

滇中高原湖泊水质的年内分异特征及影响因素

曹怡钦, 杨祥磊, 尹鹏飞

云南师范大学地理学部, 云南 昆明

收稿日期: 2024年12月26日; 录用日期: 2025年2月6日; 发布日期: 2025年2月14日

摘 要

为分析滇中高原湖泊水质的年内分异特征及影响因素, 采用水质指数(WQI)、综合营养指数(TLI)、Mann-Kendall检验和多元回归分析等方法进行研究。结果表明: 1) 2021年夏季至2022年春季期间, 抚仙湖水质优于杞麓湖与星云湖, 星云湖春季水质优于夏季; 2) 杞麓湖和星云湖的TLI均表现出夏季最高, 春季最低的特征。抚仙湖水体营养盐含量低、总体变化平稳, 冬春季节氮磷含量略高于夏秋季节; 3) 杞麓湖夏季受氮、磷共同限制, 其余时期主要受控于磷限制。星云湖在夏季受到氮限制, 秋季和春季受氮、磷共同限制, 冬季主要受到磷限制。抚仙湖在夏、秋、冬季受到氮、磷限制, 春季转为氮限制。

关键词

滇中湖泊, 水质指数, 营养水平, 变化特征

Characteristics and Influencing Factors of Intra-Annual Water Quality Variation of the Central Yunnan Plateau Lakes

Yiqin Cao, Xianglei Yang, Pengfei Yin

Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

Received: Dec. 26th, 2024; accepted: Feb. 6th, 2025; published: Feb. 14th, 2025

Abstract

In order to analyze the intra-annual variability of water quality of lakes in the Central Yunnan Plateau and the factors affecting it, the water quality index (WQI), the comprehensive trophic index (TLI), the Mann-Kendall test and the multiple regression analysis were used to carry out the study. The results showed that: 1) the water quality of Fuxian Lake (FXL) was better than that of Qilu Lake (QLL) and Xingyun Lake (XYL) during the summer of 2021 to the spring of 2022, and the water

quality of XYL was better than that of summer in spring; 2) the TLIs of QLL and XYL both showed the highest in the summer and the lowest in the spring. The nutrient content of FXL is low and the overall change is smooth, and the nitrogen and phosphorus content is slightly higher in winter and spring than in summer and fall; 3) QLL is limited by nitrogen and phosphorus in summer, and the rest of the period is mainly controlled by phosphorus limitation. XYL was limited by nitrogen in summer, jointly limited by nitrogen and phosphorus in fall and spring, and mainly limited by phosphorus in winter. FXL is limited by nitrogen and phosphorus in summer, fall and winter, and turns to nitrogen limitation in spring.

Keywords

Central Yunnan Lakes, Water Quality Index, Nutrient Levels, Variation Characteristics

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

湖泊是内陆重要的水资源，能够调节气候、维持生物多样性和生态系统平衡。自 1980 年以来，由于经济快速发展、全球气候变化和人类活动的影响，湖泊生态健康和水资源供给受到严重威胁[1]。来自工业、城市和农业的污染输入加速了湖泊富营养化，气候变化、城市化和农业扩张等多种因素导致湖泊总面积不断缩小[2]。反之，湖泊水质和面积的下降不仅降低了湖泊及其流域的生态功能，还威胁到人类的生存环境。位于中国西南地区的云南高原湖泊面临着一系列环境问题。湖泊表面的持续升温引起水体叶绿素 a 剧烈变化[3]，农业生产面积的持续扩张加剧了面源污染[4]，共同导致了滇池藻华的长期爆发。相关研究表明洱海流域农业种植活动对总磷浓度影响最大，而流域畜牧业则主要影响其他水质指标[5]。阳宗海在 2008 年遭受了严重的砷污染，湖中砷的长期积累和再释放对湖泊生态系统产生严重威胁[6]。在 2008~2013 年异龙湖由于工业污水排放量加大以及旅游开发带来的污染负荷增加导致了湖泊水质的急剧下降[7]。

云南高原湖泊多为构造断陷湖，流域面积有限，入湖河流水量小，对污染物流入的净化作用较弱，污染物更容易在湖泊水体中积聚[8]。近 20 年来，云南高原湖泊面积缩小主要受到持续干旱、耕地开垦和湖区旅游开发的影响[9]。在人为和自然的双重压力下，城市群集中的滇中地区其湖泊水质污染和富营养化问题日益严峻。针对以上现象，不仅需要制定湖泊保护和治理的策略，还需要科学认识湖泊水环境质量的变化过程。而湖泊水文过程、营养盐浓度、有机污染物含量的变化具有明显的季节差异[10]，湖泊水质的年内变化研究将从月尺度及季节尺度为水质管理和污染控制提供参考。因此，本文以滇中湖泊为研究对象，分析 2021 至 2022 年各湖泊水质的年内分异特征并探讨水质年内分异的影响因素，为云南高原湖泊水质改善和污染防治提供参考。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

云南省内天然湖泊众多，具有典型的断裂构造湖，主要分布在滇中、滇南和滇西北。本研究以云南高原中部的抚仙湖、杞麓湖和星云湖为研究对象(图 1)，3 个湖泊属于南盘江水系，主要受降水补给和地表径流补给。其中，杞麓湖和星云湖均为浅水湖泊，平均水深约 5 m。抚仙湖平均水深约 95.2 m，为深水

湖泊。3个湖泊湖面高程约1700 m, 湖泊流域植被为亚热带常绿林和针阔混交林[11]。湖区气候类型为北亚热带湿润高原季风气候, 受西南季风的显著影响, 湖泊流域气温年较差小, 雨热同期, 干湿分明[12]。年平均降水量800~1000 mm, 年平均气温约15℃。

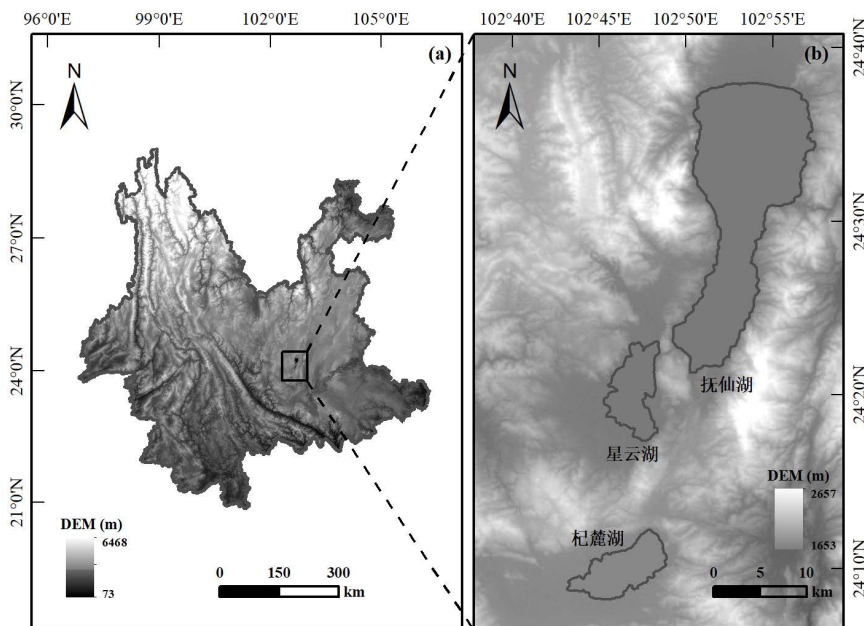


Figure 1. Location of the study area
图 1. 研究区位置

2.2. 数据来源

采用2021年6~12月和2022年1~5月每日4h的水质自动监测数据, 数据来源于国家环境监测总站的地表水水质自动监测实时数据发布系统。包括总磷(TP)、总氮(TN)、叶绿素a(Chl a)、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})和水温等6项指标。其中, 总氮和总磷均使用光度法进行监测, 仪器性能指标技术要求中对于总氮和总磷监测项目的检测限分别为0.05 mg/L和0.01 mg/L, 精密度和误差为5%。并使用Excel和R语言对数据属性和时间序列进行预处理和统计。

2.3. 方法

2.3.1. 水质和营养状态评价

采用溶解氧(DO)、叶绿素a(Chl a)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总氮(TN)、总磷(TP)计算水质指数(WQI), 公式如下[13]:

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

其中 n 为水质参数总数($n=5$), C_i 为参数 i 的归一化值, P_i 为参数 i 的权重。水质指数的计算范围为0至100, 数值越高代表水质越好。根据WQI评分, 将水质分为优秀(91~100)、良好(71~90)、中等(51~70)、一般(26~50)和差(0~25)等5个等级。

采用综合营养指数法(TLI)对水体营养状态进行多指标综合评价, 选取高锰酸盐指数(COD_{Mn})、叶绿素a(Chl a)、总氮(TN)、总磷(TP)水质指标, 计算公式如下:

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^n W_j \times TLI(j) \quad (2)$$

$$TLI(COD_{Mn}) = 10 \times (0.109 + 2.66 \ln COD_{Mn}) \quad (3)$$

$$TLI(Chl a) = 10 \times (2.5 + 1.086 \ln Chl a) \quad (4)$$

$$TLI(TN) = 10 \times (5.453 + 1.694 \ln TN) \quad (5)$$

$$TLI(TP) = 10 \times (9.436 + 1.624 \ln TP) \quad (6)$$

式中, W_j 为指标 j 的相关权重, 通过熵值赋权法确定, $TLI(j)$ 为指标 j 的营养状态指数, 计算得到的 TLI 结果数值越高代表富营养化越严重。根据 TLI 结果, 将湖泊营养状况分为贫营养(0~30)、中营养(30~50)、轻度富营养(50~60)、中度富营养(60~70)、重度富营养(70~100) [14]。

2.3.2. Mann-Kendall (M-K) 检验

Mann-Kendall 检验法广泛应用于时间序列的变化趋势分析, 并检验时间序列是否发生了突变。其统计检验方法如下[15]:

对于时间序列 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 构造一秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (7)$$

式中, r_i 表示 x_i 大于 x_j ($1 \leq j \leq i$) 的积累数。假设时间序列随机独立, 定义统计量:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

式中, 当 $k=1$ 时, $UF_1=0$ 。 $E(S_k)$, $\text{Var}(S_k)$ 是累积数 S_k 的均值和方差, 在时间序列中相互独立, 且有相同连续分布时, 可由下式算出:

$$E(S_k) = \frac{n(n-1)}{4} \quad (9)$$

$$\text{Var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (10)$$

按时间序列 X 逆序 $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$, 再重复上述过程, 同时使 $UB_k = -UF_k$, $k = n, n-1, \dots, 1$, 且当 $k=1$ 时, $UB_1 = 0$ 。当超过临界置信水平线时表明变化趋势显著(检验置信水平 $\alpha = 0.05$), 若统计值 UF 和 UB 曲线的交点在临界线(-1.96 至+1.96)之间, 则交点对应的便是突变开始时间。

2.3.3. 多元回归分析

对于多要素的系统, 各要素间若存在相互关联, 则可以通过多元线性回归分析同时考虑多个自变量对因变量的影响, 分析方法如下[16]:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k \quad (11)$$

式中, b_0 为常数, $b_1, b_2, \dots, b_k$ 为偏回归系数, 是回归方程待定参数的拟合值, 根据最小二乘法原理, 得到:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial b_0} = -2 \sum_{a=1}^n (y_a - \hat{y}_a) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial b_j} = -2 \sum_{a=1}^n (y_a - \hat{y}_a) x_{ja} = 0 \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, k) \quad (12)$$

并计算统计量 F 以进行模型显著性检验:

$$F = \frac{U/k}{Q/(n-k-1)} \quad (13)$$

3. 结果与分析

3.1. 滇中高原湖泊水质的年内变化特征

水质指标的统计结果表明(图 2), 在 2021 年 6 月~2022 年 5 月, 抚仙湖 TN 和 TP 变化范围分别为 0.05~0.16 mg/L 和 0.01~0.02 mg/L, 杞麓湖为 1.81~2.93 mg/L 和 0.06~0.12 mg/L, 星云湖为 0.93~1.23 mg/L 和 0.05~0.15 mg/L。杞麓湖和星云湖夏季 TP 浓度最高, 分别达到 0.11 和 0.14 mg/L, 这是由于夏季降水丰富, 径流携带流域营养盐、污染物输入湖泊[17]。杞麓湖和星云湖在冬季的 TN 浓度分别为 2.63 和 1.22 mg/L, 均高于抚仙湖。抚仙湖 TN 和 TP 浓度最低、变化平稳, 季节变化幅度均小于杞麓湖和星云湖。抚仙湖 TN 和 TP 含量在夏秋季节略低于冬春季节, 这是由于夏季降水增加有利于稀释营养盐和污染物[18], 加之夏季水温较高, 微生物活性增加和水生植物的生长繁殖消耗水中营养盐[19], 从而导致抚仙湖夏季氮磷浓度下降。

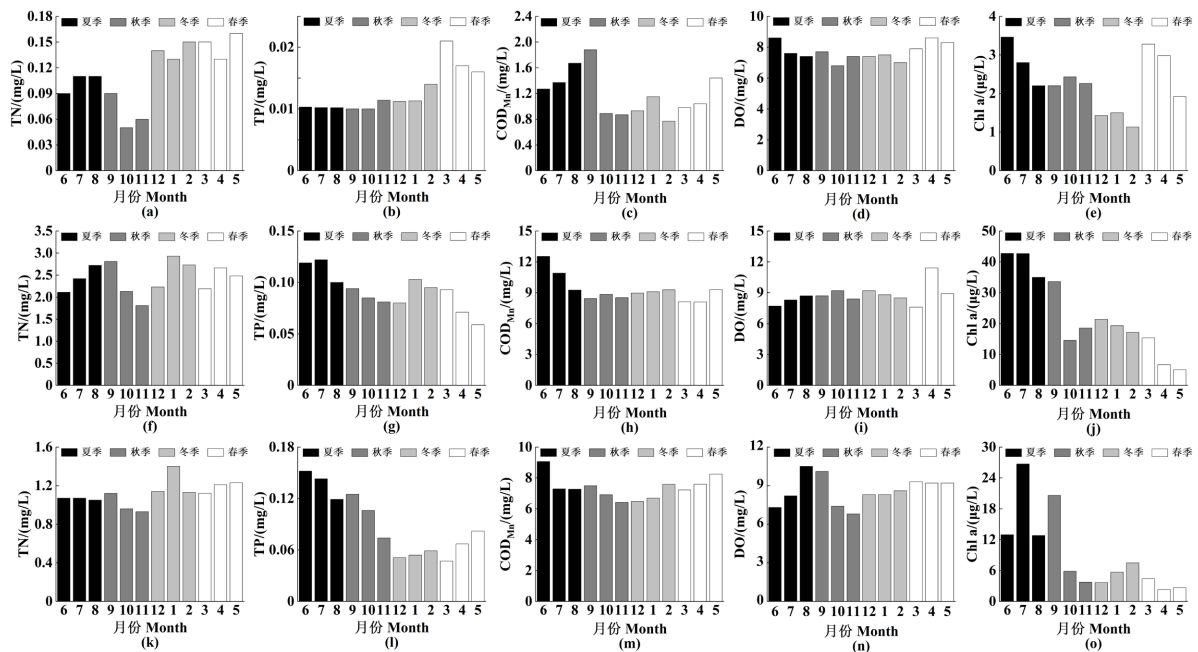


Figure 2. Variation characteristics of different water quality indicators in the three lakes

图 2. 三个湖泊不同水质指标的年内变化特征

从 2021 年夏季至来年春季, 抚仙湖、杞麓湖和星云湖溶解氧的变化幅度分别为 1.80、3.80 和 3.74 mg/L, 3 个湖泊溶解氧的最大值均出现在春季, 抚仙湖和星云湖溶解氧最小值出现在秋季, 杞麓湖则出现在夏季。抚仙湖、杞麓湖和星云湖高锰酸盐指数的变化范围分别为 0.77~1.88、8.09~12.53 和 6.41~9.06 mg/L, 最高值均出现在夏季, 最低值出现在冬春季。夏末秋初时杞麓湖和星云湖较高的 COD_{Mn} 和较低的溶解氧显示这一时期水体中具有较高的有机物含量。抚仙湖、杞麓湖和星云湖的叶绿素 a 均在夏季出现高值, 分别为 2.82、40.14 和 17.49 $\mu\text{g/L}$, 比季节低值高出 1.47、31.09 和 14.36 $\mu\text{g/L}$ 。

M-K 检验结果表明(图 3), 抚仙湖 TN 和 TP 浓度均在冬季发生突变, 杞麓湖和星云湖 TP 在夏末秋

初发生突变。杞麓湖 TN 浓度在各个季节多次突变,而星云湖 TN 浓度在冬季发生突变后 TN 浓度在春季上升。抚仙湖的高锰酸盐指数在秋季发生突变,10 月以后 COD_{Mn} 持续减少,杞麓湖的高锰酸盐指数在夏季出现突变后,于秋季至来年春季显著下降,星云湖在 11 月至来年 2 月出现 COD_{Mn} 的显著减少。3 个湖泊的叶绿素 a 均表现为夏季增加,夏末秋初以后减少的趋势,但突变时间有所差异,抚仙湖、杞麓湖和星云湖分别在 8 月、1 月和 11 月发生突变,其中,抚仙湖和星云湖 Chl a 分别在 12 月至次年 3 月和 12 月出现显著降低。

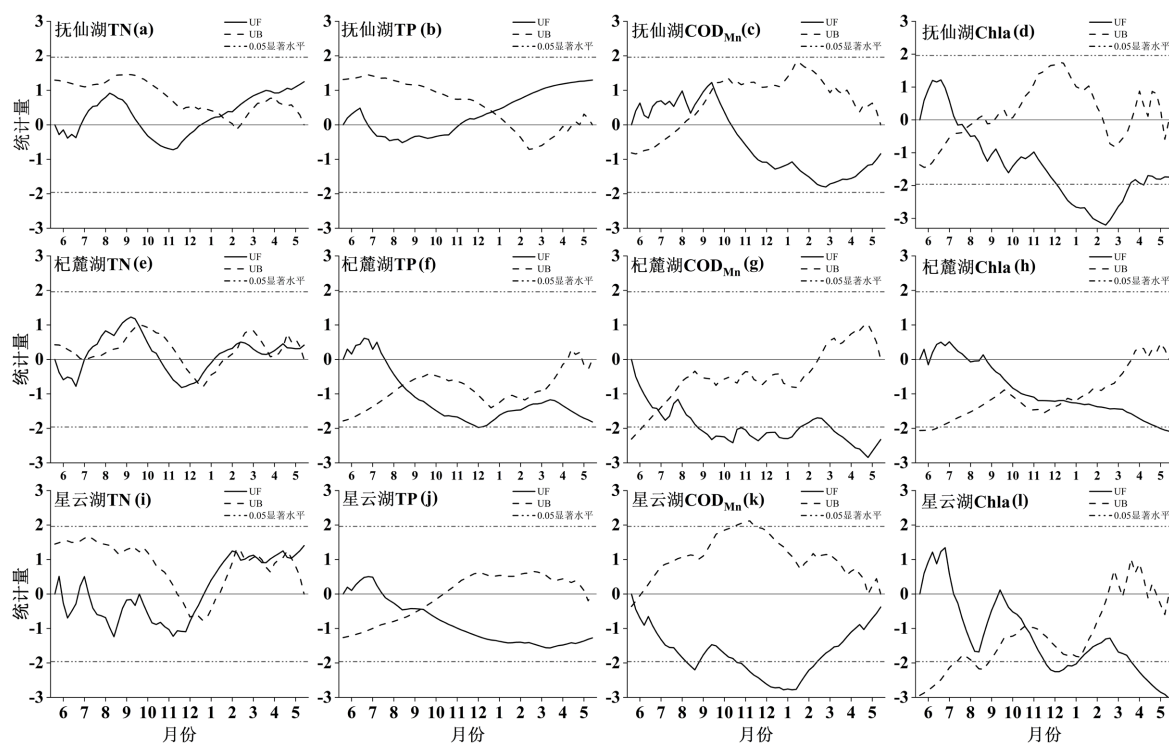


Figure 3. Mann-Kendall test of variation of different water quality indicators in the three lakes
图 3. 三个湖泊不同水质指标年内变化的 M-K 检验

3.2. 滇中高原湖泊水质和营养状况评价

基于 WQI 和 TLI 指数的评价方法对三个湖泊的水质及营养状况进行评估,结果表明(图 4): 抚仙湖 2021 年夏秋季节水质指数较高,为 89.2,最高值出现在 10 月,冬季水质指数略有下降,1 月出现最低值 85.7,进入 2022 年春季再次上升,总体上水质指数的季节波动较小,保持在 88 左右,水质良好。杞麓湖 2021 年夏季水质指数较低,最低值出现在 6 月,进入秋季后 WQI 上升,至来年春季达到最高,为 58.4,夏秋季节水质指数出现较大变幅,10 月增加了 10.5%,12 月则出现明显下降, WQI 降低了 5.5%。星云湖水水质指数变化范围为 58.8~68.6,夏季最低冬季最高,最低值出现在 7 月,总体上水质中等,夏秋季节 WQI 变化幅度较大,秋冬季节更为稳定。杞麓湖和星云湖均呈现夏季水质较差,春季水质最好的季节变化特征。

TLI 指数的评价结果表明,抚仙湖综合营养指数变化范围为 32.23~41.31,湖泊营养水平在三湖中最低,夏季和初秋 TLI 变化幅度较小,1 月出现上升,春季 TLI 指数保持在 40 左右。杞麓湖 TLI 变化范围为 65.22~74.51,为中度富营养湖泊,夏季湖泊营养程度最高,最高值出现在 6 月,春季 TLI 最低,出现在 5 月。星云湖综合营养指数变化范围为 59.72~69.81,湖泊营养状况为中度富营养,2021 年夏季湖泊营

养程度最高, TLI 最大值出现在 7 月, 秋季以后湖泊营养程度逐渐下降, 10 月降低了 7.4 %, 至 2022 年春季达到最低。杞麓湖和星云湖 TLI 均呈现夏季最高, 春季最低的特征。

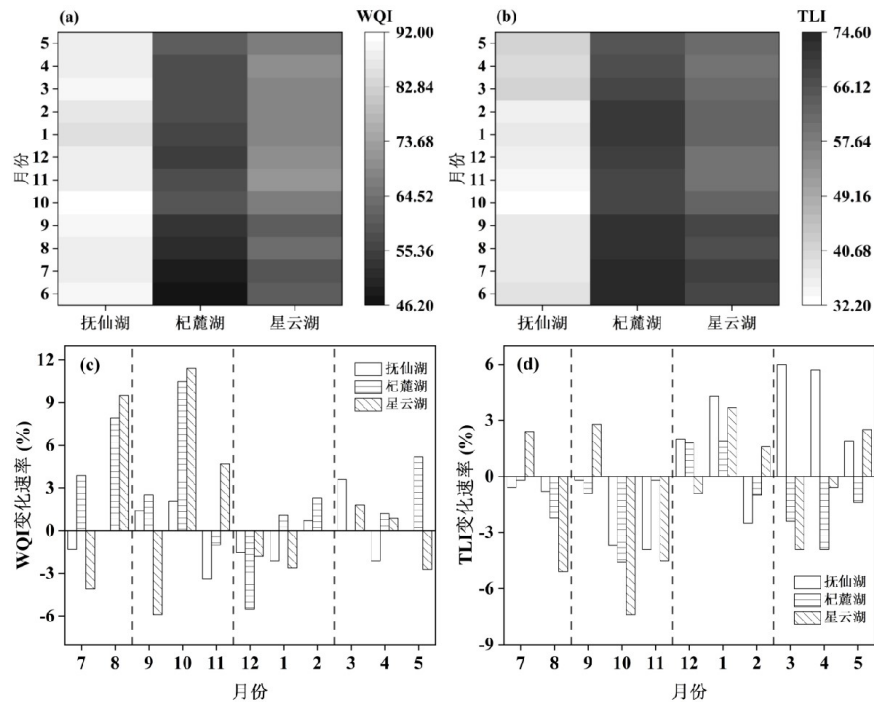


Figure 4. Variation of WQI and TLI in the three lakes (a~b) and their rates of change (c~d)
图 4. 三个湖泊 WQI、TLI 指数的年内变化(a~b)及变化速率(c~d)

3.3. 滇中高原湖泊 Chl a 的年内分异特征

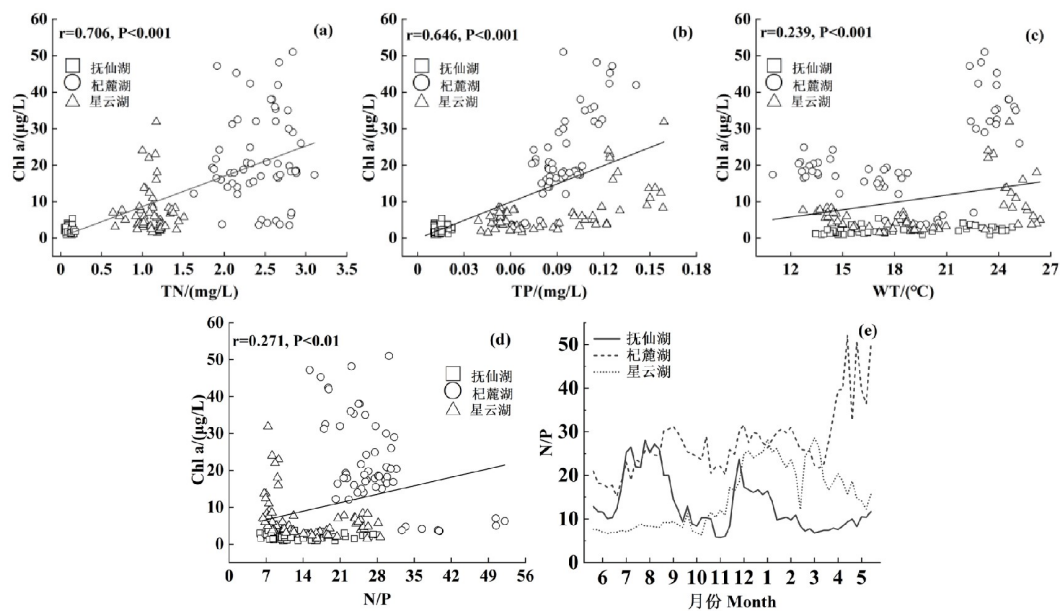


Figure 5. Correlation analysis between Chl a and various water quality indicators in the three lakes (a~d) and variation of nitrogen to phosphorus ratio (e)
图 5. 三个湖泊 Chl a 与各水质指标的相关性分析(a~d)及氮磷比的年内变化(e)

叶绿素 a 浓度通常可以表征水体中藻类浓度进而被用于评价湖泊营养状况，湖泊 TN、TP、水温和透明度显著影响湖泊藻类群落结构和叶绿素 a 变化[20]。相关性分析显示(图 5)，三湖的 TN、TP、水温和氮磷比均与 Chl a 浓度呈显著正相关，湖泊水质参数与 Chl a 的多元回归分析进一步显示(表 1)，TN 并不是影响杞麓湖和星云湖 Chl a 浓度的显著因素。对不同深度湖泊营养状况和 Chl a 浓度关系的研究表明，TP 在浅水湖和深水湖 Chl a 浓度中起主导作用，而 TN 总体上起次要作用[21]。Guilford 和 Hecky [22]提出，当湖水氮磷比小于 9:1，氮为限制性因素，超过 22.6:1 为磷限制，介于其中则可能受到氮、磷共同限制。

三个湖泊的氮磷比和 MK 检验结果表明，杞麓湖夏季受氮、磷共同限制的作用，夏末秋初 TP 浓度发生突变后，其余时期几乎都受到磷限制。而星云湖在夏季和初秋受到氮限制，初秋 TP 浓度出现突变，秋季逐渐向氮、磷限制过渡，此后 TN 浓度发生突变，冬季和春初主要受到磷限制，进入春季后又受氮磷共同限制。抚仙湖氮磷比夏季和秋季变化范围分别为 10.1~27.2 和 6~20，均值为 19.2 和 10.9，主要受到氮、磷限制并持续至冬季，春季转向氮限制。

Table 1. Multivariate regression model of Chl a concentration variation in the three lakes
表 1. 三个湖泊 Chl a 浓度变化的多元回归模型

湖泊	回归模型	R ²	F
抚仙湖	$\text{Chl a} = -9.50^{**} \text{TN} + 0.13^{**} \text{TP} + 0.18^{**} \text{WT}$	0.37	11.14
杞麓湖	$\text{Chl a} = -2.19 \text{TN} + 0.48^{**} \text{TP} + 0.89^{**} \text{WT}$	0.70	42.90
星云湖	$\text{Chl a} = 8.14 \text{TN} + 0.24^{**} \text{TP} - 0.84 \text{WT}$	0.34	9.48
3 个湖泊	$\text{Chl a} = 6.17^{**} \text{TN} + 0.08^{**} \text{TP} + 0.64^{**} \text{WT}$	0.52	64.03

4. 结论

基于滇中三大高原湖泊 2021 年 6 月至 2022 年 5 月的逐日水质监测数据，采用 WQI 指数、TLI 指数、MK 检验和多元回归分析等方法对水质年内特征进行分析，识别湖泊营养状态在年内尺度发生突变的关键时间节点及影响因素，得到以下结论：

- 1) 水质指数结果显示 2021 年夏季至 2022 年春季抚仙湖水质良好且全年 WQI 的季节波动较小，杞麓湖水质一般，星云湖水质中等，且两湖均表现为夏季水质较差、春季水质最好的季节特征。
- 2) 综合营养指数结果表明杞麓湖和星云湖均为中度富营养湖泊且两个湖泊的 TLI 均表现出夏季最高，春季最低的特征。抚仙湖水体营养盐含量低、总体变化平稳，冬春季节氮磷含量略高于夏秋季节。
- 3) 杞麓湖夏季受氮、磷共同限制，其余时期几乎都受磷限制。星云湖在夏季受到氮限制，秋季向氮、磷限制过渡，冬季主要受到磷限制，进入春季后又受氮磷共同限制。抚仙湖夏秋季节主要受到氮、磷限制并持续至冬季，春季转向氮限制。

基金项目

教育部产学研合作协同育人项目“《自然地理学》混合式教学改革与实践”(编号：231001282240819)。

参考文献

- [1] 张运林, 秦伯强, 朱广伟, 等. 论湖泊重要性及我国湖泊面临的主要生态环境问题[J]. 科学通报, 2022, 67(30): 3503-3519.
- [2] 张闻松, 宋春桥. 中国湖泊分布与变化: 全国尺度遥感监测研究进展与新编目[J]. 遥感学报, 2022, 26(1): 92-103.
- [3] Duan, Z., Gao, W., Cheng, G., Zhang, Y. and Chang, X. (2024) Warming Surface and Lake Heatwaves as Key Drivers

- to Harmful Algal Blooms: A Case Study of Lake Dianchi, China. *Journal of Hydrology*, **632**, Article 130971. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130971>
- [4] 龚铭, 王百群, 赵方凯, 等. 滇池蓝藻水华时空变化特征及环境影响因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 419-429.
- [5] 陈小华, 钱晓雍, 李小平, 等. 洱海富营养化时间演变特征(1988-2013 年)及社会经济驱动分析[J]. 湖泊科学, 2018, 30(1): 70-78.
- [6] 郑昕, 陈丽, 仇菲, 等. 磷污染治理背景下阳宗海浮游植物生物量的时空分布模式及驱动因子[J]. 湖泊科学, 2024, 36(1): 34-42.
- [7] Wu, T., Wang, S., Su, B., Wu, H. and Wang, G. (2021) Understanding the Water Quality Change of the Yilong Lake Based on Comprehensive Assessment Methods. *Ecological Indicators*, **126**, Article 107714. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107714>
- [8] Wang, Q., Sun, L., Zhu, Y., Wang, S., Duan, C., Yang, C., *et al.* (2022) Hysteresis Effects of Meteorological Variation-Induced Algal Blooms: A Case Study Based on Satellite-Observed Data from Dianchi Lake, China (1988-2020). *Science of the Total Environment*, **812**, Article 152558. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152558>
- [9] 肖茜, 杨昆, 洪亮. 近 30a 云贵高原湖泊表面水体面积变化遥感监测与时空分析[J]. 湖泊科学, 2018, 30(4): 1083-1096.
- [10] Jia, Z., Chang, X., Duan, T., Wang, X., Wei, T. and Li, Y. (2021) Water Quality Responses to Rainfall and Surrounding Land Uses in Urban Lakes. *Journal of Environmental Management*, **298**, Article 113514. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113514>
- [11] 李涛辉, 张文翔, 吕爱锋, 等. 云南省农业生长季热量资源的时空特征[J]. 山地学报, 2023, 41(3): 361-374.
- [12] Liang, Q., Zhang, H., Ma, S., Han, Q., Cao, Y., Yang, D., *et al.* (2024) Tracing Soil Erosion History Using Geochemical Signatures in Lake Sediments: Insights from the Southeastern Tibetan Plateau Margin. *Catena*, **245**, Article 108341. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108341>
- [13] Zhao, M.M., Wang, S., Chen, Y., Wu, J., Xue, L. and Fan, T.T. (2020) Pollution Status of the Yellow River Tributaries in Middle and Lower Reaches. *Science of the Total Environment*, **722**, Article 137861. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137861>
- [14] 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.
- [15] Yin, J., Hu, W., Chen, A., Li, T. and Zhang, W. (2024) Human-Caused Increases in Organic Carbon Burial in Plateau Lakes: The Response to Warming Effect. *Science of the Total Environment*, **937**, Article 173556. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173556>
- [16] 李静, 陈光杰, 黄林培, 等. 滇西北地区高山湖泊沃迪错近两百年来环境变化及枝角类群落响应[J]. 湖泊科学, 2023, 35(6): 2170-2184.
- [17] 秦伯强. 浅水湖泊湖沼学与太湖富营养化控制研究[J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1229-1243.
- [18] 吴光红, 邱梦璇, 李建玲, 等. 辽东湾入海河流水质时空变化与污染物来源分析[J]. 海洋学报, 2023, 45(9): 177-188.
- [19] 张曼, 殷鹏, 支鸣强, 等. 太湖藻型及草型湖区底泥内源污染及释放机制研究[J]. 环境科学学报, 2023, 43(6): 247-257.
- [20] 屈宁, 邓建明, 张祯, 等. 2015~2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子[J]. 环境科学, 2022, 43(6): 3097-3105.
- [21] Zhao, L., Zhu, R., Zhou, Q., Jeppesen, E. and Yang, K. (2023) Trophic Status and Lake Depth Play Important Roles in Determining the Nutrient-Chlorophyll a Relationship: Evidence from Thousands of Lakes Globally. *Water Research*, **242**, Article 120182. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120182>
- [22] Guildford, S.J. and Hecky, R.E. (2000) Total Nitrogen, Total Phosphorus, and Nutrient Limitation in Lakes and Oceans: Is There a Common Relationship? *Limnology and Oceanography*, **45**, 1213-1223. <https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.6.1213>