

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.06.016

基于水质综合指数法的亚热带水源型水库水质评价

叶焰中¹, 陈凡², 黄廷林²

(1. 深圳市北部水源工程管理处, 广东 深圳 518110; 2. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为了解亚热带水源型水库——茜坑水库水质状况, 基于2016年1月至2020年12月对水库pH值、高锰酸盐指数、五日生化需氧量、粪大肠菌群、氨氮、硝酸盐氮、总氮、总磷、硫酸盐、氯化物、氟化物、铁和锰等13个主要水质指标每月1次的监测数据, 通过计算水质综合指数评价了水质状况, 并通过多元线性回归优化水质综合指数模型。结果表明: 水库水质整体较好, pH值和高锰酸盐指数受浮游植物繁殖影响, 部分时段超标, 总氮质量浓度偏高, 总磷质量浓度和粪大肠菌群数部分时段较高, 铁质量浓度的上升趋势应重点关注; 表层监测难以全面体现分层对水质的影响, 应增加垂向监测, 全面掌握水库水质风险; 利用由总磷、铁、高锰酸盐指数、氨氮和硝酸盐氮组成的主要污染指标水质综合指数模型可有效进行水质评价和管理。

关键词: 水质评价; 水质综合指数; 污染指标; 水源型水库; 茜坑水库

中图分类号: X824 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2022)06-0116-09

Water quality evaluation of subtropical water source reservoir using water quality index method // YE Yanzhong¹, CHEN Fan², HUANG Tinglin² (1. Shenzhen North Water Source Engineering Administrative Department, Shenzhen 518110, China; 2. School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: To investigate the water quality status of the Xikeng Reservoir, a subtropical water source reservoir, monthly monitoring of the water quality in the reservoir was conducted from January 2016 to December 2020, so as to obtain the changing trends of 13 indicators, including pH value, permanganate index, biochemical oxygen demand for five days, fecal E. coli, ammonia nitrogen, nitrate nitrogen, total nitrogen, total phosphorus, sulfate, chloride, fluoride, iron, and manganese. The water quality index (WQI) was calculated to evaluate the water quality status, and the WQI model was optimized based on multiple linear regression. The results show that the reservoir water quality is generally good, the pH value and permanganate index exceed the standard in some periods due to the influence of phytoplankton reproduction, the mass concentration of total nitrogen is relatively high, the mass concentration of total phosphorus and number of fecal E. coli groups are high in some periods, and the uptrend of iron mass concentration should be paid much attention; it is difficult to fully reflect the impact of stratification on water quality only through surface monitoring, therefore, monitoring along the vertical direction should be used to fully obtain the water quality risk of the reservoir; the WQI model composed of main indicators, including total phosphorus, iron, permanganate index, ammonia nitrogen, and nitrate nitrogen, is an effective tool for water quality assessment and management.

Key words: water quality evaluation; water quality index; pollution indicators; water source reservoir; Xikeng Reservoir

充足优质的水资源是社会经济发展的必要条件之一^[1]。深圳作为粤港澳大湾区重要城市, 改革开放以来人口爆发增加, 经济快速增长, 全市总用水量从2000年的12.27亿m³增加到2019年的20.62亿m³^[2-3]。深圳水资源绝大部分需从境外补

给, 这使得水库成为连接水源和用户之间重要枢纽, 对保障用水安全起到重要作用。同时, 水库作为人工修筑的水利工程, 改变了原有水动力条件和周围环境^[4], 对水质可能产生不利影响, 特别是处于人口高密度区和工业集中区的水源型水库面临水质恶

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD1100101)

作者简介: 叶焰中(1984—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事水库管理研究。E-mail: yeyanzhong@tom.com

通信作者: 黄廷林(1962—), 男, 教授, 博士, 主要从事水质微污染控制与水资源保护研究。E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn

化的严峻挑战。水质评价作为水质管理重要措施之一,具有判别水质类别、识别主要污染因子和解析水质时空变化等作用^[5]。通过现场收集数据了解水体真实情况,进行水质评价,针对性实施水质管理,在国内外水质提升中发挥了重要的作用^[6-8]。

目前水质评价常用的方法主要有单因子评价法、水质综合指数(water quality index, WQI)法、主成分分析法、灰色评价法、神经网络法和层次分析法等。与其他方法相比, WQI 法将各种水质参数整合成一个可以代表整体水质的无量纲数,可以综合反映和评价水环境质量状况,对于水质规律分析和制定环境政策均简单易用^[9]。Silva 等^[5]使用 WQI 评价不同季节流域水质,成功建立了周边土地使用类型和水质的关系; Hou 等^[10]通过 WQI 评价了黄河流域 5 个不同水库水质异同点; Frincu^[11]运用 CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment)-WQI 提高了评价的准确性; de Andrade Costa 等^[12-13]将因子分析、聚类分析等方法与 WQI 结合,在不同湖库和河流水质评价中均取得了良好的效果。近年来,如何利用 WQI 快速得到精确的水质评价结果成为研究热点^[9]。通过数学方法识别关键水质参数,建立主要污染指标水质综合指数(WQI_{min})模型,使得在水质评价过程中降低水质检测成本,减少化学试剂对环境的污染成为可能。研究表明, WQI_{min} 与 WQI 呈现出高度线性相关,能较好地反映 WQI 变化,在南水北调工程、太湖、巢湖水环境评价中均通过运用 WQI_{min} 模型提高了水质评价的便捷性和准确度^[14-16]。WQI_{min} 模型实际运用过程中参数和权重的选择是其准确性的决定因素,需结合实际情况进行分析与评估。

深圳市茜坑水库担负向深圳西北地区 400 多万人供水的任务,近年来局部水华偶有发生,影响供水安全。杨滢等^[17-18]对茜坑水库浮游植物和动物等水生生态现状及相关问题进行了研究,但对于茜坑水库水质指标现状的详细报道较少。为此,本文采集 2016—2020 年主要水质指标数据,分析茜坑水库水质变化规律,采用 WQI 综合评价水库水质状况,以期对粤港澳大湾区调水型水源水库水环境评价提供参考。

1 茜坑水库概况

茜坑水库位于深圳市龙华区福城街道,是北部水源工程的转输调蓄水库,作为龙华区主要供水源负责向片区内多个自来水厂供水。水库总库容 1 980 万 m³,设计洪水位 75.2 m,死水位 55.3 m,死库容 36 万 m³,水面面积 1.6 km²,水库集雨面积

4.43 km²,年平均降水量 1 918.6 mm。茜坑水库水源来自东深干渠供应的东江水,无入库支流,日均进出水量基本平衡,保持在 32 万 m³/d。水库水位保持在 72~73 m,水库平均换水周期约为 46 d。深圳位于典型亚热带气候区,全年气温较高,光照充足,季节性变化不如温带地区显著,汛期降水充沛,非汛期降水稀少^[19],这些特征成为影响亚热带水源型水库水质变化的重要因素。

2 数据采集和研究方法

2.1 数据采集和检测

选取水库坝前取水口(S1)和水库库中(S2)两个典型点位(图1)采样,时间为2016年1月至2020年12月,每月初按照 HJ 494—2009《水质采样技术指导》采集表层水(水深 0.5 m)样品。采样时间选择非阴雨天气,避免降水扰动对水质造成影响。由于水库实行封闭管理且保护区内无农业面源污染和工业污染,根据 GB 2323—2002《地表水环境质量标准》,选取 pH 值、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、氨氮(NH₃-N)、硝酸盐氮(NO₃-N)、总氮(TN)、总磷(TP)、五日生化需氧量(BOD₅)、硫酸盐(SO₄²⁻)、氯化物(Cl⁻)、氟化物(F⁻)、粪大肠菌群(F. coli)、铁(Fe)、锰(Mn)等 13 个水质指标进行分析。茜坑水库为集中式生活饮用水地表水源地一级保护区,故参照Ⅱ类水评价,检测方法及其指标限值参考 HJ 91.2—2022《地表水环境监测技术规范》。

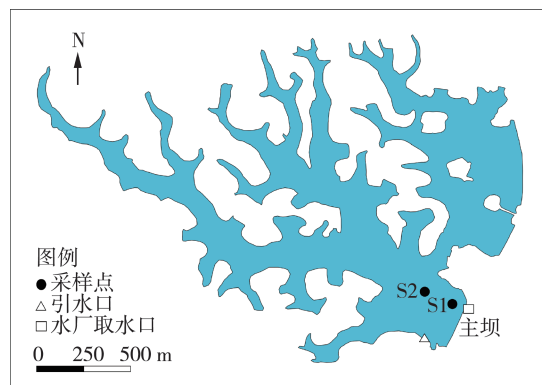


图1 茜坑水库及采样点

Fig.1 Schematic diagram of sampling points in Xikeng Reservoir

2.2 研究方法

WQI 计算公式^[20]为

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

式中: I 为 WQI 值; n 为水质指标总数; C_i 为各指标的归一化数值; w_i 为各指标的权重,根据不同指标对水质影响程度确定,影响程度最小的指标权重为

1,影响程度最大的指标权重为4。结合茜坑水库背景及历史水质情况和文献[18],取pH值、COD_{Mn}、NH₃-N、NO₃-N、TN、TP、BOD₅、SO₄²⁻、Cl⁻、F⁻、F. coli、Fe和Mn指标的权重分别为1、3、3、2、2、4、3、2、1、2、3、3和3。根据WQI值将水质状况分为优(>80~100)、好(>60~80)、良(>40~60)、中(>20~40)、差(0~20)5个等级。

WQI_{min}计算方法分为两种,考虑权重采用式(1)的形式,不考虑权重的计算式如下:

I_min = 1/n' * sum(C_i) (2)

式中:I_{min}为WQI_{min}值;n'为主要水质指标的数量。WQI_{min}模型拟合选择多元线性回归分析,选取2016—2019年数据为训练集,2020年数据为检验集。通过确定性系数R²和显著性水平p对WQI_{min}模型进行评价,误差分析采用均方根误差(RMSE)和百分比误差(PE)^[14]。

由于监测结果未能全部满足正态分布,选用Kruskal-Wallis秩检验对不同点位及日期数据差异性进行检验,相关性分析采用Spearman系数法,Mann-Kendall(M-K)检验用于检验各参数的变化趋势。对S1和S2点所有指标进行逐月配对Kruskal-

Wallis秩检验,结果显示无显著差异,故后续分析中取S1和S2点指标的平均值评价水库水质。本研究通过计算各指标的M-K检验统计量(z)对其变化趋势进行判断^[21],若z>0则表示增大,z<0则表示减小,p<0.05表示结果具有显著性。

3 水质评价结果和因素分析

3.1 水质变化特征

表1统计了水库13个水质指标的基本特征及变化情况,根据深圳气候特点、水库水深,并参考相关研究^[22]可知,水库混合期为每年10月到次年2月,分层期为每年3—9月。变化显著的6个指标时间变化趋势如图2和图3所示。

由表1、图2和图3可知,水体长期处于碱性状态,分层期pH均值显著大于混合期,部分月份pH值超过地表水质标准限值9,M-K趋势检验表明其无显著变化。COD_{Mn}和BOD₅均可表征水体有机物污染综合状态。2016—2020年COD_{Mn}质量浓度的M-K趋势检验表现出显著减小的趋势(z=-2.01,p<0.05),大部分月份水体COD_{Mn}质量浓度均处于较低水平,分层期COD_{Mn}质量浓度显著高于混合期。BOD₅质量浓度均值为(2.40±1.19)mg/L,分层期

表1 水质指标基本特征

Table 1 Basic characteristics of water quality indicators

阶段	统计量	pH 值	ρ(COD _{Mn})/(mg·L ⁻¹)	ρ(NH ₃ -N)/(mg·L ⁻¹)	ρ(NO ₃ -N)/(mg·L ⁻¹)	ρ(TN)/(mg·L ⁻¹)	ρ(TP)/(mg·L ⁻¹)	ρ(BOD ₅)/(mg·L ⁻¹)
全年	均值	8.51	2.49	0.06	1.05	1.56	0.023	2.40
	标准差	0.84	1.10	0.06	0.37	0.43	0.013	1.19
	最大值	9.98	6.91	0.44	1.90	2.84	0.060	4.95
	最小值	7.14	1.30	0.02	0.25	0.63	0.010	1.00
分层期	均值	8.96	2.92	0.06	0.92	1.45	0.022	2.65
	标准差	0.67	1.25	0.07	0.38	0.48	0.014	1.18
	最大值	9.98	6.91	0.44	1.70	2.84	0.060	4.65
	最小值	7.52	1.32	0.02	0.25	0.63	0.010	1.00
混合期	均值	7.85	1.93	0.06	1.23	1.71	0.024	2.09
	标准差	0.61	0.42	0.04	0.29	0.32	0.010	1.25
	最大值	9.35	3.05	0.16	1.9	2.34	0.044	4.95
	最小值	7.14	1.30	0.02	0.56	0.93	0.010	1.15
阶段	统计量	ρ(SO ₄ ²⁻)/(mg·L ⁻¹)	ρ(Cl ⁻)/(mg·L ⁻¹)	ρ(F ⁻)/(mg·L ⁻¹)	F. coli 数/(个·L ⁻¹)	ρ(Fe)/(mg·L ⁻¹)	ρ(Mn)/(mg·L ⁻¹)	
全年	均值	11.24	8.99	0.22	2003	0.10	0.01	
	标准差	1.75	1.82	0.04	3302	0.06	0.01	
	最大值	14.10	11.30	0.35	16000	0.25	0.07	
	最小值	6.72	4.28	0.16	200	0.01	0.01	
分层期	均值	11.17	8.78	0.22	2494	0.09	0.01	
	标准差	2.13	2.16	0.05	4331	0.04	0	
	最大值	14.10	11.30	0.35	16000	0.16	0.03	
	最小值	6.72	4.28	0.16	200	0.01	0.01	
混合期	均值	11.34	9.25	0.21	1350	0.12	0.01	
	标准差	1.25	1.36	0.02	790	0.07	0.01	
	最大值	12.90	10.60	0.24	2550	0.25	0.07	
	最小值	8.81	6.31	0.17	261	0.02	0.01	

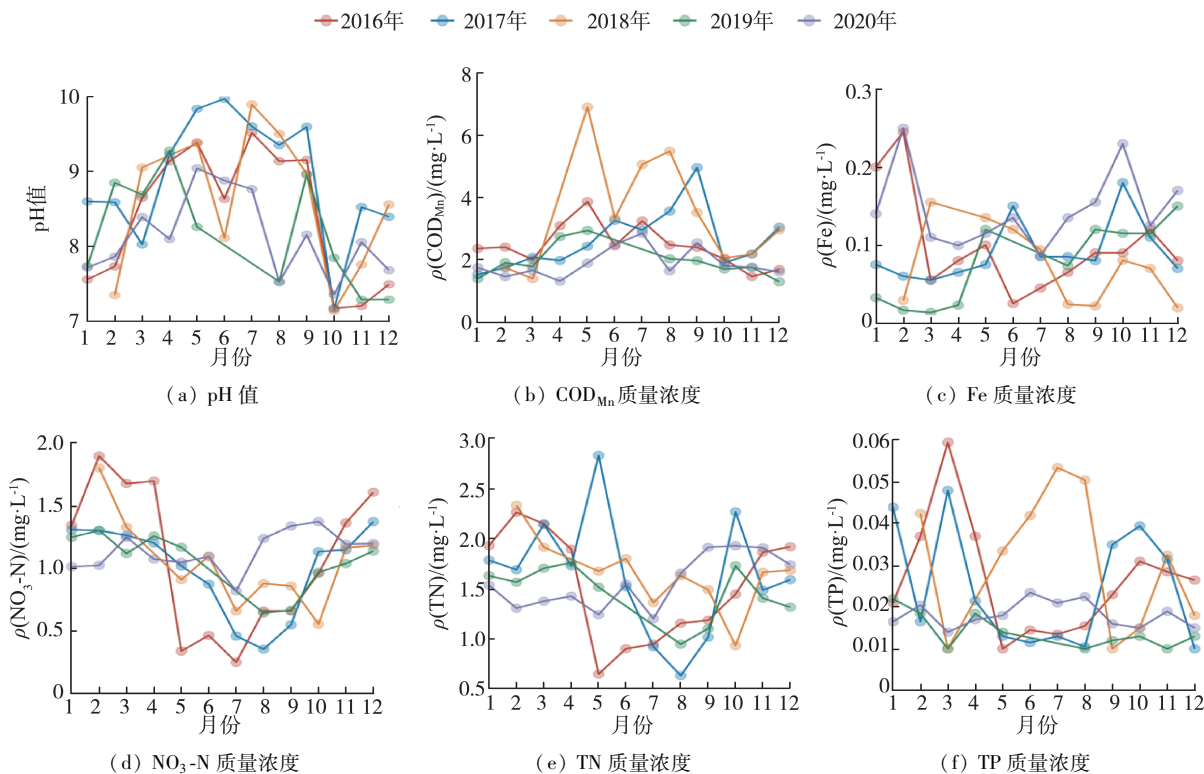


图2 水质指标逐月变化

Fig. 2 Monthly changes of water quality indicators

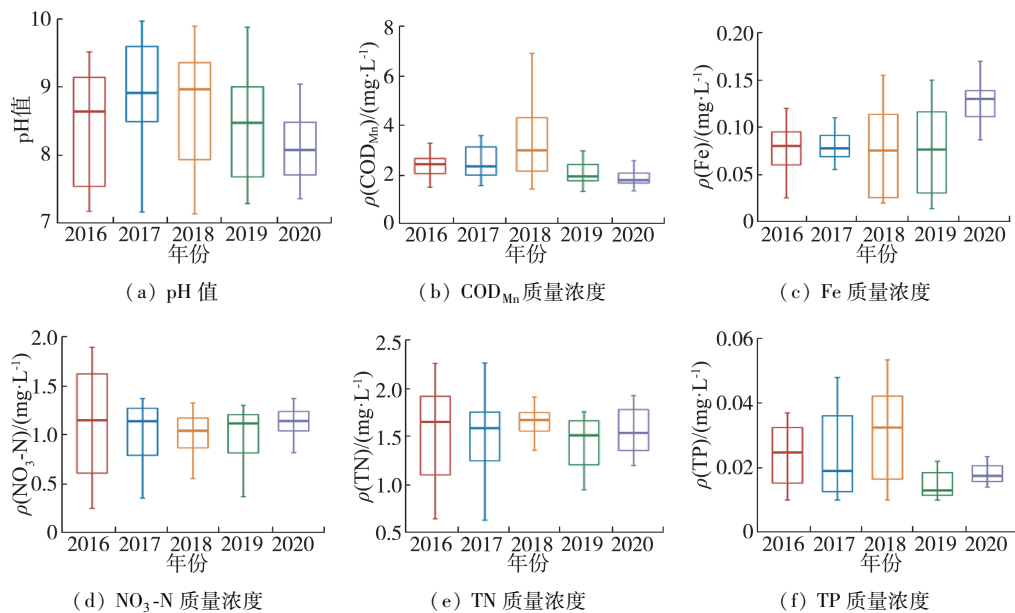


图3 水质指标年际变化

Fig. 3 Annual changes of water quality indicators

和混合期无显著差异。

一般来说,水库 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度较低^[23],研究期间水库 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度均满足地表水Ⅱ类标准,分层期和混合期无显著差异,大部分月份 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度均处于较低水平。TN 主要来源于 $\text{NO}_3\text{-N}$,两者具有类似的浓度变化规律。大部分月份 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 TN 质量浓度均高于地表水Ⅱ类标准,控氮是茜坑水库主要任务之一。此外,M-K 趋势检验显示

$\text{NO}_3\text{-N}$ 和 TN 质量浓度均无显著变化,但两者分层期质量浓度显著低于混合期,可能原因是混合初期底层大量氮素进入中上层水体且分层期藻类摄取表层氮素。研究期间大部分月份 TP 质量浓度较低且变化趋势不明显,分层期和混合期 TP 质量浓度无显著差异。总体上,由于水体中 TP 质量浓度较低,N/P 比远大于 16,与大部分水库类似,茜坑水库也是磷限制水体^[24]。

研究期间 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 F^- 质量浓度均满足地表水 I 类标准且变化幅度较小,分层期和混合期无显著差异,但 SO_4^{2-} ($z = 3.53, p < 0.01$)、 Cl^- ($z = 3.89, p < 0.01$) 质量浓度呈极显著的增加趋势。 F. coli 数无显著变化趋势,大部分月份数值较高,2020 年 9 月出现最大值 1.6 万个/L,说明处于高度城市化的珠三角流域,水体较易受到人类活动影响。 Fe 和 Mn 质量浓度分层期和混合期均无显著差异, Mn 质量浓度在检测限附近浮动,远小于地表水质标准阈值; Fe 质量浓度混合期存在部分较大值,分层期均较小,两者在统计学上无显著差异,说明来水偶然变化造成铁质量浓度升高。M-K 趋势检验表明, Fe 质量浓度存在显著增加趋势 ($z = 1.84, p < 0.05$), Mn 质量浓度变化趋势不显著。2020 年 Fe 质量浓度远大于其他年份,与趋势分析结果相符。

3.2 基于 WQI 水质评价

图 4 展示了 2016—2020 年分层期和混合期 WQI 值变化情况。从数值上来看,监测期间 WQI 值均位于 61~80 之间,水质状况好,分层期和混合期 WQI 值无显著差异,说明监测期间水库表层水体质量总体上较好且受水体分层影响较小。2016 年夏季和 2018 年秋季至 2020 年夏季水质好于其他时段,但在部分时段 WQI 也出现异常值或变化幅度较大的情况,表明由于水库自净能力有限,偶发引水污染对水库水质有明显的影响。M-K 趋势检验显示,WQI 在研究期间逐渐增大 ($z = 1.89, p = 0.06$),

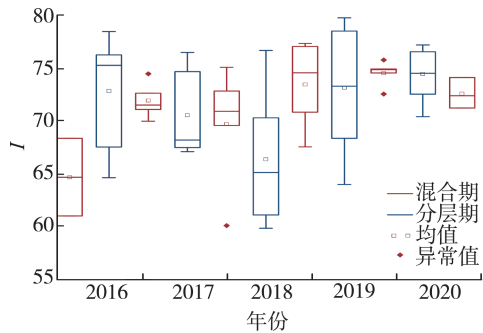


图 4 WQI 变化趋势
Fig. 4 Change trend of WQI

p 值接近 0.05 的显著性水平,说明水库水质呈现整体向好的趋势。

3.3 水质现状及其驱动因素分析

总体来说,茜坑水库在研究期间水质稳定,水质状况好,说明其水质基本满足城市供水需求。茜坑水库始建于 1992 年,初期水库收纳周边大量面源和点源污染,水质曾经面临严重问题,多次爆发严重“水华”,水质近几年保持基本稳定与水库采取多种治理措施密切相关。一方面,优化水源调度阻断直接外源输入,通过密切监测来水水质,灵活调控进水量。另一方面,水库自身多种措施并行,改善了水体自净能力,例如,采取多进水、多出水,加快水体交换,改善水库水力条件;投放白鲢鱼、鳙鱼进行生物防治,一定程度上控制浮游植物生长;严格实施隔离围网项目,全面加强水源保护等。

从单项指标来看,只有 pH 值和 TN 质量浓度部分月份超过限值,其他指标均符合要求。选择对 WQI 值贡献较大的水质指标进行相关性分析(表 2),pH 值变化与 COD_{Mn} 质量浓度呈显著正相关,说明两者变化主要原因是浮游植物的生长,浮游植物光合作用不仅可以升高水体 pH 值,还能使得 COD_{Mn} 质量浓度增加^[25-26]。但 COD_{Mn} 质量浓度仅在部分月份出现异常值,且呈现显著下降趋势,说明虽然水库浮游植物在部分月份出现过量繁殖,但出现次数和数量峰值均呈现下降趋势。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 TN 质量浓度变化与 pH 值和 COD_{Mn} 质量浓度均呈显著负相关,说明两者减少主要是由于浮游植物大量摄取造成。作为浮游植物生长必需的营养物质, $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 质量浓度并未表现出显著相关性,主要原因是两者浓度均较小,变化对水体影响不大。水库 TN 质量浓度过高作为全球性问题^[27],同样在茜坑水库体现,部分月份 TN 质量浓度甚至超过 V 类水标准。作为河流引水型水库,由于《地表水环境质量标准》仅规定湖库总氮限值,造成河流来水 TN 质量浓度较高,加剧了这一现象,因此控制 TN 浓度是茜坑水库长久性难题。 SO_4^{2-} 和 Cl^- 质量浓度虽然显示出显

表 2 主要指标相关性分析
Table 2 Correlation analysis of main indicators

指标	pH 值	COD_{Mn}	$\text{NH}_3\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	TN	TP	Fe	Mn
pH 值	1							
COD_{Mn}	0.680 **	1						
$\text{NH}_3\text{-N}$	-0.006	-0.110	1					
$\text{NO}_3\text{-N}$	-0.460 **	-0.460 **	0.120	1				
TN	-0.350 **	-0.350 **	0.220	0.760 **	1			
TP	-0.007	0.047	0.029	0.330 *	0.280 *	1		
Fe	-0.290 *	-0.190	0.066	0.085	0.065	-0.045	1	
Mn	-0.180	0.110	0.320 *	-0.049	0.070	0.055	0.140	1

注: * 表示 $p < 0.05$, ** 表示 $p < 0.01$ 。

著增长趋势,但由于其值很小,不会对水体造成明显影响。Fe 和 Mn 质量浓度在水库中均处于较低水平,说明东江近年环境污染整治效果明显,未出现明显 Fe 和 Mn 污染,但 2020 年部分月份 Fe 质量浓度接近地表水限值且呈现出显著增长趋势。有研究表明,Fe 是蓝藻暴发重要诱因之一^[28],相关性分析表明,Fe 质量浓度与 pH 值变化呈显著负相关,说明其浓度变化与浮游植物异常生长密切相关,因此,需警惕 Fe 增加带来的水质风险。最后,F. coli 数在部分夏季突然增加,说明汛期东江来水可能受到周围居民生活污水污染^[29]。车蕊等^[30]研究也表明,汛期东江来水可能对供水造成不利影响,茜坑水库由于引水塔和供水口距离较近,供水更易受来水直接影响,应警惕由此给供水带来的威胁。

3.4 分层对水质的影响

水库修建与运行过程中,在气象、水动力、地貌及水质等因素影响下,可能造成水体热分层。稳定的热分层可以阻碍上下层水体的物质交换,甚至在水体底部形成厌氧区,对水体性质及水生态环境产生重大影响^[31]。特别在深水型湖库中水温分层的温差大、持续时间长,一方面在分层期造成沉积物中 N、P、Fe、Mn 和有机物等明显释放,另一方面从分层期进入混合期会引发水库“翻库”现象,大量污染物进入上层水体,严重影响水质。

对于茜坑水库,从表层水质指标来看,pH 值和 COD_{Mn}质量浓度在分层期显著大于混合期,这说明水体分层的相对静止环境是浮游植物大量繁殖的原因之一。“翻库”引起混合期 NO₃-N 和 TN 质量浓度显著大于分层期也反映了分层影响。其他指标(例如 TP 和 Fe)每年分层期与混合期质量浓度存在差异,并未体现出明显规律。WQI 在分层期和混合期同样未出现显著差异,但部分时段个别指标骤然升高,可能原因是茜坑水库平均水深约 15 m,水深较浅且易受风浪影响,大部分区域底层难以形成稳定

分层,持续厌氧造成污染物释放状态难以稳定维持。水库沉积物释放试验结果也表明,内源释放仅是茜坑水库水质的影响因素之一^[32],而引水是调水型水库主要特征,引水一方面可能带来污染负荷,另一面对水体起到去分层及充氧效果,有利于水质改善^[33]。因此,仅表层监测难以全面体现分层对水质的影响,后期应增加对水体垂向特别是底层的水质监测,警惕分层引起的水质风险。

4 WQI_{min}模型指标确定和不确定性分析

4.1 WQI_{min}模型指标确定和验证

利用 Shapiro-Wilk 法对训练数据集(2016—2019 年)WQI 值进行检验,结果表明,WQI 值呈显著正态分布,适合进行回归分析。对训练数据集所有指标进行逐步多元线性回归,结果如表 3 所示。TP 对训练数据集 WQI 值贡献最大($R^2=0.418$, $p<0.001$),随着 Fe、COD_{Mn}和 NH₃-N 的加入, R^2 分别提高了 0.206、0.136、0.087,最终达到 0.847。进一步增加 NO₃-N、Mn 和 TN 只略微提高了 R^2 ,且此后拟合模型常数与 WQI 不存在显著相关性。因此,选择 TP、Fe、COD_{Mn}和 NH₃-N 作为 WQI_{min}模型基本指标,考虑 NO₃-N 和 Mn 作为可能补充。

通过训练数据集对选定的 WQI_{min}模型进行评价,结果如表 4 所示。4 种模型中,考虑权重组所有结果均优于未考虑权重组,说明考虑权重有利于得到准确的 WQI 值。而指标增加对于 R^2 和 RMSE 的提升作用微小,且模型增加指标 Mn 后 PE 值大大增加,增大了模型误差。从图 5(下标 a、b 分别表示未考虑权重和考虑权重模型,下标数字表示模型序号)可以看出,WQI_{min-b2}和 WQI_{min-b3}模型均值与原始 WQI 均值最为接近,且无显著差异。综上,选择 WQI_{min-b2}模型作为预测模型最为合适。

使用 2020 年逐月数据对得到的 WQI_{min}模型进行验证,结果如图 6 所示。WQI_{min}与 WQI 呈现显著

表 3 逐步多元线性回归结果
Table 3 Stepwise multiple linear regression results

序号	回归模型	R^2	R^2 变化量	p
1	$I = 55.25 * + 0.062\rho(TP) *$	0.418		<0.001
2	$I = 45.73 * + 0.060\rho(TP) * + 0.046\rho(Fe) *$	0.624	0.206	<0.001
3	$I = 37.72 * + 0.056\rho(TP) * + 0.047\rho(Fe) * + 0.041\rho(COD_{Mn}) *$	0.760	0.136	<0.001
4	$I = 13.42 * + 0.057\rho(TP) * + 0.044\rho(Fe) * + 0.046\rho(COD_{Mn}) * + 0.085\rho(NH_3-N) *$	0.847	0.087	<0.001
5	$I = 5.35 + 0.057\rho(TP) * + 0.044\rho(Fe) * + 0.048\rho(COD_{Mn}) * + 0.089\rho(NH_3-N) * + 0.043\rho(NO_3-N) *$	0.885	0.038	<0.001
6	$I = 1.89 + 0.057\rho(TP) * + 0.043\rho(Fe) * + 0.048\rho(COD_{Mn}) * + 0.074\rho(NH_3-N) * + 0.044\rho(NO_3-N) * + 0.029\rho(Mn)$	0.907	0.022	<0.001
7	$I = 1.59 + 0.047\rho(TP) * + 0.040\rho(Fe) * + 0.058\rho(COD_{Mn}) * + 0.060\rho(NH_3-N) * + 0.050\rho(NO_3-N) * + 0.040\rho(Mn) + 0.034\rho(TN)$	0.937	0.030	<0.001

注: * 表示拟合常数存在显著相关性, $p<0.05$ 。

表4 WQI_{min}模型评价结果
Table 4 WQI_{min} model evaluation results

模型 序号	指标	未考虑权重				考虑权重			
		R^2	RMSE	PE/%	p	R^2	RMSE	PE/%	p
1	TP、Fe、COD _{Mn} 、NH ₃ -N	0.79	3.20	6.5	<0.01	0.82	3.02	5.5	<0.01
2	TP、Fe、COD _{Mn} 、NH ₃ -N、NO ₃ -N	0.80	2.68	6.3	<0.01	0.85	2.40	5.2	<0.01
3	TP、Fe、COD _{Mn} 、NH ₃ -N、Mn	0.80	2.67	9.3	<0.01	0.84	2.46	8.1	<0.01
4	TP、Fe、COD _{Mn} 、NH ₃ -N、NO ₃ -N、Mn	0.83	2.20	9.0	<0.01	0.88	1.90	8.0	<0.01

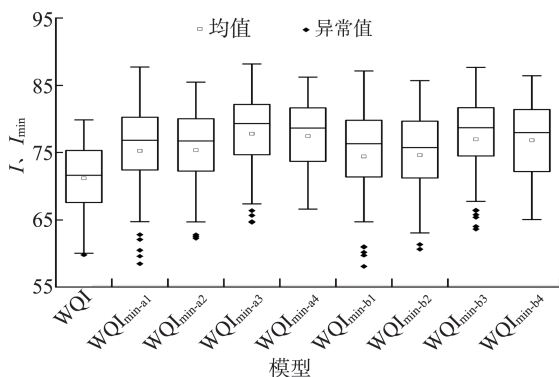


图5 WQI与WQI_{min}均值比较

Fig. 5 Comparison of averages of WQI and WQI_{min}

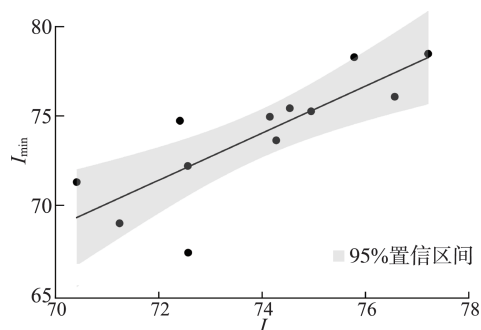


图6 WQI与WQI_{min}拟合结果

Fig. 6 Fitting results of WQI and WQI_{min}

相关性($R^2 = 0.66, p < 0.05$), 且 RMSE 为 2.09, PE 为 2.0%, 说明该模型具有良好的预测性能。

4.2 WQI_{min}模型不确定性分析

一般来说, WQI_{min} 模型指标选择应该符合能代表大部分环境特征和易于分析测量的基本要求。选择 TP、Fe、COD_{Mn}、NH₃-N 和 NO₃-N 共 5 个指标作为 WQI_{min} 模型组成, 不仅能够很好反映茜坑水库水质状况, 还有利于简化 WQI 计算和降低监测成本。TP 作为第 1 个选择指标, 对水质变化影响最大, 这与水库常年较低的 TP 质量浓度和较高的 N/P 比有关。Fe 作为第 2 个指标, 是对人体健康构成潜在风险的金属元素, 对于水库而言, 过高的 Fe 质量浓度会引起水库多种水质风险, 同时增加水厂后续处理成本等^[34]。COD_{Mn} 作为有机物综合指标是模型的第 3 个指标, 能够反映水体浮游植物的变化情况。NH₃-N 和 NO₃-N 作为最后两个指标能够反映氮素在水

库中的变化, 水库 NH₃-N 大部分来源于外源输入, 其自身含量通常处于较低水平, NH₃-N 质量浓度发生变化说明出现明显外源污染输入; NO₃-N 作为除 NH₃-N 外最易被水体生物利用的氮素, 其质量浓度变化情况可以反映水库氮素与水体生物的相互作用。从表 1 可以看出, 茜坑水库 NO₃-N 质量浓度均值为 TN 的 67%, NO₃-N 质量浓度变化能够较好地反映水体氮素变化情况, 且相比于 TN, NO₃-N 分析方法简便且成本更低, 更适合日常监测。总之, 这 5 种指标能够较好地反映水库主要水质特征及风险, 且分析方法较为成熟和便利。

在模型运用过程中权重和归一化因子的引入都提高了模型的准确性。最初的 WQI 计算过程仅对各种指标进行归一化处理以避免不同单位带来的误差。Wu 等^[35] 在研究中考虑不同指标权重, 进一步优化了 WQI 计算, 取得了较好的效果。同样, 本研究中对是否考虑权重进行了对比, 引入权重后 WQI_{min} 模型能够更好地解释水质变化, 精度和准确性均有不同程度提高。权重的选取大部分基于参考文献或研究人员的经验, 在一定程度上依赖个人主观判断^[36]。随着基本监测数据和研究人员工作经验的积累, 应根据水库实际情况, 适时灵活调整权重值以获取准确的计算结果。

5 结 论

a. 水库整体水质较好, 满足饮用水源要求。单项指标 pH 值和 COD_{Mn} 受浮游植物繁殖影响, 部分时段超标, TN 质量浓度偏高应引起注意, TP 质量浓度和 F. coli 数部分时段较高, Fe 质量浓度上升趋势应予以重点关注, 其他指标均处于较低水平。

b. 表层监测难以全面体现分层对水质影响。目前水库水质监测采取每月 1 次表层采样, 大部分指标变化幅度很小, 引水对供水直接影响程度和分层对水库潜在污染水平尚需明确。为全面掌握水库水质变化规律, 应实施垂向分层采样, 掌握水库主要污染来源, 准确把握水质风险。

c. 引入权重后的 WQI_{min} 模型由 TP、Fe、COD_{Mn}、NH₃-N 和 NO₃-N 5 个指标组成, 能够反映水库主要

水质特征及风险,且易于检测,有利于降低水库水质评价成本,提升评价效率。

参考文献:

- [1] 黄锋华,黄本胜,洪昌红,等. 粤港澳大湾区水资源空间均衡性分析[J]. 水资源保护,2022,38(3):65-71. (HUANG Fenghua, HUANG Bensheng, HONG Changhong, et al. Analysis of water resources spatial equilibrium in Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area[J]. Water Resources Protection,2022,38(3):65-71. (in Chinese))
- [2] 深圳市气象局. 2019 年深圳市气候公报[EB/OL]. (2020-02-13)[2021-05-14]. <http://weather.sz.gov.cn/qixiangfuwu/qihoufuwu/qihouguanceyupinggu/nianduqihougongbao/>.
- [3] 曹士圯,胡庆芳,蒋思佳,等. 1995—2016 年深圳市用水量变化与节水潜力分析[J]. 水资源保护,2019,35(6):76-81. (CAO Shiyi, HU Qingfang, JIANG Sijia, et al. Analysis of water consumption change from 1995 to 2016 and water saving potential in Shenzhen City[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6):76-81. (in Chinese))
- [4] 姚嘉伟,刘晓波,董飞. 水库分层的水环境响应特征及其缓解技术方案的研究进展[J]. 中国农村水利水电,2020(8):13-19. (YAO Jiawei, LIU Xiaobo, DONG Fei. Research progress water environment response characteristics of the stratified reservoirs and its mitigation technology schemes [J]. China Rural Water and Hydropower,2020(8):13-19. (in Chinese))
- [5] SILVA R F C M, DE ALMEIDA T, CICERELLI R E, et al. A spatiotemporal analysis of the physicochemical parameters after the operation of the Corumbá IV Reservoir (Midwest Brazil) to support better management decision[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2021,193(5):247.
- [6] TIAN Yulu, JIANG Yuan, LIU Qi, et al. Using a water quality index to assess the water quality of the upper and middle streams of the Luanhe River, northern China[J]. Science of the Total Environment,2019,667:142-151.
- [7] SOARES A L C, PINTO C C, CORDOVA J E, et al. Water quality assessment of a multiple-use reservoir in southeastern Brazil; case study of the Vargem das Flores Reservoir[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(5):210.
- [8] ZHE Li, MA Jianrong, GUO Jinsong, et al. Water quality trends in the Three Gorges Reservoir region before and after impoundment (1992-2016) [J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2019, 19(3):317-327.
- [9] DASH S, KALAMDHAD A S. Science mapping approach to critical reviewing of published literature on water quality

- indexing[J]. Ecological Indicators,2021,128:107862.
- [10] HOU Wei, SUN Shaohua, WANG Mingquan, et al. Assessing water quality of five typical reservoirs in lower reaches of Yellow River, China; using a water quality index method[J]. Ecological Indicators,2016,61:309-316.
- [11] FRÎNCU R M. Long-term trends in water quality indices in the lower Danube and tributaries in Romania (1996-2017) [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2021,18(4):1665.
- [12] DE ANDRADE COSTA D, DE AZEVEDO J P S, DOS SANTOS M A, et al. Water quality assessment based on multivariate statistics and water quality index of a strategic river in the Brazilian Atlantic Forest [J]. Scientific Reports,2020,10(1):22038.
- [13] SAHA A, RAMYA V L, JESNA P K, et al. Evaluation of spatio-temporal changes in surface water quality and their suitability for designated uses, Mettur Reservoir, India [J]. Natural Resources Research, 2021, 30(2):1367-1394.
- [14] NONG Xizhi, SHAO Dongguo, ZHONG Hua, et al. Evaluation of water quality in the South-to-North Water Diversion Project of China using the water quality index (WQI) method[J]. Water Research,2020,178:115781.
- [15] WU Zhaoshi, WANG Xiaolong, CHEN Yuwei, et al. Assessing river water quality using water quality index in Lake Taihu Basin, China [J]. Science of the Total Environment,2018,612:914-922.
- [16] WU Zhaoshi, LAI Xijun, LI Kuanyi, Water quality assessment of rivers in Lake Chaohu Basin (China) using water quality index [J]. Ecological Indicators, 2021, 121:107021.
- [17] 杨滢,王艳,黄文辉,等. 深圳某水库水华藻类及相关环境因子逐步回归统计分析[J]. 水资源研究,2016,5(1):33-39. (YANG Ying, WANG Yan, HUANG Wenhui, et al. Statistical regression analysis of water-bloom algae and related environment factors of a reservoir in Shenzhen City[J]. Journal of Water Resources Research, 2016, 5(1):33-39. (in Chinese))
- [18] 陈丽光,林秋奇,韩博平. 茜坑水库轮虫群落结构组成和动态[J]. 水生态学杂志,2013,34(6):27-33. (CHEN Liguang, LIN Qiuqi, HAN Boping. Dynamics and community structure of rotifers in Xikeng Reservoir, South China[J]. Journal of Hydroecology, 2013, 34(6):27-33. (in Chinese))
- [19] 梁志宏,陈秀洪,罗欢,等. 深圳湾水质时空分布特征及污染源解析[J]. 水资源保护,2020,36(4):93-99. (LIANG Zhihong, CHEN Xiuhong, LUO Huan, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of water quality in Shenzhen Bay and pollution source analysis[J]. Water Resources Protection,2020,36(4):93-99. (in Chinese))
- [20] FLORES J C. Comments to the use of water quality indices

- p>to verify the impact of Córdoba City (Argentina) on Suqía River[J]. Water Research,2002,36(18):4664-4666.
- [21] 曾庆慧,秦丽欢,程鹏,等. 1990 年以来北京密云水库主要水环境因子时空分布特征[J]. 湖泊科学,2016,28(6):1204-1216. (ZENG Qinghui, QIN Lihuan, CHENG Peng, et al. Spatial and temporal distribution of main aquatic environment factors in Miyun Reservoir, Beijing since 1990s[J]. Journal of Lake Sciences,2016,28(6):1204-1216. (in Chinese))
- [22] 黄享辉. 深圳市调水型供水水库浮游植物群落的结构与演替特征研究[D]. 广州:暨南大学,2013.
- [23] KALFF J. 湖泊学:内陆水生态系统[M]. 古滨河,刘正文,李宽意,等译. 北京:高等教育出版社,2011.
- [24] 张春梅,朱宇轩,宋高飞,等. 南水北调中线干渠浮游植物群落时空格局及其决定因子[J]. 湖泊科学,2021,33(3):675-686. (ZHANG Chunmei, ZHU Yuxuan, SONG Gaofei, et al. Spatiotemporal pattern of phytoplankton community structure and its determining factors in the channel of the middle route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Journal of Lake Sciences,2021,33(3):675-686. (in Chinese))
- [25] ROSTOM N G, SHALABY A A, ISSA Y M, et al. Evaluation of Mariut Lake water quality using hyperspectral remote sensing and laboratory works[J]. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science,2017,20 (Sup1):39-48.
- [26] 李蓓,李勇涛,蔡梅. 基于数据挖掘的太湖蓝藻生长水环境关键因子研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020,48(6):506-513. (LI Bei, LI Yongtao, CAI Mei. Research on key factors of water environment for cyanobacteria growth in Taihu Lake based on data mining [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020,48(6):506-513. (in Chinese))
- [27] 季鹏飞,许海,詹旭,等. 长江中下游湖泊水体氮磷比时空变化特征及其影响因素[J]. 环境科学,2020,41(9):4030-4041. (JI Pengfei, XU Hai, ZHAN Xu, et al. Spatial-temporal variations and driving of nitrogen and phosphorus ratios in lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River [J]. Environmental Science, 2020, 41(9):4030-4041. (in Chinese))
- [28] MOLOT L A, SCHIFF S L, VENKITESWARAN J J, et al. Low sediment redox promotes cyanobacteria blooms across a trophic range: implications for management [J]. Lake and Reservoir Management,2021,37(2):1-33.
- [29] SUN Wei, XIA Chunyu, XU Meiyang, et al. Application of modified water quality indices as indicators to assess the spatial and temporal trends of water quality in the Dongjiang River [J]. Ecological Indicators, 2016, 66: 306-312.
- [30] 车蕊,林澍,范中亚,等. 连续极端降雨对东江流域水质影响分析[J]. 环境科学,2019,40(10):4440-4449. (CHE Rui, LIN Shu, FAN Zhongya, et al. Effects of continuous extreme rainfall on water quality of the Dongjiang River Basin[J]. Environmental Science,2019,40(10):4440-4449. (in Chinese))
- [31] 李红,高增文,秦志新,等. 分层小水库沉积物-水界面热交换时空变化特征[J]. 水资源保护,2019,35(1):63-69. (LI Hong, GAO Zengwen, QIN Zhixin, et al. Temporal and spatial characteristics of heat exchange at sediment-water interface in a small stratified reservoir[J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (1): 63-69. (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 Bin, HUANG Tinglin, CHEN Fan, 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] 张晨,宋迪迪,廉铁辉. 引水结构变化对天津于桥水库磷滞留的影响分析与生态水量估算[J]. 湖泊科学,2020,32(2):370-379. (ZHANG Chen, SONG Didi, LIAN Tiehui. The influences of the water diversion structure change on total phosphorus retention and implication for ecological flows in Yuqiao Reservoir, Tianjin [J]. Journal of Lake Sciences,2020,32(2):370-379. (in Chinese))
- [34] 史建超. 分层型水源水库水质变化特征与水质原位改善技术研究[D]. 西安:西安建筑科技大学. 2016.
- [35] WU Tao, WANG Shengrui, SU Baolin, et al. Understanding the water quality change of the Yilong Lake based on comprehensive assessment methods [J]. Ecological Indicators,2021,126:107714.
- [36] NOORI R, BERNDTSSON R, HOSSEINZADEH M, et al. A critical review on the application of the national sanitation foundation water quality index [J]. Environmental Pollution,2019,244:575-587.

(收稿日期:2021-07-22 编辑:施业)

