

方佳卉,徐力刚,蒋名亮,等.基于改进综合水质标识指数法的邛海水质评价 [J]. 中国环境科学, 2025,45(3):1351-1363.

Fang J H, Xu L G, Jiang M L, et al. Water quality evaluation of Qionghai Lake based on improved integrated water quality identification index method [J]. China Environmental Science, 2025,45(3):1351-1363.

基于改进综合水质标识指数法的邛海水质评价

方佳卉^{1,2},徐力刚^{2,3,4,5*},蒋名亮²,杨军⁶,李超凡¹,肖克彦⁷,李国祥⁶ (1.南京信息工程大学地理科学学院,江苏 南京 210044; 2.中国科学院南京地理与湖泊研究所,湖泊与流域水安全全国重点实验室,江苏 南京 210008; 3.中国科学院南京地理与湖泊研究所,鄱阳湖湖泊湿地综合研究站,江西 九江 332899; 4.江西省鄱阳湖流域生态水利技术创新中心,江西 南昌 330029; 5.中国科学院大学,北京 100049; 6.邛海国家湿地公园保护中心,四川 西昌 615050; 7.西昌市环境监测站,四川 西昌 615099)

摘要: 本文通过对传统的综合水质标识指数(CWQI)模型进行优化,建立了同时考虑主观权重和客观权重的基于博弈论的改进的综合水质标识指数(ICWQI_G)模型和考虑权重时间动态的分阶段组合权重的综合水质标识指数(ICWQI_P)模型,并以邛海作为案例依托,选取2020~2023年不同水期11个样点的水质监测数据,使用ICWQI_G和ICWQI_P模型科学评估了邛海水质状况,验证了改进综合水质标识指数法的科学性.研究表明,与传统的CWQI模型相比,改进后的ICWQI_G和ICWQI_P模型都考虑了TP超标的因素,评价结果更符合研究区域的实际水质情况,并且可以敏锐的识别出更多的污染风险区域与污染程度较严重的水体.ICWQI_P采用阶段性权重代替统一权重,能够补偿降水等因素影响的水质指标权重,可以更好地辨识出不同时期影响水质的关键环境变量,得到更准确合理的结果.同时,基于改进的综合水质标识指数法发现,2023年邛海水质劣于2020~2022年,并且邛海水质指标空间差异性显著,西北部湖区的污染程度高于东部和南部湖区.本文改进的ICWQI_G和ICWQI_P模型在邛海水质评价中表现了更好的合理性,可为邛海水生态环境精细化管理提供理论支撑,对其他类似水体的水质评价工作具有重要的参考价值.

关键词: 改进的综合水质标识指数; 水质评价; 阶段性权重; 邛海

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)03-1351-13

Water quality evaluation of Qionghai Lake based on improved integrated water quality identification index method. FANG Jia-hui^{1,2}, XU Li-gang^{2,3,4,5*}, JIANG Ming-liang², YANG Jun⁶, LI Chao-fan¹, XIAO Ke-yan⁷, LI Guo-xiang⁶ (1.School of Geographic Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2.National Key Laboratory of Lake and Watershed Water Safety, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3.Poyang Lake Wetland Research Station, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Jiujiang 332899, China; 4.Jiangxi Province Poyang Lake Basin Ecological Water Conservancy Technology Innovation Center, Nanchang 330029, China; 5.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 6.Qionghai National Wetland Park Protection Center, Xichang 615050, China; 7.Xichang City Environmental Monitoring Station, Xichang 615099, China). *China Environmental Science*, 2025,45(3): 1351~1363

Abstract: This paper optimized the traditional comprehensive water quality identification index model(CWQI) and established two improved models: the improved comprehensive water quality identification index model based on game theory(ICWQI_G), which considered both subjective weight and objective weight, and the improved comprehensive water quality identification index model with phased period combination weights(ICWQI_P), which incorporated the variation of weight time. Taking Qionghai Lake as a case, the water quality monitoring data of 11 sampling sites in different hydrological periods from 2020 to 2023 were selected to evaluate the water quality of Qionghai Lake using ICWQI_G and ICWQI_P models, which could verify the scientific validity of the improved comprehensive water quality identification index method. The results show that, compared with the traditional CWQI model, the improved ICWQI_G and ICWQI_P models both take into account the factor of TP exceedance. The evaluation results could better reflect the actual water quality of the study area, and sensitively identify more pollution risk areas and severely polluted water bodies. ICWQI_P used phased weights instead of uniform weights, compensating the effect of environmental factors such as precipitation on the weight of water quality. This could better identify the key environmental variables affecting water quality in

收稿日期: 2024-08-05

基金项目: 国家重点研发计划(2024YFE0106400,2023YFF0807204);国家自然科学基金资助项目(42307106,U2240224,U2444221);江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金项目(BK20220042);江西省科技计划项目(20224BAB213035,20223BBG74003,20232BAB213053,20213AAG01012,20222BCD46002);长春市科技发展计划项目(23SH03)

* 责任作者, 研究员, lgxu@niglas.ac.cn

different periods, leading to more accurate and reasonable results. At the same time, based on the improved comprehensive water quality identification index method, it was found that the water quality of Qionghai Lake in 2023 was worse than that in 2020–2022. The pollution degree of the northwestern lake area was higher than that in the eastern and southern lake area. The improved ICWQI_G and ICWQI_P models showed better rationality in the water quality assessment of the Qionghai Lake, providing theoretical support for the refined management of the lake's ecological environment, and offering important reference value for water quality assessment of other similar water bodies.

Key words: improved integrated water quality identification index; water quality assessment; phased period weight; Qionghai Lake

随着社会经济的发展,水质已成为人们关注的热点,水质与人类健康、水生生态系统、经济发展和生产息息相关^[1-3].水质恶化会破坏水体生态平衡,威胁区域水生态环境,进而引发一系列水生态环境问题^[4-5],合理管理和保护水生态环境已是社会关注的焦点问题之一.水质评价是保障人类饮用水安全、维护水生生态系统平衡、支撑经济可持续发展的重要手段^[6],它不仅是对水体健康状况的直接反映,更是衡量水生生态系统稳定性和可持续性的重要标尺^[7].因此,加强水质评价工作,对于水生态环境治理工作的实施具有直接且深远的影响^[1,8].

目前典型的水质评价方法有单因子评价法、模糊综合评价法、主成分分析、综合水质标识指数法等^[3,9-10],这些方法都存在各自的优点与不足.例如,单因子评价法较为简便易于操作,但夸大了最严重污染指标的影响,容易忽略其他指标^[11].模糊综合评价具有综合能力强的优点,但存在指标权重主观性强、效率较差的问题^[12].主成分分析通过降维保留原始数据的特征^[13],但标准化处理可能会掩盖相似指标差异,导致结果过于乐观^[14].而综合水质标识指数法可以直观地反映水质等级是否符合功能区标准,对水质情况进行合理的定性与定量评价,得到了广泛的应用^[15-17].但是,传统的综合水质标识指数法尚未考虑各项水质指标所反映信息量的差异性和权重影响,不能突出超标参数的影响^[18],而水质指标的权重往往会直接影响评价结果,因此,对权重的研究具有重要的意义.博弈论作为解决两个或两个以上参与者之间冲突的有效方法,已广泛应用于各个领域^[19],博弈论能优化主客观权重分配,实现纳什均衡^[20],利用博弈论确定组合权重,改进综合水质标识指数模型,理论上可提升评估结果的可靠性.此外,不同时期的气象要素和人为活动干扰等对地表水水质的影响程度不同^[21],因此有必要考虑各水质指标的权重比例在不同水文时期的变化,但大多数研究

尚未分阶段考虑各水质指标权重的变化,仅确定了指标的统一权重,各水质指标对水质评价结果的阶段性权重有待进一步研究.鉴于此,本研究对传统的综合水质标识指数法加以改进,利用博弈论分别引入统一权重和阶段性权重,综合考虑各项水质指标所反映的信息量,从而更加全面、真实的反映水质状况,为水环境治理和保护提供有力支持.

邛海是四川省第二大湖泊,作为西昌乃至全凉山州人民的“母亲湖”,既调节西昌区域气候,又是城市重要饮用水水源地,在区域生态健康与可持续发展中扮演着重要角色^[22],由于历史上邛海水质相对较好,以往针对邛海的研究较少引入统一权重和阶段性权重评价其水质在时空上的变化.因此,本研究以邛海为例,立足于邛海生态保护和水质评价的现实需求,综合考虑主客观权重对水质的影响,改进传统的综合水质标识指数模型(CWQI),在水质评价中创新性利用博弈论分别引入统一权重和阶段性权重,建立基于博弈论的改进型综合水质识别指标模型(ICWQI_G)和基于阶段性权重的综合水质识别指标模型(ICWQI_P),揭示邛海水质状况及时空分布特征,为邛海水生态环境精细化管理和其他类似水体的水质评价提供科学参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

邛海位于四川省凉山彝族自治州西昌市境内,地理位置 27°47'~27°52'N,102°16'~102°21'E,属于长江流域雅砻江水系,流域地处我国西南亚热带高原山区,四季分明、干湿季明显,年平均气温较温和,降雨主要集中在夏秋(5~10月)季,占年降雨总量的90%以上,水位变幅较小^[23].邛海总体呈蜗牛状,水位1509m,南北长11.5km,东西最大宽5.5km,平均宽度2.7km,集水面积达307.67km²,湖体面积31km²,湖水平均深14m,最深处34m.邛海是西昌三分之二城区

(约 12 万人口)生活用水的主要水源地,其周边也是西昌最适宜农业发展的地区之一,水田高度集中^[24].目前,西昌市环境监测站在邛海湖区共计布设有 11 个水质监测断面.其中 4 个水质断面为例行监测断面,分别为 QH2(邛海宾馆)、QH3(二水厂取水口)、

QH4(湖心)和 QH5(青龙寺).7 个断面为生态基线水质调查断面,包括 QH9(小渔村)、QH10(高枳湾)、QH11(月亮湾),以及 4 个主要河流入湖口影响区断面(QH6、QH7、QH8、QH1):官坝河、鹅掌河、小青河、海河口^[25].监测断面分布见图 1.

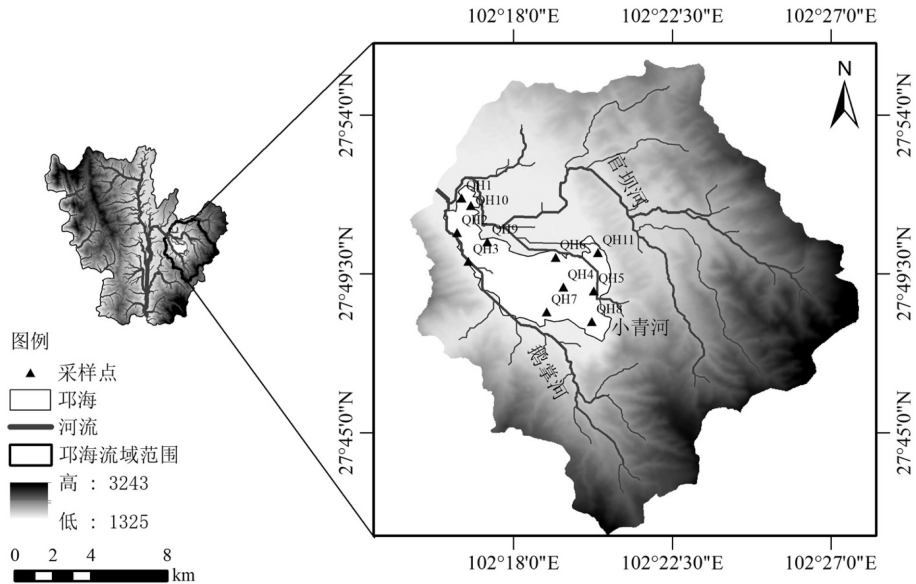


图 1 研究区采样点位置示意

Fig.1 Location map of sampling points in the study area

1.2 数据来源及处理

水质数据来源于凉山州西昌市环境监测站对邛海的日常监测数据,分别选取 2020~2023 年不同水期(5~10 月为丰水期,11 月~次年 4 月为枯水期)11 个样点的水质监测数据.从监测结果中选取氨氮(NH₃-N)、总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD_{Cr})、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、五日生化需氧量(BOD₅)和溶解氧(DO)7 个具有代表性的水质参数作为本研究的水质评价体系.依据《中国地表水环境质量国家标准》(GB3838-2002)^[26],结合邛海污染程度较轻的水环境现状,不考虑劣 V 类水标准,将水质划分为 I、II、III、IV、V 类共 5 个等级.本研究利用 Excel 和 IBM SPSS Statistics 26 进行数据处理与分析,由 R 语言和 Matlab R2022 计算层次分析法权重和组合权重,并通过 Origin 2018 和 ArcGIS 10.2 实现数据可视化.

1.3 研究方法

1.3.1 综合水质标识指数模型(CWQI) 该方法应用较为广泛,具体计算过程参考文献[27].根据

《中国地表水环境质量标准》(GB3838-2002)^[26],综合水质标识指数的分类标准如下(表 1),a₁、a₂ 中 a₁ 表示综合水质类别,a₂ 为综合水质在 a₁ 类水质变化区间内所处的位置,从而实现在同类水中进行水质优劣比较.

表 1 水质综合鉴定指标分类标准

Table 1 Classification standards for comprehensive water quality identification indicators

等级	污染描述	综合水质标识指数(a ₁ ·a ₂)
I 类	可饮用	1.0≤a ₁ ·a ₂ <2.0
II 类	轻度污染	2.0≤a ₁ ·a ₂ <3.0
III 类	中度污染	3.0≤a ₁ ·a ₂ <4.0
IV 类	重度污染	4.0≤a ₁ ·a ₂ <5.0
V 类	污染严重,但无黑无臭	5.0≤a ₁ ·a ₂ <6.0

1.3.2 基于博弈论的改进综合水质标识指数模型(ICWQI_G) 为提高 CWQI 模型的可靠性和准确性,在 CWQI 模型中引入权重计算,使水质指标 I_{wq} 更有效地反映实际水质.a₁·a₂ 由单因子水质标识指数 P_i' 乘以权重计算.该模型采用组合权重的方法,客观权

重与主观权重相结合,避免了单一权重的不足,提高了模型的准确性.新 $a_1 \cdot a_2$ 的计算方法如式(1)所示:

$$a_1 \cdot a_2 = \sum_{i=1}^n W_i P'_i \quad (1)$$

W_i 为水质参数 i 的组合权重,组合权重的计算如下:

分别采用熵权系数法^[28]和层次分析法(AHP)^[29-31]计算客观权重和主观权重,基于博弈理论的组合赋权法以纳什均衡为目标,协调主观与客观权重之间的冲突,是一个相互比较、相互协调的过程,该方法使水质参数的权重更加合理,解决评价结果过于主观或客观的问题,使其更符合实际情况^[32],具体赋权步骤如下:

基于博弈组合赋权的思想,优化的对策模型为

$\min \left\| \sum_{j=1}^l s_j w_j^T - w_i^T \right\|_2$, 其中 w_j 和 w_i 分别为不同方法的权重, $i=1,2,\dots,l$, s 为一种可能的组合权重, s 与 s_k 离差最小时对应的线性方程组形式为:

$$\begin{bmatrix} s_1 \cdot s_1^T & s_1 \cdot s_2^T & \cdots & s_1 \cdot s_l^T \\ s_2 \cdot s_1^T & s_2 \cdot s_2^T & \cdots & s_2 \cdot s_l^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_l \cdot s_1^T & s_l \cdot s_2^T & \cdots & s_l \cdot s_l^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 \cdot s_1^T \\ s_2 \cdot s_2^T \\ \vdots \\ s_l \cdot s_l^T \end{bmatrix} \quad (2)$$

对组合系数进行归一化处理: $a_k^* = a_k / \sum_{k=1}^l a_k$, a_k

为线性组合系数,最后的组合权重为:

$$w^* = \sum_{k=1}^l a_k^* s_k \quad (3)$$

得到各项指标在不同等级的权重矩阵 W , $W_i = [w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*]$.

1.3.3 基于阶段性权重的改进综合水质标识指数模型(ICWQIP) 为了进一步优化 ICWQIG 模型,提高评估的可靠性和准确性,本研究对模型权重的计算进行了优化.考虑到不同时期水质参数权重比例的影响,以及主观权重与人为因素相关的比例,对每个时期的客观权重进行优化.阶段性权重计算步骤与 1.3.2 节的组合权重类似,具体如下:

(1)首先,对 k 期水质参数 i 的 j 类水质 r_{ijk} 进行归一化, y_{ijk} 表示 k 期水质参数的归一化值,其中 $k = 1, 2, \dots, n$ 表示周期(如果周期为月,则 $k = 1, 2, \dots, 12$ 分别表示 1 月, 2 月, ..., 12 月).

$$\text{正向型指标: } y_{ijk} = \frac{r_{ijk} - \min k(r_{ij})}{\max k(r_{ij}) - \min k(r_{ij})} \quad (4)$$

$$\text{逆向型指标: } y_{ijk} = \frac{\max k(r_{ij}) - r_{ij}}{\max k(r_{ij}) - \min k(r_{ij})} \quad (5)$$

(2)然后计算 k 周期和 j 类水质等级的熵值 E_{jk} :

$$E_{jk} = -\frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^m P_{ijk} \ln P_{ijk} \quad (6)$$

$$P_{ijk} = \frac{y_{ijk}}{\sum_{j=1}^m y_{ijk}} \quad (7)$$

式中: P_{ijk} 表示系统在 k 时期所处的某种状态的概率.

(3)最后计算权重系数,第 i 个指标的权重 w_i 为:

$$w_{ik} = \frac{d_{ik}}{\sum_{i=1}^n d_{ik}} \quad (8)$$

式中: $d_{ik} = 1 - E_{ik}$, d_{ik} 表示 k 时期指标的信息效用值, w_{ik} 是 k 时期每个指标的权重,新 $a_1 \cdot a_2$ 的计算步骤与式(1)一致, a_3 、 a_4 的计算方法和上述相同, k 时期单因子水质标识指数 P'_{ik} 的计算与 1.3.1 节方法相同.

$$a_1 \cdot a_2 = \sum_{i=1}^n W_{ik} P'_{ik} \quad (9)$$

(4)水质指数的计算

本研究通过上述步骤以博弈论将熵权法权重与层次分析法的权重组合,得到最终组合权值 W_i ; 将 W_i 代公式(1),计算出 $a_1 \cdot a_2$; 结合 $a_1 \cdot a_2$ 、 a_3 、 a_4 , 得到水质指数 I_{wq} :

$$I_{wq} = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \quad (10)$$

式中: a_3 是参与评价的水质指标中劣于水环境功能区目标的单项指标数目, a_4 为综合水质等级与水环境功能区等级的比较结果,是综合水质的污染程度^[10,33].

通过博弈论将分阶段的熵权法与层次分析法相结合,用分阶段动态权重代替不变的权重,避免了计算熵权法权重时的小差别问题^[34],更有利于不同时期数据的比较.

2 结果与分析

2.1 水质时空变化

对 2020~2023 年邛海各断面水质监测数据进行描述性统计分析,结果如表 2 所示.变异系数(CV)范围为 15.93%~74.95%,不同时期、不同采样点的总体水质数据差异显著,分异程度较高.根据《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)^[26],化学需氧量(COD_{Cr})、五日生化需氧量(BOD₅)和氨氮(NH₃-N)

的平均浓度均处于 I 类水质标准.溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})的浓度虽有一定的波动,但整体水平都达到 II 类水质标准.其中总氮(TN)的平均浓度为 0.426mg/L,有劣于 II 类水质标准的风险,总磷(TP)的平均浓度(0.030mg/L)属于 III 类水,劣于当地水环境功能区目标.

表 1 水体参数统计值特征

Table 1 Characteristics of statistical values of water body parameters

指标(mg/L)	最大值	最小值	均值	标准差	变异系数(%)
NH ₃ -N	0.542	0.027	0.131	0.076	57.70
TN	1.860	0.200	0.426	0.204	47.93
TP	0.125	0.010	0.030	0.022	74.95
COD _{Cr}	20.000	4.000	11.901	3.050	25.63
COD _{Mn}	4.050	1.670	2.329	0.461	19.79
BOD ₅	5.600	0.500	1.766	1.159	65.64
DO	10.600	4.710	7.195	1.146	15.93

2.1.1 时间变化 根据 2020~2023 年邛海水质监测数据,绘制了 7 个水质参数的时间变化情况(图 2).如图 2(a)所示,NH₃-N 的浓度均达到 II 类水质标准,但

2023 年 2 月 NH₃-N 平均浓度明显高于其他时段,达到 0.23mg/L,其他时期的平均值均低于 0.2mg/L,2021 年 8 月的平均值最低,仅为 0.07mg/L.TN 的平均浓度也在 2023 年 2 月达到最大值,为 0.60mg/L(III 类).由图 2(c)可以看出,TP 的浓度在大部分时间段均超标,尤其在 2023 年 2 月,平均浓度达到 0.053mg/L(III 类),已经严重超标.在图 2(d)和图(e)中,部分水样的 COD_{Cr} 浓度劣于 II 类标准,COD_{Mn} 的浓度均优于 II 类水,从图 2(f)可以看出 2020 年 1 月、2022 年 11 月、2023 年 2 月、8 月、11 月部分水样 BOD₅ 浓度劣于 II 类水质标准.图 2(g)中 DO 除 2021 年 11 月的最低平均浓度(5.82mg/L)和 2023 年 2 月的最高平均浓度(9.91mg/L)外,其余各月的平均浓度均在 6~8mg/L 间,最低值劣于 II 类标准.总体而言,除 NH₃-N、COD_{Mn} 能稳定达标外,其余水质参数都不能稳定达到 II 类水质标准,以 TP 最为突出,表明 TP 为影响邛海水质的主要污染物.7 个水质参数中除 COD_{Mn} 外,其余指标浓度均在 2023 年 2 月出现高值,显著大于其他月份.

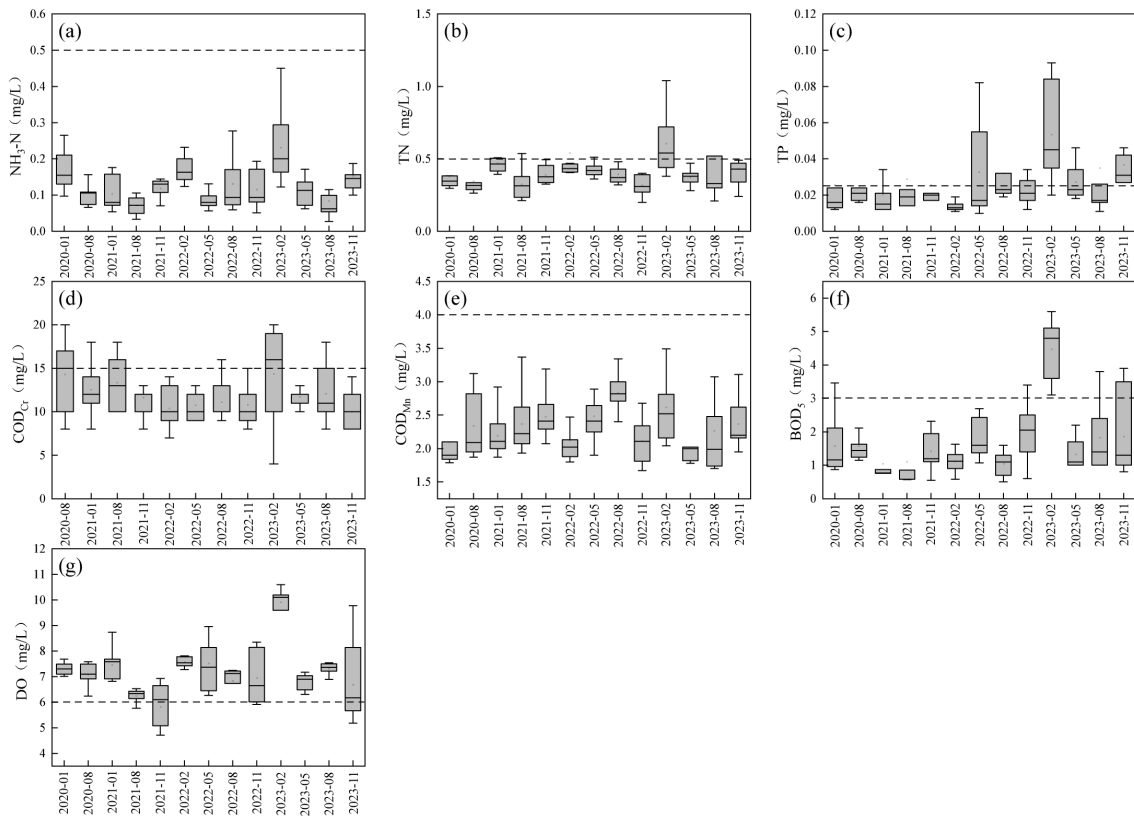


图 2 不同时期水质参数
Fig.2 Water quality parameters in different periods
黑色直线为地表 II 类水标准限值

2.1.2 空间变化 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度总体较低,高值出现在湖西北岸和东北岸,浓度为 0.138~0.172mg/L,东南部湖区浓度为 0.111~0.128mg/L(图 3(a));北岸 TN 浓度较高,最大值达到 0.588mg/L,南部湖区浓度较低,为 0.379~0.406mg/L(图 3(b));TP 在西北部湖区分布较高,浓度最高达 0.073mg/L,在东南部湖区分布较低,为 0.018~0.020mg/L(图 3(c));在西北岸和东岸

COD_{Cr} 浓度较高,为 11.83~12.56mg/L,沿湖东西两岸向湖中心递减,最低浓度为 11.39mg/L(图 3(d)); COD_{Mn} 空间分布与 TP 相似,在西北部湖区浓度较高,达 2.54~3.01mg/L,最低浓度出现在东南湖区,为 2.08mg/L(图 3(e)); BOD_5 和 DO 的空间分布都呈现从西北向东南递减的趋势,最高浓度分别达 2.87 和 7.23mg/L(图 3(f)和图 3(g)).

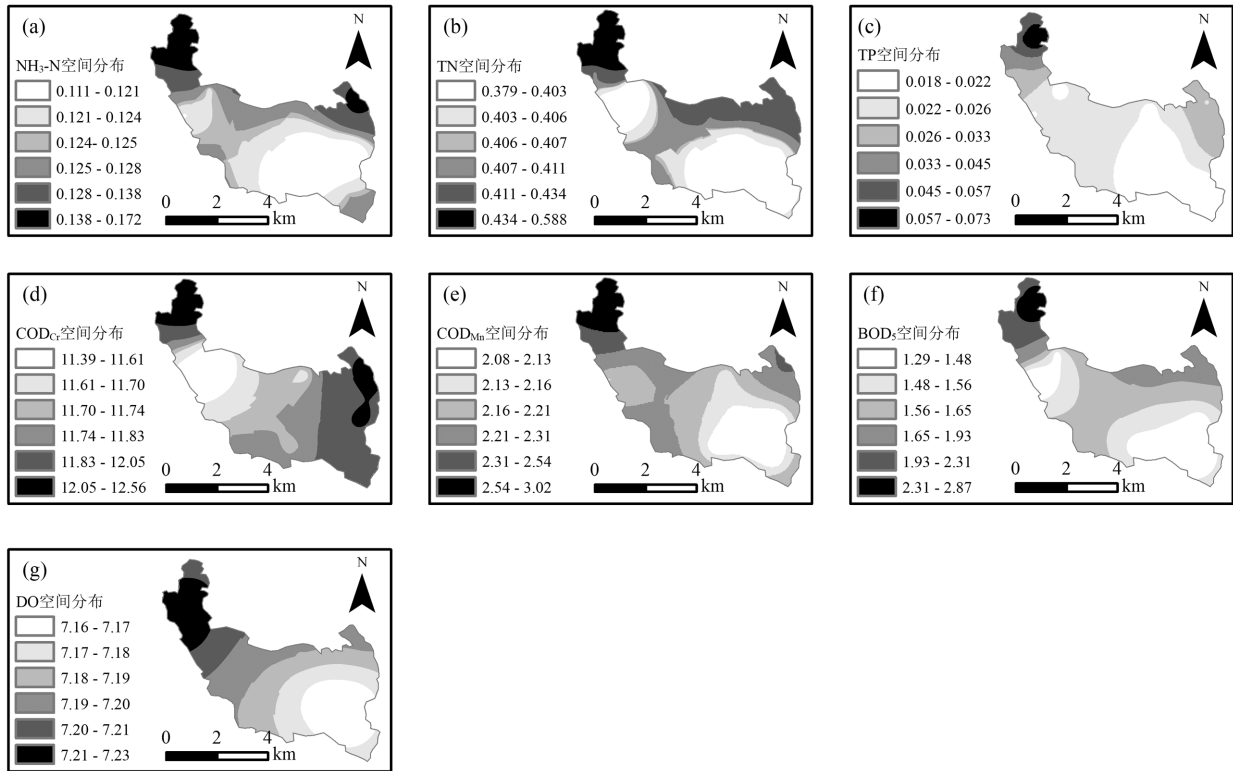


图 3 邛海水质空间分布

Fig.3 Spatial distribution of Qionghai water quality

2.2 权重计算结果

以 2020~2023 年邛海水质数据为基础,采用层次分析法和熵权法确定主观权重和客观权重,并通过博弈论确定组合权重(表 3). ICWQI_P 模型的阶段性(本研究以月为单位)参数权重如表 4 所示.在表 3 中,采用博弈论组合权重与 AHP 权重之间变化关系一致.例如,熵权法权重最大值为 DO,最小值为 TN,而层次分析法计算的权重与博弈论组合权重结果的最大值都为 TP,最小值都为 $\text{NH}_3\text{-N}$.在表 4 中,经过阶段性计算后,阶段性权重值随时间变化发生了动态波动,例如,DO 的权重值范围为 0.083~0.207,TP 的权重值范围为 0.202~0.337,7 个参数的阶段性权重值在每个阶段都是 TP 最大,突出其在水质评价中的

重要性,并且 ICWQI_G 模型计算的各参数组合权重值都在 ICWQI_P 模型的权重范围内.

表 3 基于熵权法、层次分析法和博弈论组合赋权的各参数权重

Table 3 The weights of each parameter are weighted based on the combination of entropy weight method, analytic hierarchy process and game theory

权重方法	参数权重						
	$\text{NH}_3\text{-N}$	TN	TP	COD_{Cr}	COD_{Mn}	BOD_5	DO
熵权法	0.1406	0.1398	0.1406	0.1468	0.1418	0.1426	0.1479
层次分析法	0.0407	0.1330	0.2832	0.1857	0.0967	0.1101	0.1507
组合权重	0.0402	0.1330	0.2840	0.1859	0.0965	0.1099	0.1507

为了比较不同权重对模型的影响,在 CWQI 不

考虑权重的情况下,本文将 ICWQI_G 和 ICWQI_P 使用的组合权重绘制在一张图中(图 4).ICWQI_P 和 ICWQI_G 的各参数权重变化趋势一致,且 ICWQI_G 的各水质参数的组合权重均在 ICWQI_P 的最大值范围内,其中 TP 的权重最大,说明 TP 为影响邛海水质状况的主要因子.

表 4 ICWQI_P 模型的阶段性参数权重

Table 4 Weights of the phased parameters of the ICWQI_P model

月份	组合权重						
	NH ₃ -N	TN	TP	COD _{Cr}	COD _{Mn}	BOD ₅	DO
2020-01	0.068	0.159	0.334	/	0.114	0.129	0.199
2020-08	0.050	0.118	0.240	0.220	0.106	0.107	0.158
2021-01	0.046	0.168	0.217	0.217	0.109	0.081	0.162
2021-08	0.006	0.099	0.313	0.232	0.095	0.067	0.188
2021-11	0.023	0.120	0.275	0.199	0.096	0.081	0.207
2022-02	0.086	0.189	0.202	0.176	0.110	0.079	0.157
2022-05	0.056	0.143	0.271	0.161	0.112	0.117	0.140
2022-08	0.029	0.122	0.331	0.179	0.118	0.059	0.163
2022-11	0.037	0.110	0.258	0.189	0.096	0.135	0.175
2023-02	0.060	0.130	0.321	0.146	0.081	0.180	0.083
2023-05	0.036	0.126	0.286	0.200	0.090	0.089	0.174
2023-08	0.026	0.151	0.313	0.176	0.088	0.107	0.139
2023-11	0.047	0.127	0.327	0.146	0.093	0.110	0.151

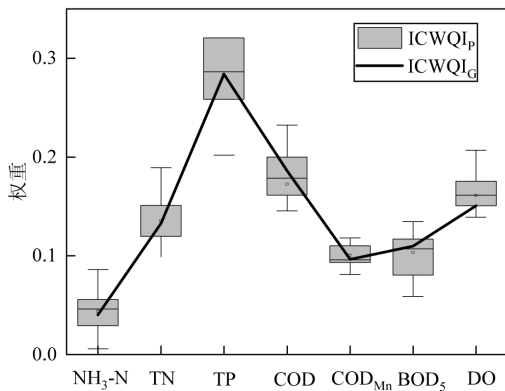


图 4 ICWQI_G 和 ICWQI_P 水质参数的权重

Fig.4 Weights of ICWQI_G and ICWQI_P water quality parameters

2.3 CWQI、ICWQI_G、ICWQI_P 的水质评价结果

2.3.1 水质评价指数结果(I_{wq}) 由 CWQI、ICWQI_G、ICWQI_P 三种模型计算得出 11 个采样点在各时期的 I_{wq} 值,如表 5 所示,可以看出 I_{wq} 最大值分别为 2.820、3.221 和 3.421, I_{wq} 的最小值分别为 1.200、1.100 和 1.200, I_{wq} 的平均值分

别为 1.644、1.752 和 1.770.ICWQI_P 的变异系数为 19.93%,比 CWQI 的 17.95%高 1.98%.ICWQI_G 的变异系数为 23.52%,比 ICWQI_P 高 3.59%,这表明 ICWQI_G 和 ICWQI_P 的空间差异比 CWQI 更显著,在空间上更能明确识别出邛海污染风险水域.

3 种方法在不同时期、不同采样点的 I_{wq} 值如图 5 所示.由表 5 和图 5(a)可以看出,CWQI 计算的 I_{wq} 均值均低于 ICWQI_G 和 ICWQI_P 计算的平均值.CWQI 计算的 I_{wq} 最小值和最大值都出现在 2023 年 8 月;ICWQI_G 计算的 I_{wq} 最小值为 2020 年 1 月的 1.100,最大值为 2023 年 8 月的 3.221;ICWQI_P 计算得出, I_{wq} 最小值为 2020 年 8 月的 1.200,2023 年 8 月出现最大值为 3.421.

从图 5(b)可以看出,CWQI、ICWQI_G 和 ICWQI_P 计算的 I_{wq} 值在采样点 QH1 和 QH10 显著高于其他点位,最大值均出现在采样点 QH1,分别为 2.820、3.221 和 3.421.CWQI 计算的最小 I_{wq} 值为 1.200,出现在采样点 QH3 和 QH7;ICWQI_G 计算的最小 I_{wq} 值为 1.100,出现在采样点 QH3 和 QH4;ICWQI_P 计算的最小 I_{wq} 也为 1.200,出现在采样点 QH11.

表 5 三种模型计算的 I_{wq} 值

Table 5 I_{wq} values calculated by the three models

评价方法	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数
CWQI	2.820	1.200	1.644	0.295	17.95%
ICWQI _G	3.221	1.100	1.752	0.412	23.52%
ICWQI _P	3.421	1.200	1.770	0.353	19.93%

2.3.2 水质评价等级结果 由 2.3.1 可知,三种模型得到的评价结果有所差异.利用 CWQI、ICWQI_G 和 ICWQI_P 对 2020~2023 年邛海水质等级进行评价,结果如图 6 所示.图 6(a)中 CWQI 的评价结果均达到 II 类及以上,其中保持 I 类水质的水样占 85.31%,II 类水质占 14.69%.在图 6(b)中,11 个采样点监测的水样中,I 类水样占 76.22%,II 类水样占 23.08%,ICWQI_G 结果显示,2023 年 8 月采样点 QH1(海河口)有 1 个 III 类水样,占 0.70%,该水样为 CWQI 的 II 类水样.在图 6(c)中,同样是 76.22%的水样为 I 类,23.08%为 II 类,III 类水样占 0.70%,但 II 类水样与 ICWQI_G 的 II 类水样分布有所差异,ICWQI_P 结果也显示在 QH1(海河口)采样点的 2023 年 8 月水样为

III类.从图6可以看出,ICWQI_G和ICWQI_P模型的评价结果不仅保留了CWQI模型的II类水样,还识别出了更多的II类水样,如QH1在2020年8月、2021年11月、2022年5月,QH10在2022年5月在CWQI

模型的评价结果中都为I类水但在改进的两个模型结果中都为II类水,且2023年8月QH1在ICWQI_G和ICWQI_P模型均为III类水但在CWQI模型中为II类.

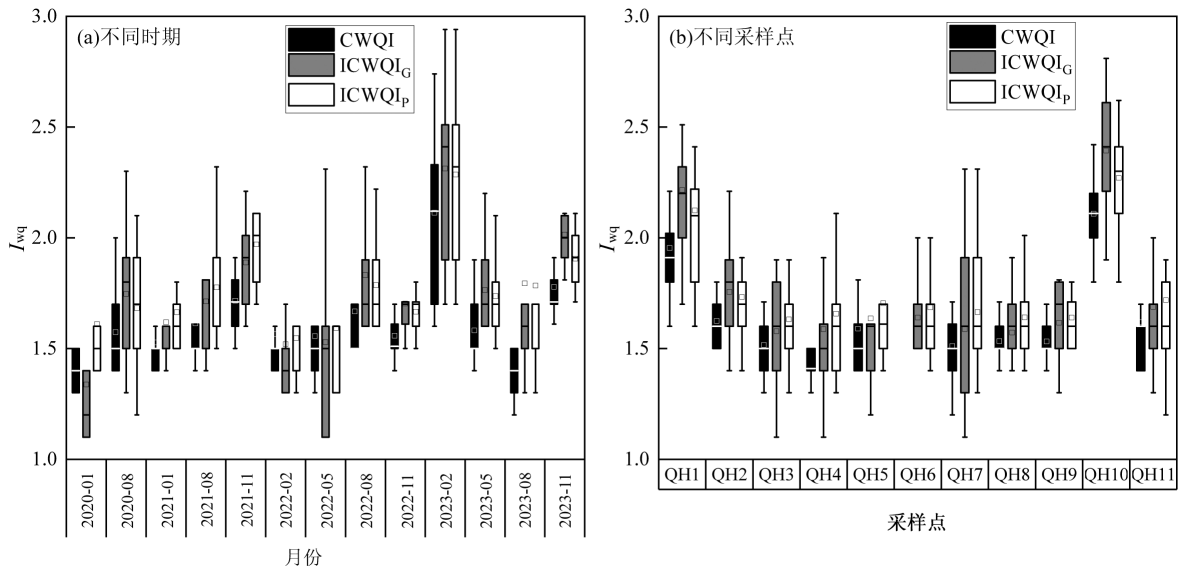


图5 不同时期和不同采样点的 I_{wq} 值结果

Fig.5 I_{wq} -value results for different periods and different sampling points

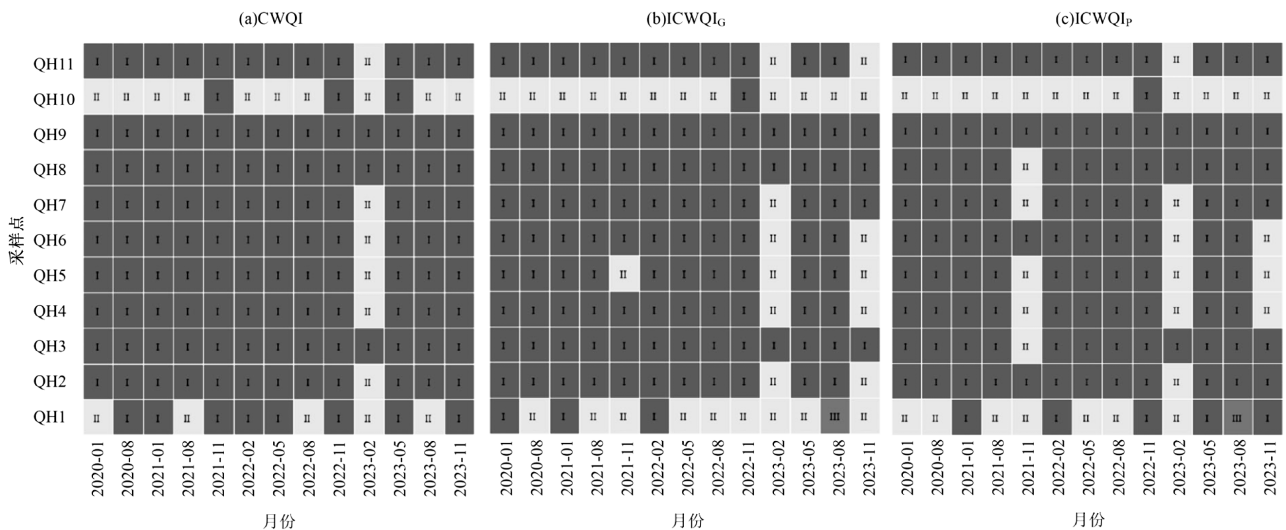


图6 不同方法的水质评价结果

Fig.6 Water quality evaluation results of different methods

水质等级评价结果显示,2020~2023年邛海水质总体都达到饮用水源水质标准,其中2023年虽然整体水质达标,但西北部湖区的海河口(QH1)在8月水质为III类,劣于当地水功能标准,在2月水质也有超标的风险.

3 讨论

3.1 邛海水质时空变化驱动力分析

研究表明,降水、降水量及时空分布是流域面源污染的主要影响因素^[35-37].邛海流域5~10月为丰水

期,在这期间降水量集中,占年总降水量的 90%以上^[38],尤其在 2023 年 8 月降水量较高,为 320.6mm,枯水期(11 月~次年 4 月)降水量较少,以 2023 年 2 月最少,仅为 2.8mm(图 7)。从图 2、图 7 可以发现,水质参数($\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP、 COD_{Cr} 、 BOD_5 、DO)浓度最高的时期都出现在降水量最低的 2023 年 2 月,且在同一年内,同一参数在枯水期的浓度大多要高于丰水期,结果与时瑶等在邛海分析氮、磷浓度的结果类似^[25]。降水产生的地表径流会携带一定的污染物进入水体,但同时充沛的降水也会稀释水体的原有污染物^[39],此外,通过降水的冲刷和稀释,可以加速水体污染物的分解和降解过程,提高水体的净化能力^[40]。这表明邛海污染物浓度的时间变化可能受到了降水稀释作用的驱动,丰水期受降水影响,导致入湖流量增大,邛海水体污染物浓度受到这种稀释效应而降低。在本研究中,邛海水质在 2023 年劣于 2020~2022 年,出现劣化的原因除降水影响外,可能涉及多个方面。如环湖而建的截污管道老化,出现破损、渗漏等问题,导致生活污水直接排入湖水中,另外由于疫情防控政策的放宽与调整,2023 年各景区游客骤然增加^[41],也会对水质产生一定的不利影响。

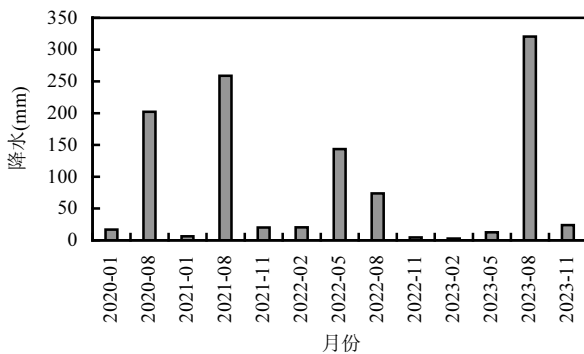


图 7 2020~2023 年西昌市不同时期月降水量

Fig.7 Monthly precipitation of Xichang city in different periods from 2020 to 2023

由图 3 可见,除 COD_{Cr} 外的水质参数空间分布大致都呈现出北部湖区劣于南部湖区的特征,尤其以西北部湖区污染状况更为突出。根据资料记载^[42],邛海流域以农业种植为主,其北岸分布大量水田和葡萄园。从冉蛟等^[43]的研究可知,邛海的氮、磷等污染物与周边水田、农村居民用地面积呈正相关,因此,北岸会产生较多的农业污水和生活污水,随着北部河流水系

(如官坝河)排入邛海,对邛海北部的水质产生不利影响。从流域土地利用和土地覆盖特征来看,西北部陆域为干沟河流域和湖滨平坝,属于西昌市城市发展区,人为活动频繁^[44],Pirmia 等^[45]研究结果表明,人类活动是影响水体水质状况的主要因素之一。从局部水域环境特征来看,邛海水体深度从 QH9(小渔村)和 QH2(邛海宾馆)断面向北迅速变浅,西北部水域面积小、水道狭窄,难以与东部 QH4(湖心)、QH5(青龙寺)以及 QH6(官坝河入湖口影响区)等开阔水域相比较。水体交换能力有限,西北部水域自净能力较差^[46-47],易引起局部水环境污染^[48]。因此导致邛海水质的空间分布总体呈“南好北劣”的特征。

3.2 水质指数 I_{wq} 的变化分析

计算 2020~2023 年各年每个采样点的 I_{wq} 值,绘制邛海 ArcGIS 空间插值图。 CWQI 、 ICWQI_{G} 、 ICWQI_{P} 在 11 个采样点计算的值如图 8 所示,其中 I_{wq} 值在色域的取值范围为 1.0~2.5。

三种模型的结果(图 8)也同样表明,西北部湖区污染较东南部严重,图中西北部水体的海河口(QH1)和高视湾(QH10)点位的水质始终处于轻度或中度污染,这与前人对邛海水质分析的研究结果一致^[25,43,48]。此外,图 8 还反映出在 2023 年水体 I_{wq} 值大于其他年份, CWQI (图 8(d))的空间分布图依然呈现西北部湖区大于东南部,但在 ICWQI_{G} 和 ICWQI_{P} (图 8(h)和图 8(l))的空间分布图中,除了西北部湖区外,东北部湖区也出现了污染,并且 ICWQI_{P} 分布中东北部湖区比 ICWQI_{G} 的颜色更深、范围更广。由 2.1 和 2.2 节可知,TP 为邛海的主要污染物,经 ICWQI_{G} 和 ICWQI_{P} 计算的权重也为 TP 的占比最大,对 I_{wq} 值的大小起主导作用,继而影响水质评价的最终结果。在 2.3.2 的水质评价结果中, CWQI 模型评价所有断面均达到 II 类水,改进后的 ICWQI_{G} 和 ICWQI_{P} 模型在 2023 年 2 月于海河口(QH1)出现了 III 类水。改进后的两个模型评价过程都考虑了 TP 严重超标的因素^[49],TP 超标的原因是多方面的。如邛海北岸的大面积农田种植区使用的化肥和农药等化学物质,在雨水冲刷和地表径流的作用下携带大量的氮、磷等营养物质进入邛海^[50],从而增加邛海的 TP 含量;同时,北部湖区人口密集,生活污水排放较为集中,这些污水中含有大量的含磷物质^[51],也是邛海 TP 的重要来源之一;

此外,在枯水期或受到大风浪等自然因素的影响下^[52],邛海湖底的底泥会受到扰动,导致底泥中的磷等营养物质重新释放到水体中^[53],从而增加水体的 TP 含量.而东北部陆域为官坝河流域,其农业生产发达,易发生水土流失,农业面源污染流失易带来氮、磷污染^[54].因此,改进后的 ICWQI_G 和 ICWQI_P 模型于 2023 年在东北部湖区出现了程度较轻的污染(图 8(h)和图 8(l)),改进后的模型比传统

的 CWQI 模型更加真实,评价结果更符合研究区域的实际水质情况.总体而言,CWQI 方法计算的水质指数过于乐观,难以区分水样的位置和污染程度,如图 8(a-d).图 6 和图 8 也都充分地说明了 ICWQI_G 和 ICWQI_P 模型可以识别出更多的污染风险区域与污染程度较严重的水体,这是 CWQI 模型不能实现的,因此 ICWQI_G 和 ICWQI_P 模型具有更高的合理性和准确性.

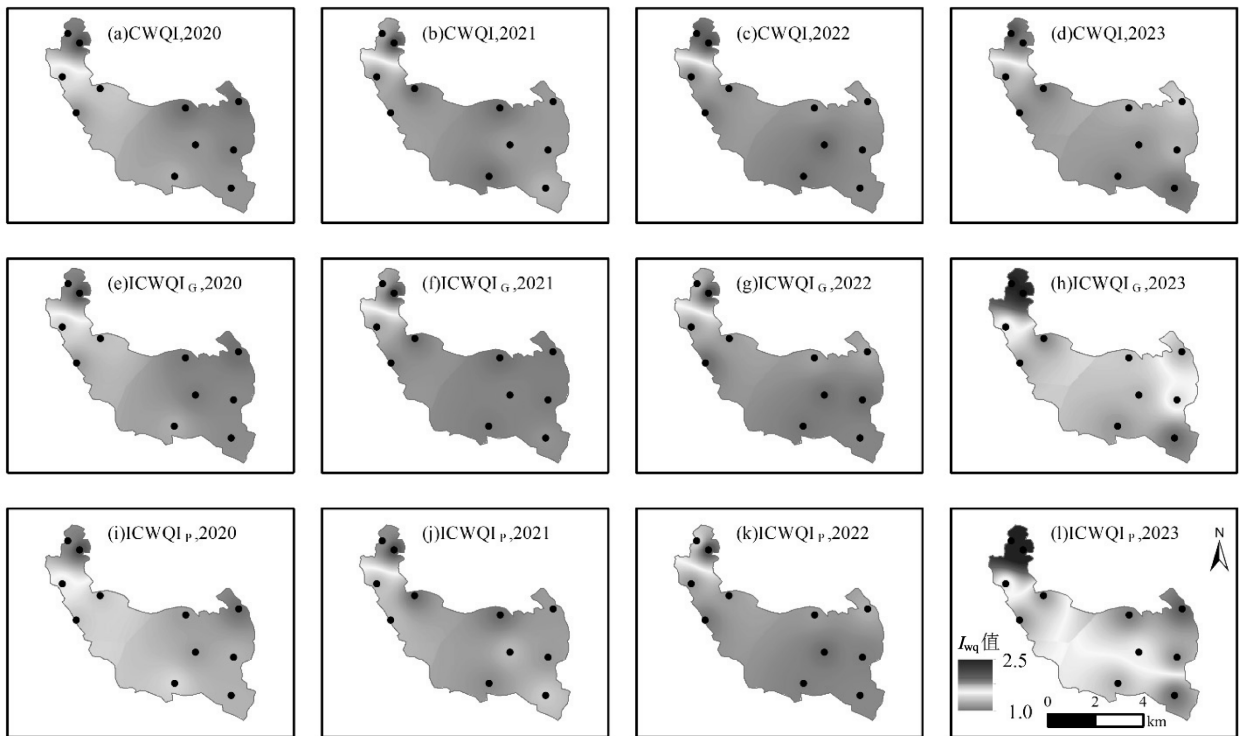


图 8 不同方法在各年各个样点的 I_{wq} 值

Fig.8 I_{wq} -values of different methods at each sample point in each year

总体来说,CWQI 结果过于乐观,认为没有 III 类水,与当地环境监测站分析的实际水质存在偏差.在重点污染水样的观测中,ICWQI_G 和 ICWQI_P 的结果更令人满意和合理.Ding 等^[3]也采用改进的综合水质标识指数模型评价了 2020 年太湖的水质状况,结果表明与 CWQI 相比,ICWQI_P 和 ICWQI_G 具有更高的准确性,可以得到更合理的结果.因此 ICWQI_G 和 ICWQI_P 的合理性和准确性均优于 CWQI,不仅保留了代表性的污染水域,还可以从空间插值图中看到潜在的污染风险水域.ICWQI_P 采用阶段性权重代替统一权重,可以更好地分析不同时期的水质和空间差异性,得到更准确合理的结果.因此模型的污染等级识别能力由高到低依次为:ICWQI_P、ICWQI_G、CWQI.

4 结论

4.1 邛海整体水质评价情况较好,2020~2023 年邛海水质总体处于 I 类和 II 类之间,且 TP 为影响邛海水质状况的主要因子.各水质参数时空差异性显著,从时间来看,2023 年水质劣于 2020~2022 年;从空间来看,西北部湖区水质较差,其中 QH1(海河口)点位在 2023 年 8 月的水质评价结果属于 III 类,南部湖区水质较好,总体呈“南好北劣”的趋势.

4.2 通过 ICWQI_G 和 ICWQI_P 计算得出的 I_{wq} 均值分别为 1.752 和 1.770,表明邛海综合水质处于可饮用状态.评价结果显示,ICWQI_G 和 ICWQI_P 的 I 类水样都占 76.22%, II 类水质占 23.08%, III 类水质为

0.70%。

4.3 改进后的模型都考虑了 TP 严重超标的因素, 评价结果更符合研究区域的实质水质情况。ICWQI_G 和 ICWQI_P 模型可以识别出更多的污染风险区域与污染程度较严重的水体, 因此 ICWQI_G 和 ICWQI_P 模型具有更高的合理性和准确性。ICWQI_P 采用阶段性权重代替统一权重, 可以更好地分析不同时期的水质和空间差异性, 得到更准确合理的结果。模型的污染等级识别能力由高到低依次为: ICWQI_P、ICWQI_G、CWQI。

参考文献:

- [1] 易雨君, 叶敬吁, 丁航, 等. 水生态评价方法研究进展及展望 [J]. 湖泊科学, 2024, 36(3): 657-669.
Yi Y J, Ye J X, Ding H, et al. Research progress and prospect of water ecological assessment methods [J]. Journal of Lake Sciences, 2024, 36(3): 657-669.
- [2] Fu X Q, Zou Z H. Water quality evaluation of the Yellow River Basin based on gray clustering method [C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Energy Equipment Science and Engineering (ICEESE), 2018, 128(1): 012139.
- [3] Ding F, Zhang W, Chen L, et al. Water quality assessment using optimized CWQII in Taihu Lake [J]. Environmental Research, 2022, 214. <http://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113713>.
- [4] Zhao Q, Wang Q. Water ecosystem service quality evaluation and value assessment of Taihu Lake in China [J]. Water, 2021, 13(5): 618.
- [5] 蔡启佳, 马千里, 苟婷, 等. 湖库型水源地蓝藻水华应急处置技术研究进展 [J]. 中国环境科学, 2025, 45(1): 390-405.
Cai Q J, Ma Q L, Gou T, et al. Research progress on emergency treatment technology of cyanobacteria bloom in lake and reservoir water source [J]. China Environmental Science, 2025, 45(1): 390-405.
- [6] Cantoni J, Kalantari Z, Destouni G. Watershed-based evaluation of automatic sensor data: Water quality and hydroclimatic relationships [J]. Sustainability, 2020, 12(1): 396.
- [7] 吴建东, 刘育秉, 田琨. 张掖市北郊湿地水生植物多样性及生态健康评价 [J]. 海洋湖沼通报, 2024, 46(3): 158-166.
Wu J D, Liu Y B, Tian K, et al. Aquatic plant diversity and ecological health evaluation of wetland in northern suburb of Zhangye City [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2024, 46(3): 158-166.
- [8] 张静, 胡愈忻, 胡圣, 等. 长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价 [J]. 环境科学, 2023, 44(4): 2072-2082.
Zhang J, Hu Y X, Hu S, et al. Environmental drivers and ecological assessment of phytoplankton communities in the Yangtze River Basin [J]. Environmental Science, 2023, 44(4): 2072-2082.
- [9] 邹霞. 基于 WQI 的河网水系水质评价及时空特性分析 [J]. 水电能源科学, 2024, 42(4): 53-56.
Zou X. Water quality evaluation and spatiotemporal characteristics analysis of river network based on WQI [J]. Water Resources and Power, 2024, 42(4): 53-56.
- [10] Qian Z, Feng M, Hao X, et al. Application of nemerow index method and integrated water quality index method in water quality assessment of Zhangze Reservoir [C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Energy Equipment Science and Engineering (ICEESE), 2018, 128(1): 012160.
- [11] Su K, Peng Z, Wang Q, et al. Application and comparison of four assessment methods for water quality of Sancha Lake in Central Sichuan Province, China [J]. Water Practice and Technology, 2023, 18(11): 2797-2808.
- [12] Wang X, Wang X, Zhu J, et al. A hybrid fuzzy method for performance evaluation of fusion algorithms for integrated navigation system [J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 69: 226-235.
- [13] 付蕊, 刘沙沙, 索诚宇, 等. 2008-2022 年我国湖泊有机质相关指标时空演变 [J]. 中国环境科学, 2024, 44(3): 1426-1435.
Fu R, Liu S S, Suo C Y, et al. Temporal and spatial evolution of related indicators of lake organic matter in China from 2008 to 2022 [J]. China Environmental Science, 2024, 44(3): 1426-1435.
- [14] Rosen C, Lennox J A. Multivariate and multiscale monitoring of wastewater treatment operation [J]. Water Research, 2001, 35(14): 3402-3410.
- [15] 闫滨, 姜秀慧, 钟占华, 等. 基于改进权重的综合水质标识指数法的大伙房水库上游水质评价研究 [J]. 沈阳农业大学学报, 2019, 50(3): 314-323.
Yan B, Jiang X H, Zhong Z H, et al. Study on water quality evaluation of upper reaches of Dahuofang Reservoir based on comprehensive water quality identification index method with improved weights [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2019, 50(3): 314-323.
- [16] Ouyang L, Shi Y, Yang J, et al. Water quality assessment and pollution source analysis of Yaojiang River Basin: A case study of inland rivers in Yuyao City, China [J]. Water Supply, 2022, 22(1): 674-685.
- [17] Xue Y, Ma Y, Long G, et al. Evaluation of water quality pollution and analysis of vertical distribution characteristics of typical Rivers in the Pearl River Delta, South China [J]. Journal of Sea Research, 2023, 193.
- [18] 林涛, 尹静, 张博, 等. 改进综合水质标识指数法在珠江口水系水质评价中的应用 [J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 166-173.
Lin T, Yin J, Zhang B, et al. Improved application of comprehensive water quality identification index method in water quality evaluation of Pearl River Estuary [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 166-173.
- [19] Liu Y, Hu Y, Hu Y, et al. Water quality characteristics and assessment of Yongding New River by improved comprehensive water quality identification index based on game theory [J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, 104: 40-52.
- [20] 孙自保, 孙前路, 宋连久, 等. 西藏草地资源保护中牧民行为策略研究 [J]. 草地学报, 2012, 20(5): 805-811.
Sun Z B, Sun Q L, Song L J, et al. Study on herdsmen behavior strategy in grassland resource protection in Tibet [J]. Acta Agrestia Sinica, 2012, 20(5): 805-811.
- [21] 孙婷婷, 涂耀仁, 罗鹏程, 等. 2008-2022 年上海大莲湖湿地营养盐时空分布特征、水质评价及来源解析 [J]. 湖泊科学, 2023, 35(3): 886-901.
Sun T T, Tu Y R, Luo P C, et al. Spatial and temporal distribution, water quality evaluation and source analysis of nutrient salts in Dalian Lake wetland in Shanghai from 2008 to 2022 [J]. Journal of Lake

- Sciences, 2023,35(3):886-901.
- [22] Wu S, Tian C, Li B, et al. Ecological environment health assessment of lake water ecosystem system based on simulated annealing-projection pursuit: A case study of plateau lake [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022,86.
- [23] Ren C, Zheng B. Trend recognition and driving factors of water quality change in plateau lakes: A case study of Lake Qionghai, Sichuan Province [J]. *Hupo Kexue*, 2024,36(3):756-769.
- [24] Yong C, Yiqian W. Qionghai Lake, Sichuan, China: Environmental degradation and the need for multidimensional management [J]. *Mountain Research and Development*, 2003,23(1):65-72.
- [25] 时 瑶,张 雷,秦延文,等.四川邛海水体氮、磷浓度时空分布特征及其生态环境响应研究 [J]. *地学前缘*, 2023,30(2):495-505.
- Shi Y, Zhang L, Qin Y W, et al. Spatial and temporal distribution of nitrogen and phosphorus concentrations and their ecological response in Sichuan Qionghai Lake [J]. *Earth Science Frontiers*, 2023,30(2): 495-505.
- [26] GB 3838-2002 地表水环境质量标准 [S].
GB 3838-2002 Environmental quality standards for surface water [S].
- [27] 徐祖信.我国河流综合水质标识指数评价方法研究 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2005,(4):482-488.
- Xu Z X. Study on evaluation method of river comprehensive water quality identification index in China [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2005,(4):482-488.
- [28] Gao Y, Qian H, Ren W, et al. Hydrogeochemical characterization and quality assessment of groundwater based on integrated-weight water quality index in a concentrated urban area [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020,260.
- [29] 杜展鹏,王明净,严长安,等.基于绝对主成分-多元线性回归的滇池污染源解析 [J]. *环境科学学报*, 2020,40(3):1130-1137.
- Du Z P, Wang M J, Yan C A, et al. Analysis of pollution sources in Dianchi Lake based on absolute principal components-multiple linear regression [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020,40(3):1130-1137.
- [30] Anggle B, Subiyanto, Arief U M, et al. Assessment of shrimp farming impact on groundwater quality using analytical hierarchy process [Z]. 2018.10.1063/1.5028061
- [31] Mega N, Khechana S. Groundwater quality assessment by analytic hierarchy process (geographic information systems-based model) in Souf region (south-east of Algeria) [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2021,18(11):3459-3468.
- [32] Zhang Y, Jia R, Wu J, et al. Evaluation of groundwater using an integrated approach of entropy weight and stochastic simulation: A case study in East Region of Beijing [J]. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2021,18(14):7703.
- [33] Keke W, Baohui M, Yanling X. Water quality evaluation and spatiotemporal variation characteristics of Wenyu River based on comprehensive water quality identification index method [J]. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2022,21(2):711-719.
- [34] Zhang Q, Qian H, Xu P, et al. Groundwater quality assessment using a new integrated-weight water quality index (IWQI) and driver analysis in the Jiaokou Irrigation District, China [J]. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2021,212:111992.
- [35] Yu D, Dian L, Hai Y, et al. Effect of rainfall characteristics on the sewer sediment, hydrograph, and pollutant discharge of combined sewer overflow [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022,303, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114268>
- [36] 余香英,王 刚,邹富桢,等.基于逐 4h 尺度的粤西典型流域降雨径流污染特征分析 [J]. *环境污染与防治*, 2023,45(7):910-916.
- Yu X Y, Wang G, Zou F Z, et al. Analysis of rainfall and runoff pollution characteristics based on 4-h scale in typical watershed of western Guangdong [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2023, 45(7):910-916.
- [37] 童晓霞,崔远来,史伟达.降雨对灌区农业面源污染影响规律的分布式模拟 [J]. *中国农村水利水电*, 2010,(9):33-35.
- Tong X X, Cui Y L, Shi W D. Distributed simulation of the influence of rainfall on agricultural non-point source pollution in irrigated areas [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2010,(9):33-35.
- [38] 董艳珍,张培育,李小艳,等.邛海大型水生植物时空分布及其退化原因 [J]. *湖泊科学*, 2024,36(1):236-246.
- Dong Y Z, Zhang P Y, Li X Y, et al. Spatiotemporal distribution and degradation causes of macroaquatic plants in Qionghai Lake [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2024,36(1):236-246.
- [39] Wang Y, Liu Y, Lu S, et al. Occurrence and ecological risk of pharmaceutical and personal care products in surface water of the Dongting Lake, China-during rainstorm period [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019,26(28):28796-28807.
- [40] 查慧铭,朱梦圆,朱广伟,等.太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析 [J]. *环境科学*, 2018,39(3):1102-1112.
- Zha H M, Zhu M Y, Zhu G W, et al. Analysis of seasonal difference of water quality in the channel and body of Taihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2018,39(3):1102-1112.
- [41] 宋 瑞,冯 珺.中国旅游业复苏研究:理论框架、趋势特征与对策建议 [J]. *旅游论坛*, 2024,17(3):1-12.
- Song R, Feng J. Research on tourism recovery in China: Theoretical framework, trend characteristics and countermeasures [J]. *Tourism Forum*, 2024,17(3):1-12.
- [42] 廖思远,秦延文,刘志超,等.邛海流域设施葡萄园土壤养分与地下水污染特征研究 [J]. *环境工程技术学报*, 2022,12(2):597-606.
- Liao S Y, Qin Y W, Liu Z Q, et al. Study on soil nutrient and groundwater pollution characteristics of facilities vineyards in Qionghai Valley [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022,12(2):597-606.
- [43] 冉 蛟,肖克彦,向 蓉,等.邛海入湖河流水质及其湖区响应特征(2011~2021 年) [J]. *湖泊科学*, 2023,35(6):1960-1969.
- Ran J, Xiao K Y, Xiang R, et al. Water quality of Qionghai Lake and its response characteristics (2011~2021) [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023,35(6):1960-1969.
- [44] 李国展,王晓雨,颜梦霞,等.西昌邛海沉积物重金属含量时空变化与污染评价 [J]. *环境科学*, 2023,44(10):5536-5545.
- Li G Z, Wang X Y, Yan M X, et al. Temporal and spatial variation of heavy metal content and pollution assessment in sediment of Xichang Qionghai Lake [J]. *Environmental Science*, 2023,44(10):5536-5545.
- [45] Pirnia A, Golshan M, DARABI H, et al. Using the Mann-Kendall test and double mass curve method to explore stream flow changes in response to climate and human activities [J]. *Journal of Water and*

- Climate Change, 2019,10(4):725-742.
- [46] 廖思远.邛海流域设施农业氮磷污染特征研究 [D]. 北京:中国环境科学研究院, 2022.
- Liao S Y. Study on nitrogen and phosphorus pollution characteristics of facility agriculture in Qionghai valley [D]. Beijing: Chinese Academy of Environmental Sciences, 2022.
- [47] Liu S, Liu J, Zhao D, et al. Revealing neglected hotspots for China's quality-induced water scarcity [J]. Environmental Research Letters, 2024,19(6):064018.
- [48] 邓超,艾蕾,罗伟,等.邛海湖 2016~2020 年水质评价及变化特征分析 [J]. 四川环境, 2023,42(2):101-108.
- Deng C, Ai L, Luo W, et al. Water quality evaluation and change characteristics of Qionghai Lake from 2016 to 2020 [J]. Sichuan Environment, 2023,42(2):101-108.
- [49] 林洪娟,马兴涛,孙文娟,等.基于改进的水质标识指数法的碧流河水库水质评价 [J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2021,52(6):990-995.
- Lin H J, Ma X T, Sun W J, et al. Water quality evaluation of Biliuhe Reservoir based on improved water quality identification index method [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2021,52(6):990-995.
- [50] Yin X, Yan G, Wang X, et al. Succession Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Communities in Qionghai Lake [J]. Water, 2024,16(2):229.
- [51] Jiao J, Ma Q, Huang S, et al. A hybrid water quality prediction model based on variational mode decomposition and bidirectional gated recursive unit [J]. Water Science and Technology, 2024,89(9):2273-2289.
- [52] 尤本胜,马书占,古小治,等.风浪扰动对太湖梅梁湾水体总磷变化的驱动模式研究 [J]. 环境污染与防治, 2023,45(6):756-764.
- You B S, Ma S Z, Gu X Z, et al. Study on the driving model of wind and wave disturbance on the change of total phosphorus in Meiliang Bay, Taihu Lake [J]. Environmental Pollution & Control, 2023,45(6):756-764.
- [53] 朱伟,侯豪,刘环,等.太湖底泥磷释放量及释放规律的研究综述 [J]. 湖泊科学, 2025,37(1):1-24.
- Zhu W, Hou H, Liu H, et al. Summary of research on phosphorus release quantity and release regularity in sediment of Taihu Lake [J]. Journal of Lake Sciences, 2025,37(1):1-24.
- [54] Ran J, Xiang R, Li J, et al. Spatiotemporal Variations in the Water Quality of Qionghai Lake, Yunnan-Guizhou Plateau, China [J]. Water, 2022,14(15):2451.

作者简介: 方佳卉(2000-)女,安徽池州人,南京信息工程大学硕士研究生,研究方向为流域污染源解析与削减调控.2547788020@qq.com.