	0.76	重度	0.42	重度
XK9	5.92	重度	4.69	重度	5.62	重度	0.54	重度	0.38	重度
XK10	4.57	重度	2.44	重度	4.08	重度	0.30	中度	0.29	重度

续表 4

点位 Point	S_{TN}	污染程度 Pollution degree	S_{TP}	污染程度 Pollution degree	FF	污染程度 Pollution degree	有机指数 Organic index	污染程度 Pollution degree	有机氮指数 Organic nitrogen index	污染程度 Pollution degree
XK11	5.92	重度	5.39	重度	5.79	重度	0.71	重度	0.38	重度
XK12	5.81	重度	3.25	重度	5.21	重度	0.66	重度	0.37	重度
XK13	2.23	重度	2.08	重度	2.20	重度	0.07	轻度	0.14	重度
XK14	4.79	重度	2.19	重度	4.19	重度	0.48	中度	0.30	重度

2.5 TN、TP、TOC 污染负荷对比

水源保护是生态文明建设的重要组成部分,近年来,国家对重点城市的主要饮用水水源水质提出了更高要求^[27]. 茜坑水库作为深圳市的重点水源,面临着水质标准提升的紧迫要求. 随着茜坑水库水源保护工作的持续推进,目前整个水库集雨区内均没有较为明显的点源和面源的人为污染源,水库的外源污染已经得到了有效的控制. 而作为有近 30 年历史的水库,水库建成初期周边存在大量的面源和点源污染,同时水库多年引调水带来的大量氮磷物质在库区沉积,使得水库沉积物存在较大安全风险. 通过上述对茜坑水库表层沉积物碳、氮、磷污染负荷测定及污染评价可知,茜坑水库表层沉积物碳、氮、磷污染均较为严重,相较于国内其他类型湖库(表 5),茜坑水库表层沉积物 TN 含量与武汉南湖、山东周村水库接近,显著高于山美水库、密云水库、金盆水库和太湖等湖库; TP 含量低于武汉南湖,与金盆水库相近,显著高于其他湖库; TOC 含量则低于武汉南湖、金盆水库和周村水库,与其他湖库相近,茜坑水库内源负荷不容忽视.

表 5 茜坑水库表层沉积物 TN、TP、TOC 平均含量与其他湖库比较

Table 5 Comparison of the average content of TN, TP and TOC in the surface sediments of Xikeng Reservoir with other lakes and reservoirs

	TN/(mg·kg ⁻¹)	TP/(mg·kg ⁻¹)	TOC/%	参考文献 Reference
武汉南湖	3972	1711	6.58	[28]
长寿湖	2255	622	2.80	[29]
太湖	1349	486	1.05	[30]
密云水库	1900	895	—	[29]
周村水库	3900	1600	11.1	[12]
山美水库	1180	642	3.30	[20]
金盆水库	1132	1131	7.02	[23]
茜坑水库	3442	1648	1.48	本研究

2.6 内源污染负荷对水库水质的影响

近年来,许多水源水库相继发生了严重的水质污染问题,有的甚至已经不能作为城市居民供水水源. 掌握水源水库水质演变规律和内源污染特征是控制水源水质污染和规避污染风险的重要依据^[31]. 先前对茜坑水库水质演变规律的研究表明^[32],茜坑水库水体在夏季会出现显著的热分层现象,热分层的存在阻碍了上下层水体间的物质交换,使得底层水体 0—5 m 处于厌氧或者缺氧状态,水体厌氧诱发沉积物内源污染释放,造成分层期间底层水体氨氮的总磷浓度显著高于中上层水体. 室内释放实验也表明,茜坑水库氨氮平均释放通量为 7.36 mg·(m²·d)⁻¹,总磷为 2.20 mg·(m²·d)⁻¹,内源氨氮和总磷的释放对水体贡献率分别可达 27.98% 和 38.92%,沉积物氮磷释放对水库水质影响显著. 对茜坑水库表层沉积物及其上覆水溶解性有机质光谱特征的分析表明^[33],茜坑水库表层沉积物中的类蛋白质和类腐殖质浓度远高于上覆水体,在适当温度、溶解氧和微生物等条件下,沉积物中的有机质可能向上覆水体释放大量的可溶性副产物,对水库水质安全产生较大威胁. 前文对茜坑水库表层沉积物中营养物质污染负荷及污染评价分析表明,茜坑水库沉积物内源污染负荷不容忽视. 因此,为保障水库供水安全,需要采取有效措施在源头削减沉积物污染负荷、抑制或消除水库内源污染.

3 结论(Conclusion)

(1) 茜坑水库表层沉积物 TN 污染负荷最小为 $1354 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最大为 $4536 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 $3442 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; TP 最小为 $916 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最大为 $2516 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 $1648 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; TOC 质量分数最小为 0.388%, 最大为 2.140%, 平均为 1.477%。茜坑水库表层沉积物碳、氮、磷污染严重且空间分布差异明显, 总体呈现旧库区大于新库区的特征。

(2) TOC、TN、TP 相关性分析表明, TOC 与 TN 呈显著正相关($r^2=0.95, P<0.05$), TOC 与 TP 呈正相关关系($r^2=0.63, P<0.05$), 表明茜坑水库表层沉积物中的氮磷多以有机形式存在。TN 和 TP 也呈正相关关系($r^2=0.69, P<0.05$), 表明表层沉积物中的氮、磷来源及其在水中的迁移转化具有一定的相似性。TOC/TN 表明茜坑水库沉积物中的有机质多来自于藻类, 还有一小部分来自水生生物。

(3) 综合污染指数平均为 4.48; 有机污染指数平均为 0.52, 有机氮指数平均为 0.32。评价结果均表明, 茜坑水库各个点位沉积物碳氮磷污染程度较为严重, 具有潜在的内源释放的风险。

参考文献 (References)

- [1] 秦伯强. 浅水湖泊湖沼学与太湖富营养化控制研究 [J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1229-1243.
QIN B Q. Shallow lake limnology and control of eutrophication in Lake Taihu [J]. *Lake Science*, 2020, 32(5): 1229-1243 (in Chinese).
- [2] 生态环境部. 2020年中国生态环境状况公报(摘录)[J]. 环境保护, 2021, 49(11): 47-68.
China ecological environment status bulletin 2020 (excerpt)[J]. *Environmental Protection*, 2021, 49(11): 47-68.
- [3] LIU C, SHAO S G, SHEN Q S, et al. Effects of riverine suspended particulate matter on the post-dredging increase in internal phosphorus loading across the sediment-water interface [J]. *Environmental Pollution (Barking, Essex:1987)*, 2016, 211: 165-172.
- [4] 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.
YANG Y, LIU Q G, HU Z J, et al. Spatial distribution of sediment carbon, nitrogen and phosphorus and pollution evaluation of sediment in Taihu Lake Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(12): 3057-3064 (in Chinese).
- [5] 王书锦, 刘云根, 张超, 等. 洱海流域入湖河口湿地沉积物氮、磷、有机质分布及污染风险评价 [J]. 湖泊科学, 2017, 29(1): 69-77.
WANG S J, LIU Y G, ZHANG C, et al. Distribution and pollution risk assessment of nitrogen, phosphorus and organic matter in inlet rivers of Erhai Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29(1): 69-77 (in Chinese).
- [6] 苏露, 黄廷林, 李楠, 等. 分层型水源水库沉积物需氧量特性 [J]. 环境科学, 2018, 39(3): 1159-1166.
SU L, HUANG T L, LI N, et al. Characteristics of sediment oxygen demand in a drinking water reservoir [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(3): 1159-1166 (in Chinese).
- [7] 崔会芳, 陈淑云, 杨春晖, 等. 宜兴市横山水库底泥内源污染及释放特征 [J]. 环境科学, 2020, 41(12): 5400-5409.
CUI H F, CHEN S Y, YANG C H, et al. Endogenous pollution and release characteristics of bottom sediments of Hengshan reservoir in Yixing City [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(12): 5400-5409 (in Chinese).
- [8] VARJO E, LIKANEN A, SALONEN V P, et al. A new gypsum-based technique to reduce methane and phosphorus release from sediments of eutrophied lakes [J]. *Water Research*, 2003, 37(1): 1-10.
- [9] 徐进, 黄廷林, 李凯, 等. 李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响 [J]. 环境科学, 2019, 40(7): 3049-3057.
XU J, HUANG T L, LI K, et al. Pollution sources and the stratification effects on water quality in Lijiahe reservoir [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(7): 3049-3057 (in Chinese).
- [10] 叶焰中, 陈凡, 黄廷林. 基于水质综合指数法对亚热带水源型水库水质评价 [J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 116-124.
YE Y Z, CHEN F, HUANG T L. Water quality evaluation of subtropical source water reservoir using water quality index [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(2): 116-124 (in Chinese).
- [11] 林蔚, 陈梓林, 李晖. 东江下游流域城水耦合协调关系评价及其影响因素 [J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 66-74.
LIN W, CHEN Z L, LI H. Evaluation of urban-water coupling coordination relationship and its influencing factors in lower reaches of the Dongjiang River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(4): 66-74 (in Chinese).
- [12] 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 (in Chinese).
- [13] 原璐彬, 邢书语, 刘鑫, 等. 镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价 [J]. 环境科学, 2021, 42(7): 3186-3197.
YUAN L B, XING S Y, LI X, et al. Distribution characteristics and pollution evaluation of nitrogen and organic matter in overlying water and sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(7): 3186-3197 (in Chinese).
- [14] 王圣瑞. 湖泊沉积物—水界面过程-基本理论与常用测定方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
WANG S R. Lake sediment-water interface process-basic theory and common measurement methods [M]. Beijing: Science Press, 2016.

- [15] BAI L L, CAO C C, WANG C H, et al. Toward quantitative understanding of the bioavailability of dissolved organic matter in freshwater lake during cyanobacteria blooming [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(11): 6018-6026.
- [16] 徐康, 刘付程, 安宗胜, 等. 巢湖表层沉积物中磷赋存形态的时空变化 [J]. *环境科学*, 2011, 32(11): 3255-3263.
XU K, LIU F C, AN Z S, et al. Spatial and temporal variations of phosphorus forms in surface sediments of Chaohu Lake [J]. *Environmental Science*, 2011, 32(11): 3255-3263(in Chinese).
- [17] 李芬芳, 黄代中, 连花, 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.
LI F F, HUANG D Z, LIAN H, et al. Distribution characteristics and pollution assessment of nitrogen, phosphorus and organic matter in the surface sediments of Dongting Lake and its lake inlets [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(12): 2307-2313(in Chinese).
- [18] RIBEIRO D C, MARTINS G, NOGUEIRA R, et al. Phosphorus fractionation in volcanic lake sediments (Azores-Portugal) [J]. *Chemosphere*, 2008, 70(7): 1256-1263.
- [19] ANGELER D, SÁNCHEZ-CARRILLO S, GARCÍA G, et al. The influence of *Procambarus clarkii* (Cambaridae, Decapoda) on water quality and sediment characteristics in a Spanish floodplain wetland [J]. *Hydrobiologia*, 2001, 464: 89-98.
- [20] 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(in Chinese).
- [21] MEYERS P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter [J]. *Chemical Geology*, 1994, 114(3/4): 289-302.
- [22] 王妙, 王胜, 唐鹤辉, 等. 粤西三座重要供水水库沉积物营养盐负荷与重金属污染特征 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(5): 834-841.
WANG M, WANG S, TANG Q H, et al. Characteristics of sediment Nutrients loading and heavy metals pollution in three important reservoirs from the west coast of Guangdong Province, South China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(5): 834-841(in Chinese).
- [23] 王亚平, 黄廷林, 周子振, 等. 金盆水库表层沉积物中营养盐分布特征与污染评价 [J]. *环境化学*, 2017, 36(3): 659-665.
WANG Y P, HUANG T L, ZHOU Z Z, et al. Distribution and pollution evaluation of nutrients in surface sediments of Jinpen Reservoir [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(3): 659-665(in Chinese).
- [24] 李慧, 雷沛, 李珣, 等. 天津市北大港湿地沉积物氮磷分布特征及污染评价 [J]. *环境科学学报*, 2021, 41(10): 4086-4096.
LI H, LEI P, LI X, et al. Distribution characteristics and pollution assessment of nitrogen and phosphorus in sediments from Beidagang Wetland in Tianjin City [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(10): 4086-4096(in Chinese).
- [25] 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 P, LU S Y, WANG D W, et al. Nitrogen, phosphorus 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).
- [26] 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 Science*, 1996, 8(4): 319-324(in Chinese).
- [27] LI X, HUANG T L, MA W X, et al. Effects of rainfall patterns on water quality in a stratified reservoir subject to eutrophication: Implications for management [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 521/522: 27-36.
- [28] 魏明蓉, 姜应和, 张华, 等. 南湖表层沉积物中有机质、氮和磷的污染现状与评价 [J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(4): 2004-2005, 2024.
WEI M R, JIANG Y H, ZHANG H, et al. Pollution status and evaluation of organic matter, nitrogen and phosphorus in surface sediment of Nanhu Lake [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(4): 2004-2005, 2024(in Chinese).
- [29] 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(in Chinese).
- [30] 袁和忠, 沈吉, 刘恩峰, 等. 太湖水体及表层沉积物磷空间分布特征及差异性分析 [J]. *环境科学*, 2010, 31(4): 954-960.
YUAN H Z, SHEN J, LIU E F, et al. Space distribution characteristics and diversity analysis of phosphorus from overlying water and surface sediments in Taihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2010, 31(4): 954-960(in Chinese).
- [31] 黄廷林. 水源水库水质污染原位控制与改善是饮用水水质安全保障的首要前提 [J]. *给水排水*, 2017, 53(1): 1-3, 69.
HUANG T L. In situ control and improvement of water quality pollution in water source reservoir is the primary prerequisite for ensuring drinking water quality safety [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 53(1): 1-3, 69(in Chinese).
- [32] 王斌, 黄廷林, 陈凡, 等. 亚热带水库水质特征及沉积物内源污染研究 [J]. *中国环境科学*, 2021, 41(10): 4829-4836.
WANG B, HUANG T L, CHEN F, et al. Water quality characteristics and sediments endogenous pollution of subtropical stratified reservoir [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(10): 4829-4836(in Chinese).
- [33] 王斌, 黄廷林, 李楠, 等. 水源水库沉积物及其上覆水溶解性有机质光谱特征 [J]. *中国环境科学*, 2022, 42(3): 1309-1317.
WANG B, HUANG T L, LI N, et al. Spectral characteristics of dissolved organic matter in sediment and overlying water of water source reservoir [J]. *China Environmental Science*, 2022, 43(3): 1309-1317(in Chinese).