

基于 $WQI_{\min}$ 模型的贵州草海水质评价分析

万颖¹, 杜明普¹, 郭艳敏¹, 刘坤云², 孙赫英¹, 王英才¹, 李瑞雯¹

(1.生态环境部长江流域生态环境监督管理局 生态环境监测与科学研究中心, 武汉 430010;

2.贵州省生态环境监测中心, 贵阳 550000)

摘要:草海作为贵州省最大的高原湖泊,近年来因水质问题备受关注.依据2022年1月至2023年3月草海及入湖河流的逐月监测数据,采用水质指数(WQI)法对其水质进行评价.结果表明,草海水体总磷含量较低而总氮含量较高,降雨径流对氮、磷污染贡献较小,研究区域平均WQI值为54.49,水质评价等级以“中等”为主.在时间分布上,8至9月份水质评价结果最佳;在空间分布上,西部区域水质评价结果优于东部区域,入湖河流水质评价结果优于湖区,表明入湖河流对湖区水质影响较小.基于多元线性逐步回归,从14个水质指标中筛选出高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总氮(TN)、悬浮物(SS)、氨氮(NH_4-N)、溶解氧(DO)等5项关键指标,构建了 $WQI_{\min}$ 模型.该模型在训练集和测试集上表现良好,训练集上得到决定系数 $R^2 = 0.846$,均方根误差 $RMSE = 2.09$,百分比误差 $PE = 3.45\%$.研究结果旨在为草海的生态环境管理提供决策依据.

关键词:高原湖泊;草海;水质评价;最简水质综合评价指数($WQI_{\min}$);时空分布特征

中图分类号:X524

文献标志码:A

文章编号:1000-2367(2025)04-0107-11

近年来,随着社会经济发展和人口的增长,大量工业、农业废水和生活污水进入湖泊,导致湖泊水质恶化,对人类健康、生物多样性产生严重威胁^[1-2].水质评价是水环境治理的重要基础之一,旨在通过监测水体的物理、化学和生物指标,采用科学方法对水体污染程度进行综合评估.在此基础上,深入分析污染时空变化特征,识别关键污染因子,并采取针对性的水污染防治措施,具有重要意义^[3].

当前,水质评价方法主要有单因子评价法、主成分分析法、水质综合评价指数法等^[4-6].其中,水质综合评价指数(WQI)法是将各种水质参数整合,得到一个可代表整体水质的无量纲数值,具有充分利用水质参数信息、综合反映水质状况等优点,在水资源管理中发挥着重要的作用^[7-8].然而,WQI法需要考虑大量水质参数,数据处理过程较为复杂.最简水质综合评价指数($WQI_{\min}$)在WQI的基础上,选取有限的关键指标对水质进行评价,能够使分析和监测成本大幅降低^[5,9].研究表明^[9-10],WQI与 $WQI_{\min}$ 具有较强的线性相关性,因此可通过 $WQI_{\min}$ 快速得到WQI.值得注意的是, $WQI_{\min}$ 的关键指标会随着不同区域的水体特征而发生变化.由于所选定关键指标和权重的差异,模型的精确度也会存在一定的差别^[10-11].因此, $WQI_{\min}$ 模型的性能需要根据特定的研究对象进行精准评估.

收稿日期:2024-08-30;**修回日期:**2024-10-23.

基金项目:长江生态环境保护修复联合研究二期项目(2022-LHYJ-02-0601);长江生态环境保护修复城市驻点跟踪研究项目(2022-LHYJ-02-0510-03);国家重点研发计划项目(2021YFC3200105).

作者简介:万颖(1994—),男,湖北安陆人,生态环境部长江流域生态环境监督管理局高级工程师,博士,研究方向为水污染控制理论及技术,E-mail:wanying2024@126.com.

通信作者:李瑞雯(1986—),女,宁夏银川人,生态环境部长江流域生态环境监督管理局高级工程师,博士,研究方向为流域水生态环境保护与修复,E-mail:lrw1986@126.com.

引用本文:万颖,杜明普,郭艳敏,等.基于 $WQI_{\min}$ 模型的贵州草海水质评价分析[J].河南师范大学学报(自然科学版),2025,53(4):107-117.(Wan Ying,Du Mingpu,Guo Yanmin,et al.Evaluation of water quality of Guizhou Caohai based on the $WQI_{\min}$ model[J].Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2025,53(4):107-117.DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2024.08.30.0001.)

草海作为贵州最大的高原天然淡水湖泊,对当地自然和社会环境有着重要影响.当前,草海面临水质富营养化和水生植物衰退等问题,对草海水质时空分布特征进行分析评价,制定针对性的水污染防治措施十分必要.采用基于多项水质指标的 WQI 法对草海水质进行评价,将有助于更加全面地理解草海水质变化规律^[12].而 WQI 与 WQI_{min} 模型用于高原湖泊的水质评价还未见报道.因此,本研究采用单因子评价法探讨了草海水质基本特性,运用 WQI 法揭示了草海及入湖支流水质时空分布规律.在此基础上,结合草海流域特点、气候条件构建仅考虑关键参数的 WQI_{min} 模型,以期降低分析测试成本.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

草海($26^{\circ}47' \sim 26^{\circ}52'N$, $104^{\circ}09' \sim 104^{\circ}20'E$)位于贵州省威宁彝族回族苗族自治县,是一个由水域、沼泽、草甸、林地构成的完整、典型的高原湖泊湿地生态系统,为国家级自然保护区.草海属亚热带高原季风气候,流域年平均气温 $10.9^{\circ}C$,年日照时数介于 $1\,374 \sim 1\,634\,h$ 之间,年均降雨量介于 $626.5 \sim 1\,124.1\,mm$ 之间,丰水期为 $6 \sim 10$ 月份,平水期为 $5、11$ 月份,枯水期为 $1 \sim 4$ 月份与 12 月份.草海流域面积 $96\,km^2$,水域面积 $25\,km^2$,最大水深小于 $5\,m$,属于浅水湖泊.草海表层沉积物氧化还原电位平均值为 $(-102.1 \pm 4.34)\,mV$;底质环境受到历史积累因素的影响,湖区重金属风险指数较高.湖区水生植物以沉水植物和浮叶植物为主,敞水区物种相对较少.汇入草海的河流大多数是发源于泉水的短小河溪,主要有大中河、东山河、白马河和万下河.

1.2 样品采集与检测

研究区域共布设 17 个采样点,其中湖区 13 个采样点,4 条入湖支流各 1 个采样点(如图 1 所示).采样时间为 2022 年 1 月至 2023 年 3 月,按照《水质采样技术指导》(HJ 494-2009)每月采样一次,水质指标为水温(t)、pH 值、溶解氧(DO)、电导率、浊度(Tur)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、化学需氧量(COD_{Cr})、总氮(TN)、硝酸盐氮(NO_3-N)、亚硝酸盐氮(NO_2-N)、氨氮(NH_4-N)、总磷(TP)、悬浮物(SS)、叶绿素 a (Chl a)等 14 个.

pH 值、溶解氧、电导率采用 SX751 型 pH/ORP/电

导率/溶解氧仪测定,浊度采用 WGZ-200 浊度计测定, COD_{Mn} 采用《水质高酸盐指数的测定》(GB/T 11892—89)测定, COD_{Cr} 采用重铬酸盐法(HJ 828-2017)测定,TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636-2012)测定, NH_4-N 采用纳氏试剂分光光度法(HJ 535-2009)测定,TP 采用钼酸铵分光光度法(GB 11893—89)测定, NO_3-N 、 NO_2-N 采用 CIC-D100 离子色谱仪测定(HJ 84-2016),SS 采用重量法(GB 11901—89)测定,Chl a 采用分光光度法(HJ 897-2017)测定.

1.3 WQI 分析方法

本研究采用 WQI 法对水质进行评价,计算公式如下:

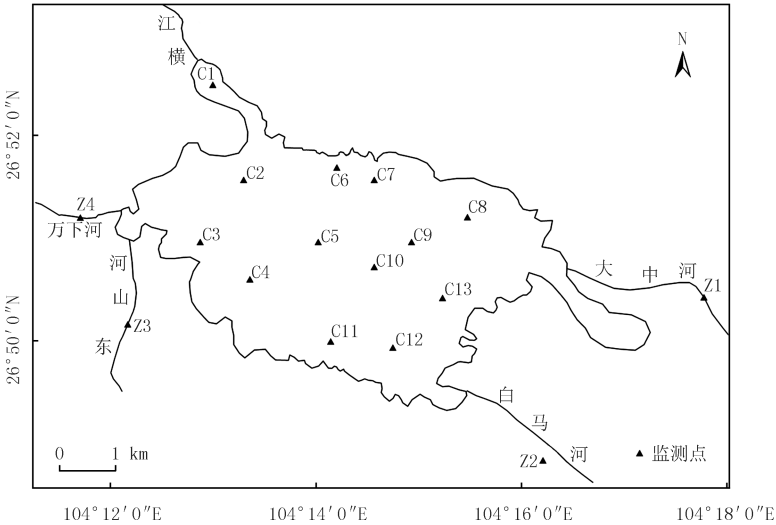


图1 研究区域及水质监测点位置示意图
Fig.1 Location of the study area and water quality monitoring sites

$$WQI = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i P_i)}{\sum_{i=1}^n P_i}, \tag{1}$$

上式中, WQI 为水质综合指数; C_i 为第 i 种水质指标的标准化得分; P_i 为第 i 种水质指标的权重, P_i 的最小值为 1,最大值为 4.基于地表水环境质量标准(GB 3838—2002)以及相关文献,确定各指标的权重^[10,13–14].随后将各指标进行标准化处理, C_i 计算公式如下:

$$C_i = \begin{cases} 100 - [\frac{T_i S_{i,k}}{S_{i,k+n} - S_{i,k}} \times 20n + I_{i,k}], T_i \in [S_{i,k}, S_{i,k+n}), \\ 100 - \frac{T_i}{S_{i,k+n}} \times 20n, T_i \in [0, S_{i,k}), \end{cases} \tag{2}$$

上式中, T_i 为第 i 个指标的实际监测值, $S_{i,k}$ 和 $S_{i,k+n}$ 为第 i 个指标在标准化过程中所处的第 k 和 $k+n$ 级对应的标准化分数, $I_{i,k}$ 为第 i 个指标的归一化值, n 为标准化值相同的个数.值得注意的是,本研究中仅 COD_{Cr} 的第Ⅰ类和第Ⅱ类的标准化值相同, $n=2$,其他情况下 $n=1$.采用多元线性逐步回归法确定 $WQI_{\min}$ 模型的关键参数.基于 $WQI_{\min}$ 值将水质划分为 5 类,(80,100]为优,(60,80]为良,(40,60]为中,(20,40]为差,[0,20]为非常差.采用决定系数(R^2)评估 $WQI_{\min}$ 模型的拟合度,不同模型的预测能力由百分比误差(PE)和均方根误差($RMSE$)判断,二者数值越小,模型准确度越高^[15].采用 2022 年 1 至 12 月份监测数据为 $WQI_{\min}$ 模型训练集数据,2023 年 1 至 3 月份为测试集数据.

表 1 WQI 中各水质因子分数及权重

Tab. 1 Score and weight of various water quality factors in WQI

指标	权重 (P_i)	标准化指标(C_i)				
		20	40	60	80	100
水温/ $^{\circ}C$	1	[15,22)	[12,15);[22,26)	[5,12];[26,30)	[−2,5);[30,36)	[−6,−2];[36,45]
pH	1	—	—	—	—	—
电导率/($\mu S \cdot cm^{-1}$)	1	1 000	1 500	2 500	5 000	12 000
溶解氧/($mg \cdot L^{-1}$)	4	7.5	6.0	5.0	3.0	2.0
浊度/(NTU)	2	5	15	40	65	100
$\rho_{COD_{Mn}}$ /($mg \cdot L^{-1}$)	3	2	4	6	10	15
$\rho_{COD_{Cr}}$ /($mg \cdot L^{-1}$)	4	15	15	20	30	40
ρ_{SS} /($mg \cdot L^{-1}$)	2	5	10	15	20	30
ρ_{TP} /($mg \cdot L^{-1}$)	1	0.02	0.10	0.20	0.30	0.40
ρ_{NH_4-N} /($mg \cdot L^{-1}$)	3	0.15	0.50	1.00	1.50	2.00
ρ_{TN} /($mg \cdot L^{-1}$)	3	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0
ρ_{NO_3-N} /($mg \cdot L^{-1}$)	2	1	3	5	7	10
ρ_{NO_2-N} /($mg \cdot L^{-1}$)	2	0.01	0.10	0.20	0.50	1.00
$\rho_{Chl\ a}$ ($\mu g \cdot L^{-1}$)	3	1	7	15	30	50

注:pH 值在 6~9 之间时,赋分为 100 分,否则为 0.

2 结果与分析

2.1 草海水质特性分析

2022 年草海水质变化特性如图 2 所示.2022 年草海最高水温为 23.18 $^{\circ}C$,最低水温为 2.4 $^{\circ}C$.pH 平均值为 8.37,表明草海水体整体处于碱性状态.年平均溶解氧质量浓度为 6.82 mg/L ,除 2022 年 4 月份与 8 月份外,整体优于Ⅱ类标准.水体电导率在 1~7 月份较高,8~12 月份较低,约为 250 $\mu S/cm$,而浊度在 2 月份最低,随后至 8 月份呈现出增加的趋势,二者可能与夏季降雨量较大有关. COD_{Mn} 年均值为 8.46 mg/L ,总体上

高于Ⅲ类水体标准.值得注意的是,COD_{Cr}年均值为 31.41 mg/L,劣于地表水Ⅳ类水平.湖区 TN 与 NH₄-N 值波动较大,其中 8 月份 NH₄-N 达到最低值.而 Chl *a* 与 TN、NH₄-N 的变化趋势相反,7 月份质量浓度最高为 20.54 μg/L.研究表明,不同湖泊水质特性在丰水期、枯水期存在明显差异,部分湖泊水质在时间上差异不明显,而部分湖泊由于降雨径流污染,导致丰水期水体中氮、磷浓度较高^[16-17].草海 TP 年均浓度为 0.02 mg/L,最大值为 0.09 mg/L,优于Ⅱ类水.与贵州红枫湖、云南滇池等高原湖泊类似,草海呈现出 TP 质量浓度较低,TN 质量浓度较高的特性^[18].将草海 COD_{Cr}、COD_{Mn}、氮、磷等主要单因子指标按照丰水期-平水期-枯水期进行分析,结果如图 3 所示.可以看到,丰水期草海 NH₄-N 值较低,而 TP 在平水期值较高.COD_{Cr} 与 COD_{Mn} 在丰水期相对较高,但显著性分析表明两项指标在丰水期和平水期没有明显差异($p < 0.05$),说明降雨径流污染对湖泊 COD_{Cr}、COD_{Mn} 具有一定贡献,但影响程度有限.

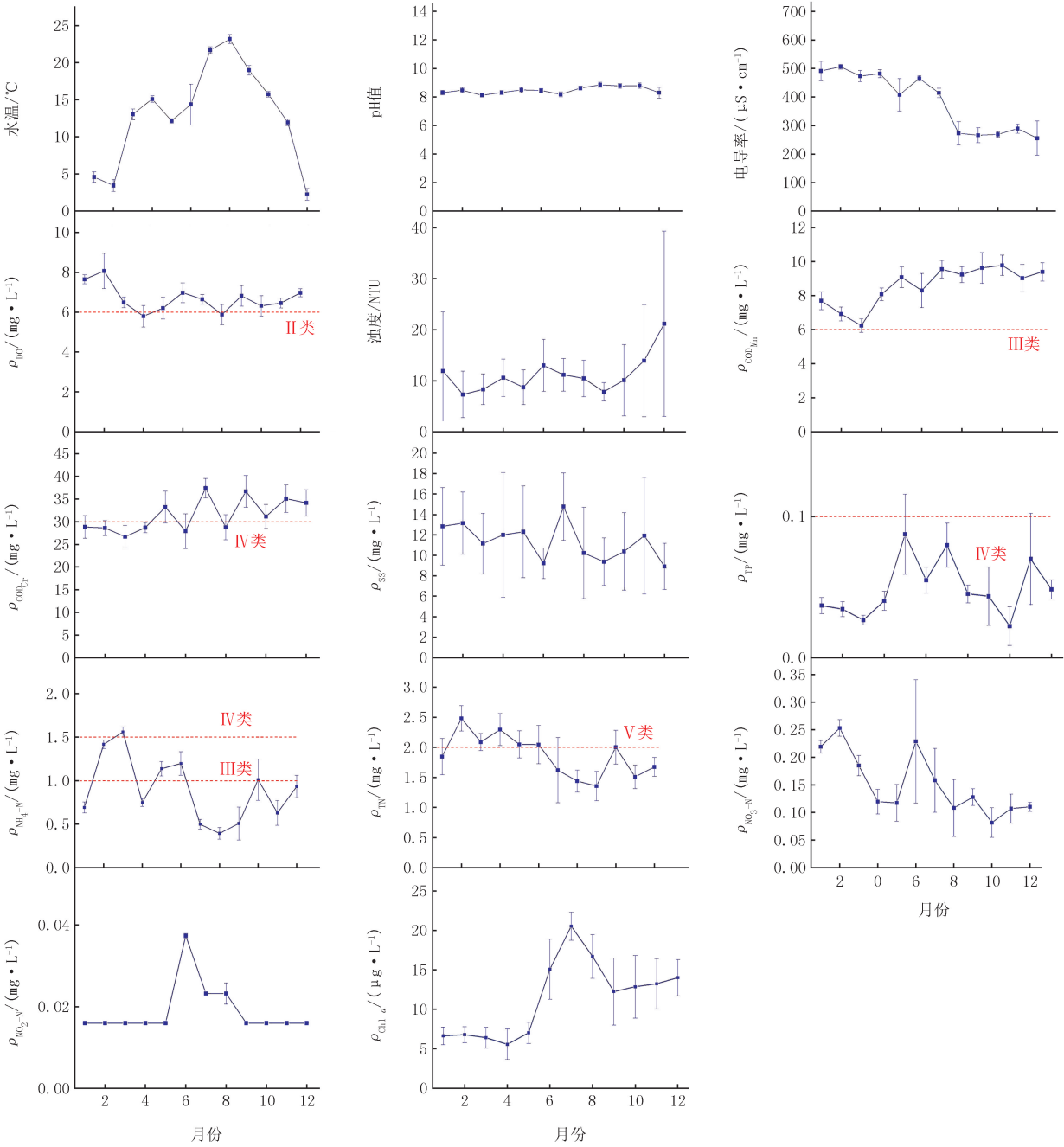
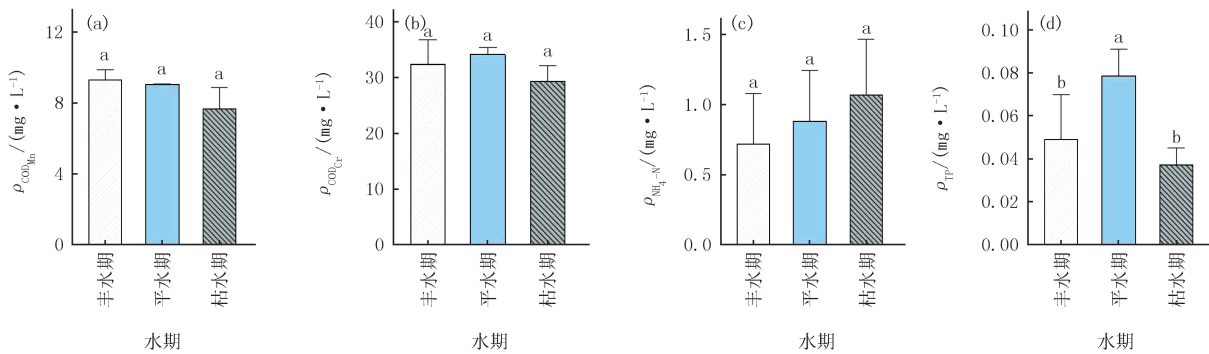


图2 2022年草海基本水质指标变化特征

Fig.2 Variation of water quality indicators in Caohai in 2022



注:同一指标用不同字母表示显著差异 ($p<0.05$)。

图3 2022年不同水期草海主要水质指标分析结果

Fig.3 The analysis of the major water quality indicators in Caohai during different water periods in 2022

2.2 草海及入湖支流 WQI 分析评价

图 4 为湖区不同点位的 WQI 评价时间分布差异.从时间上来看,15 月的平均值均为中等,所有月份的水质指数均值均大于 40.其中,2022 年 1 月份和 9 月份水质评价结果最佳,评分分别为 56.82 和 55.67,5 月份水质评价结果最差,评分仅为 49.83.从 2022 年 1 月份至 7 月份,草海 WQI 呈现出逐渐下降的趋势,随后呈现出升高趋势,在 9 月份达到最佳水平,之后呈降低趋势.

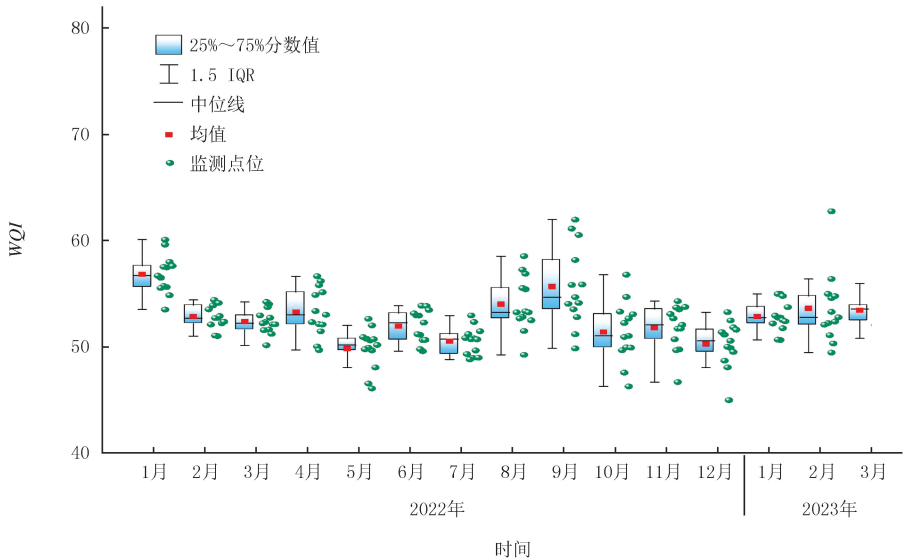


图4 草海湖区 WQI 时间分布差异

Fig.4 Difference in temporal distribution of WQI in Caohai area

如图 5 所示,草海 4 条入湖支流 WQI 指数均值均大于 50.2022 年 1 月份和 3 月份 WQI 指数表现最佳,均值分别为 67.17、68.55.而 4 至 7 月份期间, WQI 降低至较低水平.入湖河流的水质在时间上与草海水质呈现出相同的变化趋势,这可能是由于雨季集中在 4 至 7 月份,降雨径流携带污染物进入河道或湖泊,使水质变差.草海入湖河流流量较小,水体中污染物浓度极易受到降雨的影响,导致 WQI 值随时间波动较大^[19].

草海及入湖支流的 WQI 空间分布如图 6 所示. WQI 指数在空间上的变化较小,不同点位的 WQI 指数均大于 50,评价为中等.其中,点位 C3 和 C4 的 WQI 值较高,分别为 53.36 和 53.29.C8~C13 点位 WQI 指数较低,说明草海西部水质总体上优于东部水质.对 4 条入湖河流而言, WQI 均值 $Z3$ (东山河) $>Z4$ (万下河) $>Z2$ (白马河) $>Z1$ (大中河).其中东山河与万下河水质较为接近, WQI 分别为 63.29、63.26,水质评价为良好;大中河水质最差, WQI 为 56.99,水质评价为中等.研究表明,湖泊水质情况与湖泊周边城市化率、人为活动强度、土地利用类型等因素存在一定的相关性^[19].草海流域东北部区域城市化率较高,污染负荷输出显著高

于西南部区域,导致草海水质污染程度由西向东渐增,城市生活污水的汇入可能是草海富营养化的主要原因^[20].值得注意的是,4 条入湖河流的 WQI 均值显著高于湖区,说明入湖河流水质优于湖区.如表 2 所示,单因子评价得到草海湖区 2022 与 2023 年水质类别均为 V 类,超标因子为 COD_{Cr} ;4 条入湖河流中,大中河和白马河水质较差,2022 与 2023 年水质类别均为 IV 类,入湖支流水质优于湖区水质,该结果与 WQI 评价结果一致.由于草海湿地分布 30 余条入湖沟渠,雨季时地表径流冲刷的污染物可能通过沟渠进入湖泊.此外,草海水生植物近年来大面积退化,其残体沉积于湖底腐烂消解产生的内源污染也可能成为重要的污染源^[21].

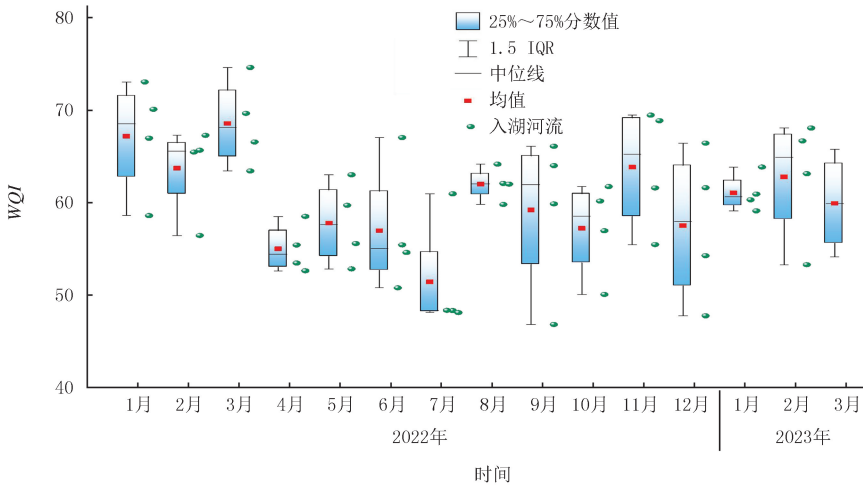


图5 4条入湖河流 WQI 时间分布差异

Fig.5 Difference in temporal distribution of WQI of four rivers entering the lake

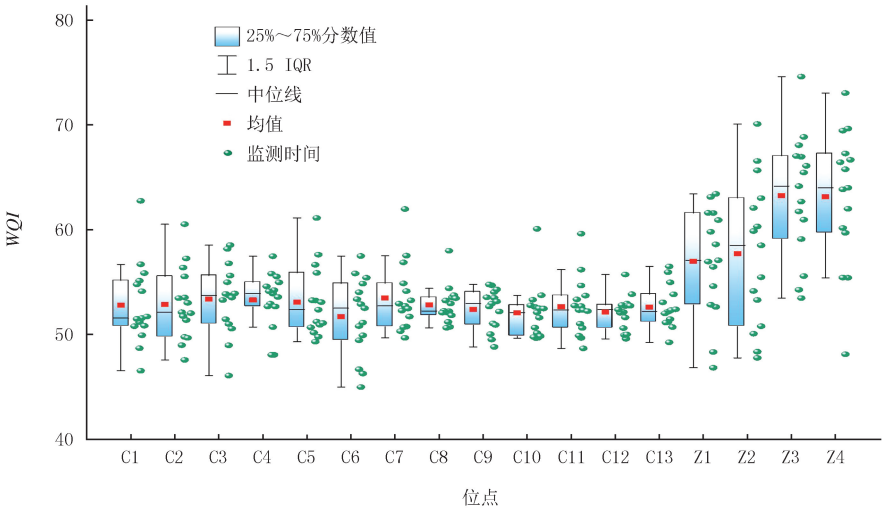


图6 草海及入湖支流 WQI 的空间分布差异

Fig.6 Differences in spatial distribution of WQI in Caohai and rivers entering the lake

2.3 基于 WQI_{min} 的水质分析评价

以 14 个水质指标为自变量,以 WQI 为因变量进行多元线性逐步回归分析,如表 3 所示.可以看到, COD_{Mn} 对 WQI 的贡献最大,能够解释 WQI 变异的 46.4% ($p<0.05$).将 TN 、 SS 、 NH_4-N 纳入模型时,模型的显著性依次增加,分别能解释 WQI 变异的 59.8%、68%、76.4%.而溶解氧、浊度、 $Chl\ a$ 作为模型的第 5、第 6、第 7 参数,模型性能进一步提高 ($R^2=0.873$).

根据多元线性逐步回归的结果,选择 COD_{Mn} 、 TN 、 SS 、 NH_4-N 作为 WQI_{min} 模型的基本参数,溶解氧、浊度、 $Chl\ a$ 作为补充参数.各 WQI_{min} 模型包含的指标如表 4 所示,其在训练集上的表现如图 7 所示.通过比较 $RMSE$ 、 PE 和 R^2 可以发现,随着参数的增多, WQI_{min} 模型的准确性逐步提高.其中,当 WQI_{min2} 增加溶解氧

指标时,模型拟合系数由 0.775 增加到了 0.846,且 $WQI_{\min3}$ 、 $WQI_{\min4}$ 的决定系数均大于 0.8,均表现出良好的预测性能.其中, $WQI_{\min4}$ 表现最佳, $RMSE$ 和 PE 值最低,分别为 1.72、2.44%,决定系数达到 0.895.此外,按照丰水期-平水期-枯水期分别构建了不同水期的 $WQI_{\min}$ 模型,如附录表 S1~S2 所示.结果表明,丰水期 $WQI_{\min}$ 模型中关键参数为 COD_{Mn} 、 NO_2 -N、浊度、SS、 NH_4 -N,此时丰水期 $WQI_{\min}$ 模型 R^2 为 0.744;在平水期, $WQI_{\min}$ 模型中关键参数为 COD_{Mn} 、温度、 NH_4 -N、浊度、SS,当考虑以上参数时,模型 R^2 为 0.900.枯水期 $WQI_{\min}$ 模型中关键参数为 COD_{Mn} 、TN、Chl a 、SS、 NH_4 -N,当考虑以上参数时,模型 R^2 为 0.882.

表 2 2022-2023 年草海及入湖河流主要水质指标平均浓度

Tab. 2 The average concentration of main water quality indicators in Caohai and rivers from 2022 to 2023					
水体	年份	$\rho_{COD_{Cr}}/(mg \cdot L^{-1})$	$\rho_{NH_4-N}/(mg \cdot L^{-1})$	$\rho_{TP}/(mg \cdot L^{-1})$	水质类别
大中河	2022	22.50	0.90	0.09	Ⅳ
	2023	22.92	0.89	0.09	Ⅳ
白马河	2022	29.92	0.72	0.09	Ⅳ
	2023	24.00	0.60	0.09	Ⅳ
东山河	2022	20.20	0.43	0.04	Ⅳ
	2023	14.17	0.33	0.05	Ⅱ
万下河	2022	18.67	0.77	0.06	Ⅲ
	2023	17.40	0.44	0.08	Ⅲ
草海湖区	2022	32.26	0.91	0.04	V
	2023	34.55	0.91	0.04	V

表 3 多元线性逐步回归分析

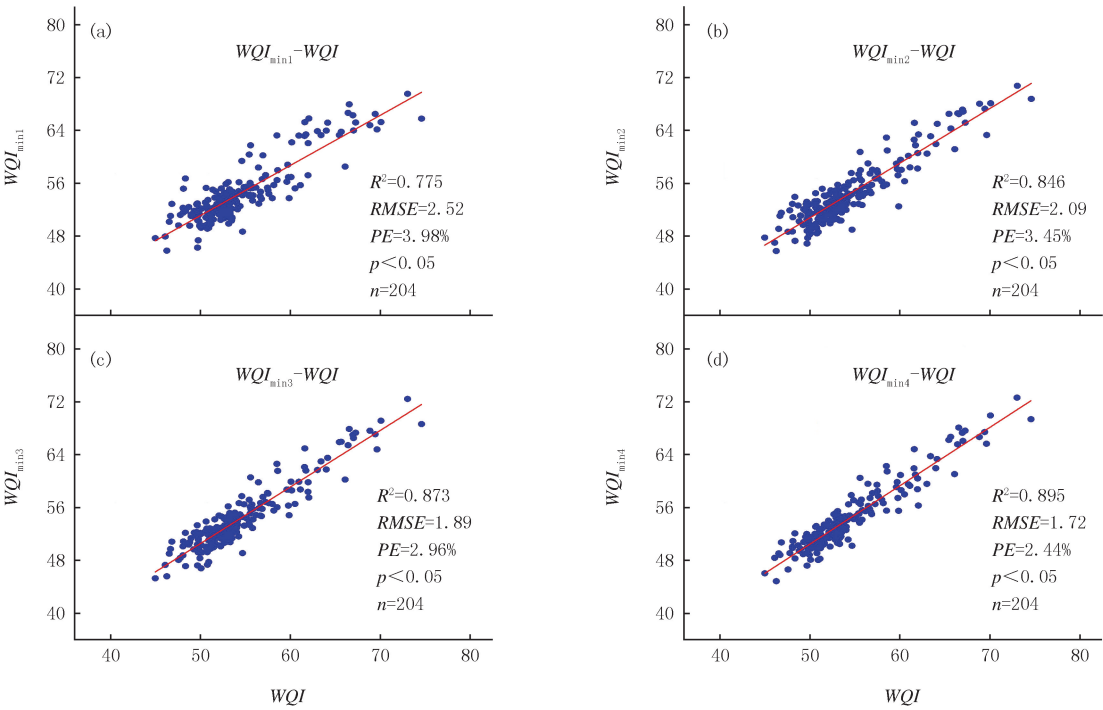
Tab. 3 Multiple linear stepwise regression analysis			
序号	多元线性逐步回归模型	R^2	p
1	$1.484+0.171lg(\rho_{COD_{Mn}}+1)$	0.464	<0.001
2	$1.448+0.184lg(\rho_{COD_{Mn}}+1)+0.023lg(\rho_{TN}+1)$	0.598	<0.001
3	$1.349+0.194lg(\rho_{COD_{Mn}}+1)+0.022lg(\rho_{TN}+1)+0.05lg(\rho_{SS}+1)$	0.680	<0.001
4	$1.241+0.188lg(\rho_{COD_{Mn}}+1)+0.012lg(\rho_{TN}+1)+0.057lg(\rho_{SS}+1)+0.068lg(\rho_{NH_4-N}+1)$	0.764	<0.001
5	$1.017+0.185lg(\rho_{COD_{Mn}}+1)+0.011lg(\rho_{TN}+1)+0.052lg(\rho_{SS}+1)+0.077lg(\rho_{NH_4-N}+1)+0.121lg(\rho_{DO}+1)$	0.817	<0.001
6	$0.921+0.192lg(\rho_{COD_{Mn}}+1)+0.011lg(\rho_{TN}+1)+0.041lg(\rho_{SS}+1)+0.08lg(\rho_{NH_4-N}+1)+0.11lg(\rho_{DO}+1)+0.065lg(Tur+1)$	0.848	<0.001
7	$0.839+0.154lg(\rho_{COD_{Mn}}+1)+0.014lg(\rho_{TN}+1)+0.042g(\rho_{SS}+1)+0.08lg(\rho_{NH_4-N}+1)+0.115lg(\rho_{DO}+1)+0.059lg(Tur+1)+0.079lg(\rho_{Chl_a}+1)$	0.873	<0.001

表 4 不同 $WQI_{\min}$ 模型采用的指标

Tab. 4 Basic parameters of different $WQI_{\min}$ models		
模型序号	模型指标	指标数量
$WQI_{\min1}$	COD_{Mn} 、TN、SS、 NH_4 -N	4
$WQI_{\min2}$	COD_{Mn} 、TN、SS、 NH_4 -N、DO	5
$WQI_{\min3}$	COD_{Mn} 、TN、SS、 NH_4 -N、DO、浊度	6
$WQI_{\min4}$	COD_{Mn} 、TN、SS、 NH_4 -N、DO、浊度、Chl a	7

基于 2023 年 1 至 3 月份数据对 $WQI_{\min}$ 模型进行了验证,如图 8 所示.可以看到,4 个模型在测试集上均表现出良好的拟合效果,其中 $WQI_{\min2}$ 拟合效果最好,具有最高的决定系数($R^2=0.788$), $RMSE=2.68$, $PE=4.66\%$.值得注意的是, $WQI_{\min2}$ 模型在训练集上决定系数 $R^2=0.846$,当继续增加水质指标时,相关性

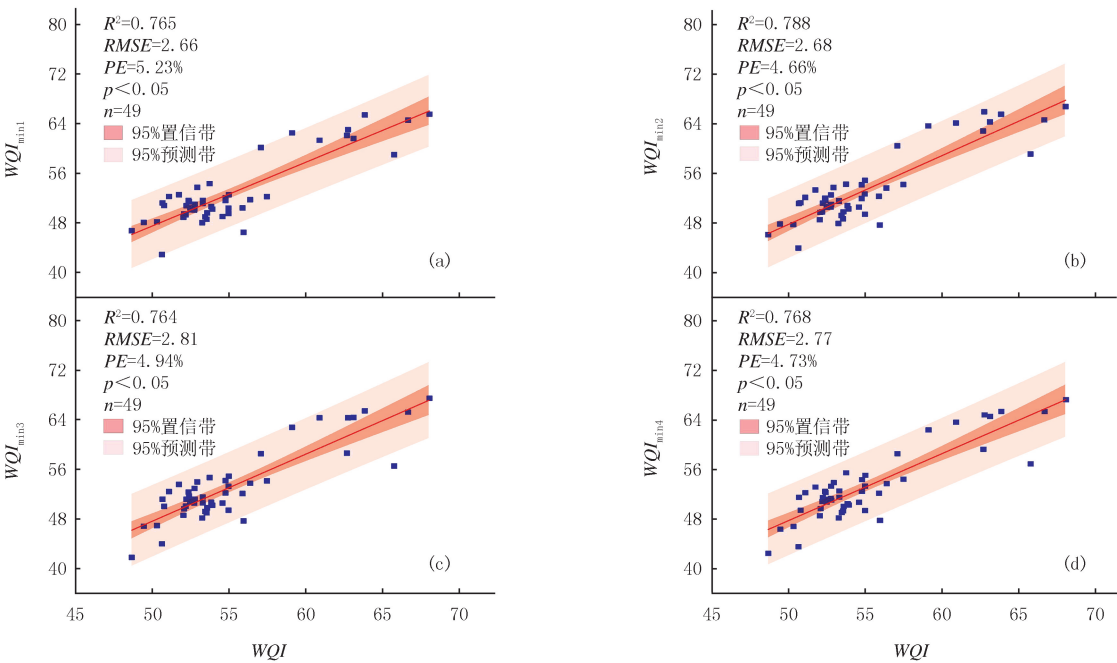
尽管有一定程度的增加,但增加幅度较小;而在测试集上,增加水质指标, WQI_{min3} 与 WQI_{min4} 的准确性略微下降.因此,综合考虑模型精度和监测成本后,可将 WQI_{min2} 作为草海最佳的水质预测模型.



(a) WQI_{min1} 模型; (b) WQI_{min2} 模型; (c) WQI_{min3} 模型; (d) WQI_{min4} 模型.

图7 基于训练集的 WQI_{min} 模型与 WQI 模型拟合结果

Fig.7 Results of fitting the WQI_{min} model to the WQI model based on the training set



(a) WQI_{min1} 模型; (b) WQI_{min2} 模型; (c) WQI_{min3} 模型; (d) WQI_{min4} 模型.

图8 基于测试集的 WQI_{min} 模型与 WQI 模型的拟合结果

Fig.8 Fitting results of WQI_{min} model to WQI model based on test set

3 讨 论

研究表明,评价对象水质特征直接决定 WQI_{min} 模型的关键因子^[14].陈丽华等^[12]采用 TLI 和 PCA 法对草海水质进行分析评价时发现,COD_{Mn} 和 TN 可能是影响草海水质的主要原因.2013 至 2022 年,草海 COD_{Mn}、NH₄-N、TN 显著升高,水质评价结果主要为Ⅳ类,超标因子为 COD_{Mn}、TN^[22].在本研究中,COD_{Mn}、TN 在草海 WQI_{min} 模型中具有最高的解释度.其中,COD_{Mn} 为首要参数,是因为草海水体中 COD_{Mn} 较高.草海沉积物中 TN 含量较高,甚至高于部分典型的富营养化湖泊^[18].因此,TN 作为反映草海水质状况的重要指标,有必要将其纳入 WQI_{min} 模型^[23].在 WQI 模型构建中,选取的 SS 权重 P_i 要小于 NH₄-N 和溶解氧(表 1),但在 WQI_{min} 模型中 SS 具有更高的解释度,说明悬浮物颗粒在草海水质评价中起到重要作用.溶解氧对水生生物生长等复杂的生化过程具有显著影响,能够反映出水体自净能力,是水生态系统的敏感性指标,在草海 WQI_{min} 模型得到了考虑^[24].TP 作为湖泊营养状况评价的重要指标,并未纳入草海 WQI_{min} 模型,是由于草海 TP 质量浓度较低,对评价结果解释力较弱^[25].

WQI 法不仅能定性地评价水质随时间的变化,也能够 在空间上对不同水体断面或入湖河流进行单独评价^[26]. WQI 法对数据有较高的要求,需要尽可能包含全面的监测指标,导致监测成本增加. WQI_{min} 通过筛选能够准确解释水质变化的关键指标,降低了水质监测的复杂性,在一定程度上弥补了 WQI 法的不足.本研究构建的草海 WQI_{min2} 模型中,所选取的 5 个指标均易于监测,有利于当地水质分析评价工作的开展.值得注意的是,水质评估中存在不确定性,主要受采样时间和方式的影响^[15].此外,标准化处理在 WQI 分析中同样具有重要影响,部分指标可以依据国家地表水水质标准(GB 3838—2002)进行评估,部分指标还需要进一步研究,以消除权重和归一化参考范围的影响^[27].总体而言, WQI_{min} 模型的构建和验证过程具有很强的推广性.在后续草海生态环境治理工作中,应重点关注 COD_{Mn}、TN、SS、NH₄-N、DO 等 5 项指标,同时可将浊度、Chl *a* 作为辅助参考指标.在污染源方面,除入湖河流外,环草海沟渠中输入的污染物也需引起关注,并重视湖泊底泥产生的内源污染.

4 结 论

本研究采用 WQI 法对草海水质进行综合评价,筛选得到关键指标并构建 WQI_{min} 模型,得到以下结论:(1)草海水体中 TP 质量浓度较低,TN 质量浓度较高.此外,水体中 COD_{Cr} 质量浓度长期高于地表水Ⅳ类水平.(2) WQI 评价表明草海和入湖河流水质呈现出季节性变化,总体上评价为“中等”水平,其中 8 至 9 月份水质评价结果最优.而草海 4 条主要入湖支流的 WQI 评价结果优于草海湖区,表明入湖河流对草海水质影响较小.(3)研究提出草海 WQI_{min} 模型,关键水质指标包括 COD_{Mn}、TN、SS、NH₄-N、溶解氧等. WQI_{min} 模型在水质评价方面表现出优异的性能.

附录见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2024.08.30.0001).

参 考 文 献

[1] GIRI S. Water quality prospective in twenty first century: status of water quality in major river basins, contemporary strategies and impediments: a review[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 271: 116332.

[2] 宋高飞,朱宇轩,米武娟,等.武汉市湖泊浮游动物群落特征及其影响因素[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(3): 135-142.

SONG G F, ZHU Y X, MI W J, et al. Characteristics of zooplankton community and their influencing factors in lakes of Wuhan[J]. *Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition)*, 2022, 50(3): 135-142.

[3] HUANG Y K, WANG X Y, XIANG W J, et al. Forward-looking roadmaps for long-term continuous water quality monitoring: bottlenecks, innovations, and prospects in a critical review[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(9): 5334-5354.

[4] YAN T, SHEN S L, ZHOU A N. Indices and models of surface water quality assessment: Review and perspectives[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 308: 119611.

[5] WU T, WANG S R, SU B L, et al. Understanding the water quality change of the Yilong Lake based on comprehensive assessment meth-

- ods[J].Ecological Indicators,2021,126:107714.
- [6] 刘宇,吉正元,刘淑娟,等.三种方法在高原湖泊水质评价中的应用与比较[J].海洋湖沼通报,2020,42(2):166-174.
LIU Y,JI Z Y,LIU S J,et al.Application and comparison of three methods in water quality evaluation of plateau lakes[J].Transactions of Oceanology and Limnology,2020,42(2):166-174.
- [7] UDDIN M G,NASH S,RAHMAN A,et al.A comprehensive method for improvement of water quality index(WQI) models for coastal water quality assessment[J].Water Research,2022,219:118532.
- [8] WU Z S,LAI X J,LI K Y.Water quality assessment of rivers in Lake Chaohu Basin(China) using water quality index[J].Ecological Indicators,2021,121:107021.
- [9] 朱长军,赵方星,李步东,等.基于主成分分析及 WQI_{min} 的大黑汀水库水质评价[J].河南师范大学学报(自然科学版),2021,49(3):52-58.
ZHU C J,ZHAO F X,LI B D,et al.Water quality evaluation of Daheiting reservoir based on principal component analysis and WQI_{min} [J].Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2021,49(3):52-58.
- [10] 程鹏,孙明东,郝韶楠.基于最简水质综合评价指数的官厅水库上游河流水质评价[J].生态环境学报,2023,32(2):372-380.
CHENG P,SUN M D,HAO S N.Water quality assessment of upstream rivers of Guanting Reservoir based on the simplest water quality index[J].Ecology and Environmental Sciences,2023,32(2):372-380.
- [11] 杨列,闫霄珂,刘艳丽,等.基于 WQI_{min} 模型的武汉市金银湖水质时空特性[J].长江科学院院报,2022,39(4):49-55.
YANG L,YAN X K,LIU Y L,et al.Analyzing spatio-temporal characteristics of water quality in Jinyin Lake using water quality crucial index(WQI_{min})[J].Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2022,39(4):49-55.
- [12] 陈丽华,喻记新,李丽,等.基于 TLI 和 PCA 的贵州草海水质状况评价[J].长江科学院院报,2018,35(8):40-45.
CHEN L H,YU J X,LI L,et al.Water quality assessment of Caohai Lake in Guizhou based on trophic state index and principal component analysis[J].Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2018,35(8):40-45.
- [13] HOU W,SUN S H,WANG M Q,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.
- [14] 唐琦,刘兵,王璞,等.改进 WQI 在川中丘陵地区典型流域水质评价中的应用:以琼江流域上游段为例[J].环境工程技术学报,2022,12(2):615-623.
TANG Q,LIU B,WANG P,et al.Application of improved WQI model in water quality assessment of typical watershed in the hilly area of central Sichuan Province:a case study in the upper reaches of Qiongzhang River Basin[J].Journal of Environmental Engineering Technology,2022,12(2):615-623.
- [15] WU Z S,WANG X L,CHEN Y W,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] 杨水化,彭正洪,焦洪赞,等.城市富营养化湖泊的外源污染负荷与贡献解析:以武汉市后官湖为例[J].湖泊科学,2020,32(4):941-951.
YANG S H,PENG Z H,JIAO H Z,et al.External pollution source load and contribution of urban eutrophic lakes:Taking Lake Houguanhu of Wuhan as an example[J].Journal of Lake Sciences,2020,32(4):941-951.
- [17] 刘发根,李梅,郭玉银.鄱阳湖水质时空变化及受水位影响的定量分析[J].水文,2014,34(4):37-43.
LIU F G,LI M,GUO Y Y.Spatial-temporal variation of water quality and water level effect on water quality in Poyang Lake[J].Journal of China Hydrology,2014,34(4):37-43.
- [18] 周茜,彭秋萧,张才巧,等.贵州草海沉积物中养分的空间分布与评价[J].西南大学学报(自然科学版),2021,43(11):33-39.
ZHOU X,PENG Q X,ZHANG C Q,et al.Spatial distribution and evaluation of nutrients in the sediments of Caohai in Guizhou[J].Journal of Southwest University(Natural Science Edition),2021,43(11):33-39.
- [19] 于超,储金字,白晓华,等.洱海入湖河流弥苴河下游氮磷季节性变化特征及主要影响因素[J].生态学报,2011,31(23):119-126.
YU C,CHU J Y,BAI X H,et al.Seasonal variation of nitrogen and phosphorus in Miju River and Lake Erhai and influencing factors[J].Acta Ecologica Sinica,2011,31(23):119-126.
- [20] 周晨,喻理飞,蔡国俊,等.草海高原湿地湖泊水质时空变化及水质分区研究[J].水生态学杂志,2016,37(1):24-30.
ZHOU C,YU L F,CAI G J,et al.Spatial-temporal variation of water quality in Caohai Lake[J].Journal of Hydroecology,2016,37(1):24-30.
- [21] ZHAO B,HU Y S,YU H R,et al.A method for researching the eutrophication and N/P loads of plateau lakes:Lugu Lake as a case[J].Science of The Total Environment,2023,876:162747.
- [22] 徐林,郭艳敏,刘迪,等.2013—2022 年贵州草海水质变化与影响因素分析[J].环境保护科学,2024,50(5):127-133.
XU L,GUO Y M,LIU D,et al.Temporal and influencing factors of Caohai water quality from 2013 to 2022[J].Environmental Protection Science,2024,50(5):127-133.
- [23] 田瑜,赵海丽,常艳文,等.基于 PCA- WQI_{min} 模型的汤河水库水质评价[J].四川环境,2023,42(3):123-129.
TIAN Y,ZHAO H L,CHANG Y W,et al.Water quality assessment of Tanghe Reservoir based on PCA and WQI_{min} model[J].Sichuan Environment,2023,42(3):123-129.

[24] QI J H, YANG L Y, LIU E F. A holistic framework of water quality evaluation using water quality index(WQI) in the Yihe River(China) [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(53): 80937-80951.

[25] ALI TURAN KOÇER M, SEVGILI H. Parameters selection for water quality index in the assessment of the environmental impacts of land-based trout farms[J]. Ecological Indicators, 2014, 36: 672-681.

[26] VASISTHA P, GANGULY R. Water quality assessment of natural lakes and its importance; an overview[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 32: 544-552.

[27] NONG X Z, SHAO D G, ZHONG H, 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.

Evaluation of water quality of Guizhou Caohai based on the $WQI_{\min}$ model

Wan Ying¹, Du Mingpu¹, Guo Yanmin¹, Liu Kunyun², Sun Heying¹, Wang Yingcai¹, Li Ruiwen¹

(1. Ecology and Environment Monitoring and Scientific Research Center, Changjiang Basin Ecology and Environment Administration, Ministry of Ecology and Environment, Wuhan 430010, China; 2. Guizhou Ecological Environment Monitoring Center, Guiyang 550000, China)

Abstract: Caohai, the largest plateau lake in Guizhou Province, has garnered significant attention due to recent water quality deterioration. This study assessed water quality of Caohai using the water quality index (WQI) method, analyzing month-to-month monitoring data spanning January 2022 to March 2023 from Caohai lake and rivers entering the lake. Results indicated a low total phosphorus (TP) content but high total nitrogen (TN) levels in the lake, with rainfall runoff contributing relatively minimally to nitrogen and phosphorus pollution. The average WQI value across the study area was 54.49, reflecting a "medium" water quality evaluation grade. Temporally, the best water quality evaluation results were presented from August to September. Spatially, the western region exhibited superior water quality compared to the eastern area, and inlet rivers showed better evaluations than the lake, which exerted lesser influence on lake water quality. Employing stepwise multiple linear regression, 5 key indicators, including permanganate index (COD_{Mn}), total nitrogen (TN), suspended solids (SS), ammonia nitrogen (NH_4-N), dissolved oxygen (DO), were selected from 14 water quality indicators, establishing the minimum comprehensive water quality index ($WQI_{\min}$) model. The model demonstrated robust predictive capabilities in both the training and test sets, showing an excellent fit ($R^2=0.846$) with low root mean square error ($RMSE=2.09$) and a percentage error ratio of 3.45% in the training set. The results of the study are intended to provide a decision-making basis for the ecological management of the Caohai.

Keywords: plateau lake; Caohai; water quality assessment; minimum comprehensive water quality index ($WQI_{\min}$); spatial and temporal distribution characteristics

[责任编辑 赵晓华 刘洋]

表 S1 丰水期多元线性逐步回归分析

Tab. S1 Stepwise multiple linear regression analysis during the flood season

序号	多元线性逐步回归模型	R^2	p
1	$1.547+0.131\lg(\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}+1)$	0.333	<0.001
2	$1.163+0.153\lg(\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}+1)+0.188\lg(\rho_{\text{NO}_2\text{-N}}+1)$	0.525	<0.001
3	$-0.852+0.160\lg(\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}+1)+0.147\lg(\rho_{\text{NO}_2\text{-N}}+1)+1.056\lg(Tur+1)$	0.611	<0.001
4	$-0.656+0.156\lg(\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}+1)+0.125\lg(\rho_{\text{NO}_2\text{-N}}+1)+0.939\lg(Tur+1)+0.046\lg(\rho_{\text{SS}}+1)$	0.669	<0.001
5	$-0.343+0.156\lg(\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}+1)+0.127\lg(\rho_{\text{NO}_2\text{-N}}+1)+0.704\lg(Tur+1)+0.059\lg(\rho_{\text{SS}}+1)+0.074\lg(\rho_{\text{NH}_4\text{-N}}+1)$	0.744	<0.001

表 S2 平水期多元线性逐步回归分析

Tab. S2 Stepwise multiple linear regression analysis during the medium flow season

序号	多元线性逐步回归模型	R^2	p
1	$1.432+0.202\lg(\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}+1)$	0.652	<0.001
2	$0.883+0.152\lg(\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}+1)+0.345\lg(t+1)$	0.770	<0.001
3	$0.865+0.137\lg(\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}+1)+0.292\lg(t+1)+0.080\lg(\rho_{\text{NH}_4\text{-N}}+1)$	0.820	<0.001
4	$0.490+0.141\lg(\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}+1)+0.303\lg(t+1)+0.117\lg(\rho_{\text{NH}_4\text{-N}}+1)+0.158\lg(Tur+1)$	0.883	<0.001
5	$0.537+0.151\lg(\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}+1)+0.273\lg(t+1)+0.107\lg(\rho_{\text{NH}_4\text{-N}}+1)+0.138\lg(Tur+1)+0.026\lg(\rho_{\text{SS}}+1)$	0.900	<0.001

表 S3 枯水期多元线性逐步回归分析

Tab. S3 Stepwise multiple linear regression analysis during the dry season

序号	多元线性逐步回归模型	R^2	p
1	$1.398+0.225\lg(\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}+1)$	0.520	<0.001
2	$1.409+0.208\lg(\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}+1)+0.028\lg(\rho_{\text{TN}}+1)$	0.693	<0.001
3	$1.145+0.107\lg(\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}+1)+0.035\lg(\rho_{\text{TN}}+1)+0.233\lg(\rho_{\text{Chl}_a}+1)$	0.766	<0.001
4	$1.051+0.129\lg(\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}+1)+0.031\lg(\rho_{\text{TN}}+1)+0.231\lg(\rho_{\text{Chl}_a}+1)+0.039\lg(\rho_{\text{SS}}+1)$	0.823	<0.001
5	$1.024+0.148\lg(\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}+1)+0.018\lg(\rho_{\text{TN}}+1)+0.169\lg(\rho_{\text{Chl}_a}+1)+0.051\lg(\rho_{\text{SS}}+1)+0.06\lg(\rho_{\text{NH}_4\text{-N}}+1)$	0.882	<0.001