

基于 3 种富营养化评价方法的锦江河水质风险评估

张 友, 郭子栋, 李千蓉, 强小燕, 田 丹 (铜仁职业技术学院, 贵州铜仁 554300)

摘要 以铜仁市锦江河为例, 采集并分析水体理化指标, 运用卡尔森营养状态指数(TSI)、修正的营养状态指数(TSIM)、综合营养状态指数(TLI)3 种方法评价其锦江河水体营养富化水平, 并且通过数理统计分析方法, 分析不同评价方法之间的差异以及环境因子对评价方法的影响。结果表明: 评价方法不同, 导致水体富营养化评价结果不同, 锦江河水体按照 TSI、TSIM 和 TLI 评价方法, 其结果分别为贫营养、富营养和中营养水平。单因素方差分析表明, TSIM 与 TSI 和 TLI 差异显著($P<0.05$), TSI 与 TLI 差异不显著($P>0.05$); 相关分析表明, Chl-a 与 TSI、TSIM 呈现显著正相关($P<0.05$), TN 和 TP 与 TLI 呈现显著正相关($P<0.05$)。TSI 和 TSIM 主要表征藻类的生长状况, TLI 则更加专注于氮和磷水平。综合而言, 相较于 TSI 和 TSIM 法, TLI 采用多种环境因子的加权方式, 更能科学地反映水体的富营养化状态。

关键词 富营养化; 评价方法; 水质; 风险评估; 锦江河

中图分类号 X 824 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2024)22-0066-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2024.22.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Risk Assessment of Water Quality in Jinjiang River Based on Three Nutrient Enrichment Evaluation Methods

ZHANG You, GUO Zi-dong, LI Gan-rong et al (Tongren Polytechnic College, Tongren, Guizhou 554300)

Abstract Taking Jinjiang River in Tongren City as an example, the physicochemical indicators of the water body were collected and analyzed. Three methods, Carlson's trophic state index (TSI), modified trophic state index (TSIM) and trophic level index (TLI), were used to evaluate the nutrient enrichment level in Jinjiang River water. Mathematical statistical analysis was used to examine differences between the different evaluation methods and the influence of environmental factors on them. The results showed that different evaluation methods lead to different results in eutrophication assessment of water bodies. According to TSI, TSIM and TLI evaluation methods, the results of Jinjiang River water body were assessed as having oligotrophic, eutrophic and mesotrophic conditions, respectively. Single-factor analysis of variance showed that a significant difference between TSIM and TSI/TLI ($P<0.05$), while no significant difference was observed between TSI and TLI ($P>0.05$). Correlation analysis showed Chl-a was significantly positively correlated with TSI and TSIM ($P<0.05$), while TN and TP were significantly positively correlated with TLI ($P<0.05$). TSI and TSIM mainly characterized the growth status of algae, while TLI focused more on nitrogen and phosphorus levels. Overall, compared to TSI and TSIM methods, TLI adopted a weighted approach of multiple environmental factors, which could more scientifically reflect the eutrophication status of water bodies.

Key words Eutrophication; Evaluation method; Water quality; Risk assessment; Jinjiang River

水体富营养化是水生生态系统和饮用水安全的严重威胁, 是全球水污染和生态退化的主要原因之一^[1-2]。因此, 针对水体富营养化的研究长期以来一直是水生态环境领域研究的重点^[3-4]。喀斯特地区占地球陆地面积的 12%, 其含水层为世界人口的 20%~25% 提供了供水^[5]。中国西南喀斯特地区是世界上分布最广泛的喀斯特地区, 影响着长江流域数亿人的饮用水安全^[6]。西南喀斯特地区是水土流失和面源污染重要的发生区^[7], 大量营养物质随着地表径流、泥沙进入湖泊, 造成受纳水体严重的水质污染和富营养化, 对城市、农村居民饮用水安全产生极大威胁与危害^[8-9]。因此, 定期对河流水体富营养化状况评估是确保水资源管理和生态保护的关键步骤。富营养化是大量营养物种输入水体, 导致藻类和其他水生植物快速生长的现象。富营养化通常与过多的氮、磷等营养物质输入有关^[10]。定期监测水体指标实施有助于及时发现水体富营养化问题, 为采取有效的保护和修复措施提供科学依据。

目前, 我国对水体富营养化的评价采用了多种方法, 其中包括评分法、卡尔森营养状态指数(TSI)、修正的营养状态指数(TSIM)、综合营养状态指数(TLI)和营养度指数法

等^[11-12]。这些方法在实际工作中得到广泛应用, 但存在描述方法不一致、水体富营养化评价方法和指标的差异较大、分级评价标准的差异显著等问题, 这导致同一湖泊在不同方法下的富营养化评价结果差异较大, 同时, 不同区域水体之间的评价结果缺乏可比性。为解决这些问题, 有必要统一湖泊富营养化评价的指标、方法和分级标准。以往的研究主要基于单一评价方法, 缺乏对不同方法的比较研究^[13]。通过比较不同方法的适用性和局限性, 科学家和水资源管理者能够更好地了解各方法的特点, 并选择最适合特定情境的评价方法。这种比较研究有助于确立一套更为一致和可比的水体富营养化评价标准, 提高评价结果的准确性和可信度。该研究以锦江河为研究对象, 采用 TSI、TSIM、TLI 这 3 种水体富营养化评价方法, 深入了解锦江河的水体富营养化状态, 比较不同评价方法在锦江河富营养化程度方面的差异, 揭示评价结果的一致性和异同之处, 为选择合适的评价方法提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 锦江河, 又被称为辰水或麻阳河, 是古武陵五溪之一, 锦江河作为铜仁市的母亲河, 位于贵州省东部, 贯穿湖南省西部。该河流发源于铜仁梵净山, 蜿蜒流经包括麻阳郭公坪、锦和、高村、吕家坪在内的 13 个乡镇, 全长共计 117 km, 流域面积为 7 558 km²^[14]。在铜仁市境内长达 144 km, 多年平均流量为 180 m³/s, 河流自然落差 657 m, 平

基金项目 铜仁职业技术学院人文社会科学资助项目(TZKY2018-SK10)。

作者简介 张友(1990—), 男, 土家族, 贵州思南人, 讲师, 博士, 从事面源污染及生态重建方面的研究。

收稿日期 2024-01-12

均比降为 2.26%。研究区属于亚热带季风气候,年平均气温为 16.9 ℃,年降雨量在 1 250~1 400 mm^[15]。锦江河流域地处武陵山脉南缘、贵州高原向湘西丘陵过渡的斜坡地,在地质构造上属于扬子准地台贵阳复杂变形区的东缘。该地区的出露地层以寒武系中上统娄山关群和下统清虚洞组的白云岩、灰岩为主,岩溶地貌十分显著,表现为丰富的峰丛、洞穴、洼地、裂隙和峡谷等地貌特征^[16]。2009 年,锦江河经过农业部的评审,被认定为国家第三批水产种质资源保护区。然而,伴随着铜仁市工业化和城镇化的快速发展,环境问题日益突出。污染物质经农田径流、雨水径流等方式进入水体,不仅对水体质量产生直接影响,还可能对水体生态系统构成威胁^[17-18]。

1.2 样品采集与保存 于 2022 年 6 月,利用 GPS 全球定位系统在锦江河分别布设 A(小江口)、B(下南门)、C(三中)、D(水晶阁)、E(清水桥)、F(三江公园)、G(鹭鸶岩)7 个样点。采集锦江河表层(0~0.5 m)水,水样采集后装入冰盒中带回实验室低温保存,测定各项指标。

1.3 水体理化性质测定 采用 YSI 6600V2 型多参数水质分析仪现场测定锦江河水温(T)、pH、溶解氧(DO),采用分光光度法测定水体叶绿素 a(Chl-a)含量;水体化学需氧量(COD)采用高锰酸钾指数法测定,水体总氮(TN)采用碱性过硫酸钾氧化-磷钼蓝比色法测定,水体钾(K)采用原子吸收火焰光度法测定,水体透明度(SD)采用塞氏盘法测定,水体总磷(TP)采用钼酸铵分光光度法测定。

1.4 水体富营养化评价方法

1.4.1 卡尔森营养状态指数(TSI)。TSI 是以水体透明度(SD)指标为基准,并结合总磷和叶绿素 a 指标评价水体营养状态的评价指数。其计算公式如下:

$$TSI(SD)=10\times(6-\ln SD/\ln 2)$$
 (1)

$$TSI(Chl-a)=10\times[6-(2.04-0.68\ln Chl-a)/\ln 2]$$
 (2)

$$TSI(TP)=10\times[6-(\ln 48/TP)/\ln 2]$$
 (3)

式中:TSI 为卡尔森营养状态指数;SD 为水体实测透明度(m);Chl-a 为水体中实测叶绿素 a 含量(mg/L);TP 为水体实测总磷含量(mg/L)。其中,TSI<40 为贫营养,40≤TSI<50 为中营养,50≤TSI<60 为中富营养,TSI≥60 为富营养。

1.4.2 修正的营养状态指数(TSIM)。TSIM 是以水体实测叶绿素 a 含量为基准的营养状态指数。计算公式如下:

$$TSIM(Chl-a)=10\times[2.46+(\ln Chl-a/\ln 2.5)]$$
 (4)

$$TSIM(SD)=10\times[2.46+(3.69-1.53\ln SD/\ln 2.5)]$$
 (5)

$$TSIM(TP)=10\times[2.46+(6.71+1.15\ln TP)/\ln 2.5]$$
 (6)

其中,TSIM<30 为贫营养,30≤TSIM≤50 为中营养,50<TSIM≤100 为富营养。

1.4.3 综合营养状态指数(TLI)。计算公式如下:

$$TLI=\sum_{j=1}^m[W_j\times TLI(j)]$$
 (7)

式中:TLI(j)为第 j 种指标参数的营养状态指数;W_j 为第 j 种指标参数的营养状态指数的相关权重。

以 Chl-a 作为基准指标参数,则第 j 种参数的归一化的相关权重表达为:

$$W_j=r_{ij}^2/\sum_{j=1}^mr_{ij}^2$$
 (8)

式中:r_{ij}为第 j 种参数与基准参数 Chl-a 的相关系数;m 为评价指标参数的数目。

各指标营养状态指数计算公式如下:

$$TLI(Chl-a)=10\times(2.5+1.086\ln Chl-a)$$
 (9)

$$TLI(TP)=10\times(9.436+1.624\ln TP)$$
 (10)

$$TLI(TN)=10\times(5.453+1.694\ln TN)$$
 (11)

$$TLI(SD)=10\times(5.118-1.94\ln SD)$$
 (12)

$$TLI(SOD)=10\times(0.109+2.661\ln SOD)$$
 (13)

采用 0~100 的一系列连续数字对锦江河水体营养状态进行评价分级,见表 1。

表 1 TLI 对应水体营养状态评价分级
Table 1 Classification of TLI corresponding to water body nutritional status evaluation

等级 Grade	TLI	富营养化程度 Degree of eutrophication
1	TLI<30	贫营养
2	30≤TLI≤50	中营养
3	50<TLI≤60	轻度富营养
4	60<TLI≤70	中度富营养
5	70<TLI≤100	重度富营养

1.5 数据处理 通过 Excel 2007、SPSS 19.0 和 Origin 2022 软件对试验数据进行统计分析。运用单因素方差分析(one-way ANOVA)方法对试验数据进行差异比较,设置差异显著水平为 P<0.05。

2 结果与分析

2.1 锦江河水体基本理化性质 水体的理化性质是水体一系列错综复杂的理化变化因素,影响着水体中生物的生长和繁殖过程。锦江河水体基本理化参数如图 1 所示。水体温度为 18.69~22.81 ℃,均值为 19.35 ℃;溶解氧(DO)为 0.45~1.19 mg/L,均值为 1.00 mg/L;水体 pH 为 7.93~9.16,均值为 8.39;Chl-a 为 0.71~1.76 mg/L,均值为 1.33 mg/L;COD 为 1.25~2.51 mg/L,均值为 1.94 mg/L。氮、钾和磷元素是水生生态系统中最主要的营养元素,是初级生产力的生源要素,也是生物生长的必需元素。锦江河水体 TN、TP 的含量分别是 0.53~2.16、0.74~1.82 mg/L,均值分别为 1.05、0.91 mg/L;水体钾含量为 1.95~4.53 mg/L,均值为 3.16 mg/L。SD 作为藻类初级生产力指标,是评价环境水质的重要指标,锦江河水体的 SD 为 0.71~1.44 m,均值为 1.04 m。

2.2 锦江河富营养化风险评价 准确评估和掌握水体富营养化状态,有助于了解水体养分的分布和来源,为水资源的可持续管理提供依据,是科学制定相应的水质保护和治理策略前提^[19]。从锦江河水体富营养化评价结果(表 2)可以看出,TSI 在 28.63~35.48,均值为 32.10,锦江河水质整体处于贫营养水平。TSIM 在 59.34~66.07,均值为 63.07,按照 TSIM 评价方法,锦江河水质各样点均处于富营养水平。TLI 在 22.33~60.51,均值为 35.77,57.14%采样点处于中营养水平,28.57%采样点处于贫营养水平,14.29%采样点处于中度富营

养水平,水质整体处于中营养水平。不同评价方法单因素方差分析显示(图2),TSIM与TSI与TLI之间差异显著($P<0.05$),TSI与TLI之间差异不显著($P>0.05$);评价方法不同,导致水体富营养化评价结果不同,但TSI和TLI差异不明显。TSI和TSIM都是基于SD、Chl-a、TP这3个指标的评价方法,其区别2种评价方法的评价基准不同,TSIM是以Chl-a

为基准的营养状态指数,TSI是以SD为基准的营养状态指数。TLI评价指标基于Chl-a、SD、TN、TP和COD这5项指标参数,采用相关加权营养状态指数法,通过相关因子加权营养状态法判断湖库所处的营养状态。与TSI和TSIM相比,TLI考虑的影响因素较多,是一个综合的评价过程,能够比较科学地反映湖泊、河流水体的富营养化状态。

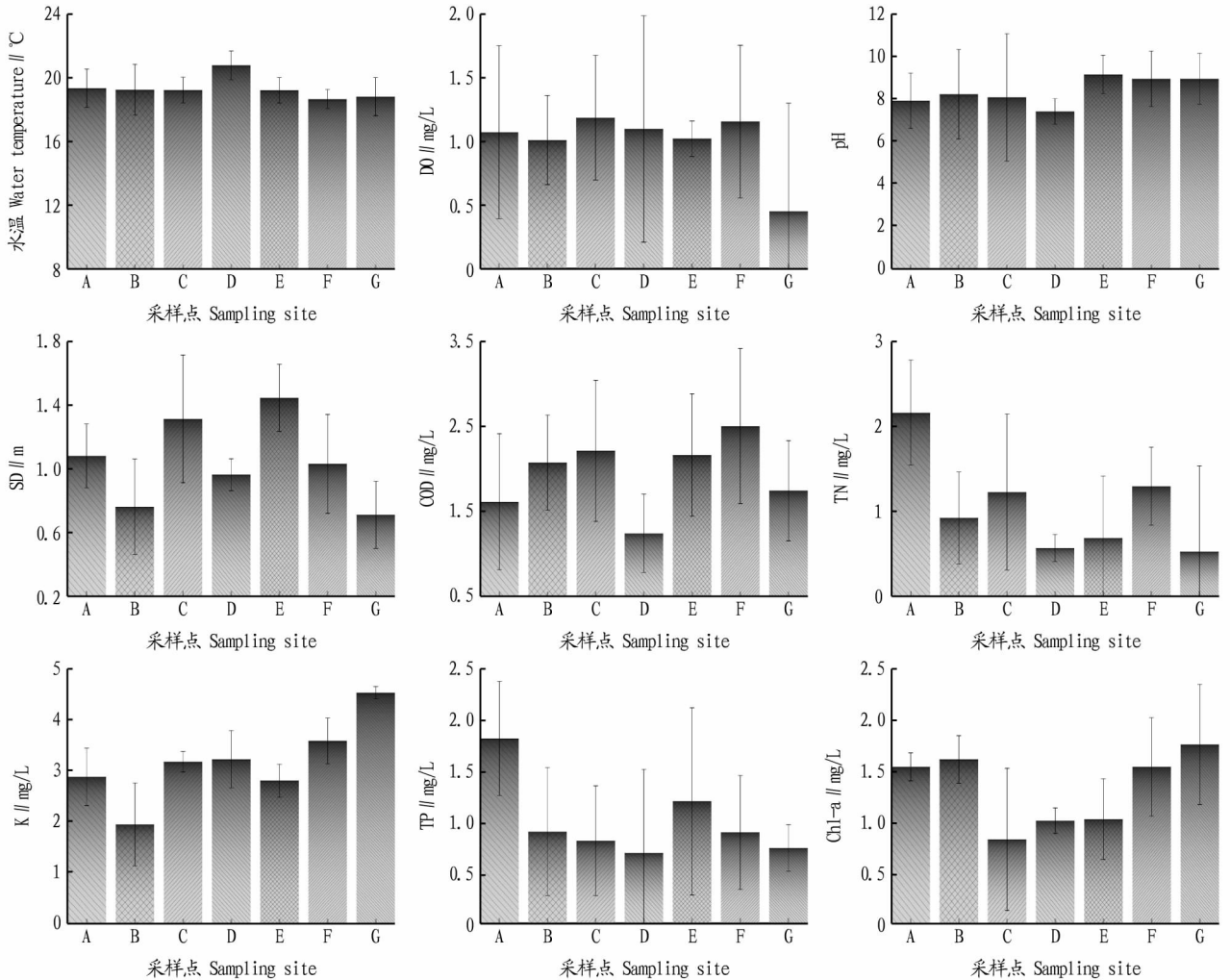


图1 锦江河水体理化参数

Fig.1 Physical and chemical parameters of Jinjiang River water body

2.3 锦江河环境因子对富营养化评价的影响 氮是蛋白质合成过程中必不可少的营养成分,而磷则在DNA和RNA的合成及能量传递系统中发挥着至关重要的作用。作为微生物和藻类生长发育所必需的微量元素,氮和磷在微生物和藻类的生长过程中扮演着至关重要的角色,并且是引发水体富营养化的关键因素^[20]。Chl-a是藻类和植物中的一种关键的叶绿素类型,它在光合作用中起着捕获光能的重要作用,直接反映藻类生长状况。锦江河环境因子和富营养化指数相关分析(图3)显示,环境因子Chl-a与TSI和TSIM呈现显著正相关($P<0.05$);环境因子TN和TP与TLI呈现显著正相关($P<0.05$)。因此,TSI和TSIM评价方法主要侧重于反映藻类生长的状态,TLI则主要针对富营养化的限制因子,特别是氮和磷限制因子。

3 结论

该研究选取TSI、TSIM和TLI这3种水体营养指数评价方法研究铜仁市锦江河水体营养状况,分析不同评价方法之间的差异和应用。主要结论如下:

(1)采用不同富营养评价方法,其评价结果有所差异。锦江河水体按照TSI、TSIM和TLI评价方法,其结果分别为贫营养、富营养和中营养水平。

(2)单因素方差分析表明,TSIM与TSI和TLI差异显著($P<0.05$),TSI与TLI差异不显著($P>0.05$);相关分析表明,Chl-a与TSI、TSIM呈现显著正相关($P<0.05$),TN和TP与TLI呈现显著正相关($P<0.05$)。水体叶绿素a是影响TSI、TSIM评价结果的重要环境因子。水体氮和磷是影响TLI评价结果的重要因素。

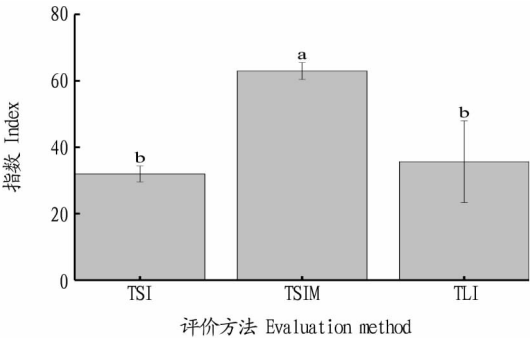
表 2 不同评价方法及其富营养等级

Table 2 Different evaluation methods and their eutrophication levels

评价方法 Evaluation method	采样点 Sampling site	指数 Index	富营养等级 Eutrophication level
TSI	A	35.48	贫营养
	B	33.94	贫营养
	C	28.63	贫营养
	D	30.01	贫营养
	E	30.75	贫营养
	F	32.29	贫营养
	G	33.60	贫营养
TSIM	A	66.07	富营养
	B	65.25	富营养
	C	59.34	富营养
	D	61.14	富营养
	E	61.23	富营养
	F	63.35	富营养
	G	65.12	富营养
TLI	A	60.51	中度富营养
	B	32.73	中营养
	C	34.01	中营养
	D	22.33	贫营养
	E	35.97	中营养
	F	38.81	中营养
	G	26.06	贫营养

注:不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$).

(3) TSI、TSIM 方法适用于水体藻类的生长状况评价, TLI 方法更适用于评价水体氮和磷营养状况。



注:不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters indicates significant differences ($P<0.05$).

图 2 不同评价方法之间方差分析

Fig.2 Variance analysis between different evaluation methods

参考文献

[1] QIAN Y, SUN L, CHEN D K, et al. The response of the migration of non-point source pollution to land use change in a typical small watershed in a semi-urbanized area[J]. Science of the total environment, 2021, 785: 1–12.

[2] ZHU Y X, CHEN L, WEI G Y, et al. Uncertainty assessment in baseflow nonpoint source pollution prediction: The impacts of hydrographic separation methods, data sources and baseflow period assumptions[J]. Journal of hydrology, 2019, 574: 915–925.

[3] WANG C, SUN X Q, WANG J T, et al. Physiological and metabolic effects of glyphosate as the sole P source on a cosmopolitan phytoplankton and biogeochemical implications[J]. Science of the total environment, 2022, 832: 1–11.

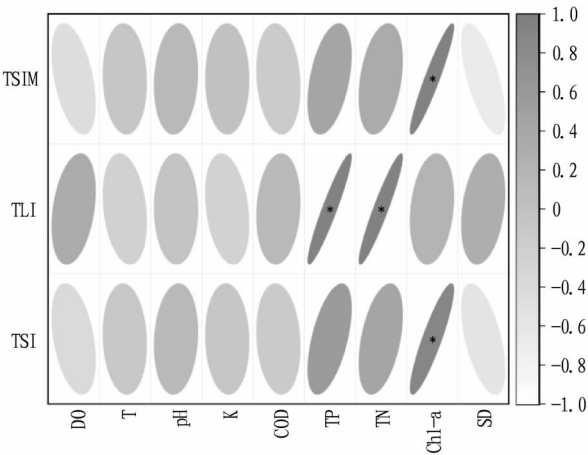


图 3 环境因子与富营养指数之间的相关分析
Fig.3 Correlation analysis between environmental factors and eutrophication index

[4] YANG W T, ZHOU H, GU J F, et al. Application of rapeseed residue increases soil organic matter, microbial biomass, and enzyme activity and mitigates cadmium pollution risk in paddy fields[J]. Environmental pollution, 2020, 264: 1–9.

[5] FORD D, WILLIAMS P. Karst hydrogeology and geomorphology[M]. New York: Wiley, 2013.

[6] CHANG Y J, ZHU D M. Water security of the megacities in the Yangtze River basin: Comparative assessment and policy implications[J]. Journal of cleaner production, 2021, 290: 1–17.

[7] LONGYANG Q Q. Assessing the effects of climate change on water quality of plateau deep-water lake-A study case of Hongfeng Lake[J]. Science of the total environment, 2019, 647: 1518–1530.

[8] WANG N, ZHANG H Y, WANG H L, et al. Spatial analysis of soil erosion and non-point source pollution based on GIS in Erlong Lake watershed, Jilin Province[J]. Chinese geographical science, 2004, 14(4): 355–360.

[9] ZHANG T, YANG Y H, NI J P, et al. Construction of an integrated technology system for control agricultural non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir Areas[J]. Agriculture, ecosystems & environment, 2020, 295: 1–6.

[10] 刘莹慧, 卢俊平, 赵胜男, 等. 基于长时间序列乌梁素海水环境变化趋势及生态补水等关键驱动因子分析(2011—2020 年)[J]. 湖泊科学, 2023, 35(6): 1939–1948.

[11] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. 中国环境监测, 2002, 18(5): 47–49.

[12] 方娜, 游清微, 刘玲玲, 等. 基于云模型的鄱阳湖秋季周边湿地水体富营养化评价[J]. 生态学报, 2019, 39(17): 6314–6321.

[13] 李大东, 王海波, 杨帆, 等. 富营养化水体水淹及水淹后干旱对降香黄檀生理生态的影响[J/OL]. 热带亚热带植物学报, 2023–12–04[2024–01–08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1374.Q.20231204.1030.004.html>.

[14] 李干蓉, 张友, 方小宁, 等. 灰色聚类分析法在锦江河水水质富营养化评价中的应用[J]. 贵州农业科学, 2019, 47(6): 143–146.

[15] 黎荣, 张丹丹, 梅思雨, 等. 近 31 年来铜仁市暴雨气候特征分析[J]. 贵州科学, 2020, 38(2): 54–57.

[16] 窦小涵, 潘叶, 王腊春, 等. 基于模糊综合优化模型的水质评价与重金属污染健康风险分析: 以贵州省铜仁市碧江区饮用水源地为例[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 173–183.

[17] 齐德轩, 马巍, 党承华, 等. 三峡水库支流库湾营养源解析及水体富营养化调控对策研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(3): 318–328.

[18] 彭园睿, 何兴华, 杨春灿, 等. 大理西湖湿地景观中水体富营养化及截留功能的季节变化[J]. 生态学杂志, 2020, 39(12): 4078–4089.

[19] 崔苗, 张晨. 基于综合营养状态指数的汾河景区湿地水体富营养化研究[J]. 中国水土保持, 2023(4): 49–52.

[20] 杨惠敏, 王冬梅. 草-环境系统植物碳氮磷生态化学计量学及其对环境因子的响应研究进展[J]. 草业学报, 2011, 20(2): 244–252.