

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20190076

# 基于综合营养状态指数的喀斯特高原湖泊富营养化研究

赵 梦<sup>1,2</sup>, 焦树林<sup>1,2</sup>, 梁 虹<sup>1,2</sup>

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550001;  
2. 贵州省山地资源与环境遥感应用重点实验室, 贵州 贵阳 550001)

**摘 要:** 随着社会的进步和经济的不断发展, 人类对地表的干扰程度逐年上升, 我国大部分湖泊都受到了不同程度的污染, 尤其是因氮、磷等营养物质所引起的湖泊富营养化, 严重影响了湖泊水库水质及水体生态系统的平衡。喀斯特高原湖泊具有独特的生态环境与地理背景, 其生态系统较为脆弱, 破坏之后难以恢复。因此, 对百花湖表层各理化指标进行监测, 统计了 2012-2016 年间各月的理化参数, 分析各指标的时空变化趋势, 并运用综合营养状态指数评价法对百花湖进行综合评价, 得出该水库 2012-2016 年的富营养化等级及其变化趋势, 以期对百花湖污染提供综合防治的依据。

**关键词:** 水质; 综合营养状态指数; 百花湖

**中图分类号:** K903

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0852(2020)03-0009-07

湖泊富营养化指水体接收了大量的氮、磷等营养物质致使水中藻类和其他水生生物异常繁殖而最终使湖泊水质恶化、水体生态系统和自净能力受到抑制和破坏的现象<sup>[1]</sup>。富营养化的国际性研究始于 20 世纪 60 年代中后期。据 OECD 研究显示: 80% 的富营养化是受磷元素影响, 10% 的湖泊富营养化与氮元素有直接关系, 余下的与氮和其他因素相关<sup>[2]</sup>。我国对水体富营养化环境问题的研究始于 20 世纪 70 年代末。1984 年全国重点调查的 34 个湖泊中, 富营养化占 26.5%; 1988 年升至 61.5%; 而在 1996 年, 26 个国家湖泊(水库)中, 总体处于富营养化的高达 85%<sup>[3]</sup>。2010-2011 年, 我国五大湖区中 22 个典型湖泊已有 59.1% 的现状为不同程度的富营养化<sup>[4]</sup>。“十一五”及“十二五”期间, 仅对滇池的污染治理便投入高达 500 亿资金, 草海水质逐渐得到改善。当下, 中国湖泊治理初见成效, 外海治理也在同步开展<sup>[5]</sup>。而随着社会不断发展, 湖泊富营养化治理仍是我国急需解决的水环境问题之一。

贵州水库多为河道峡谷型, 喀斯特地貌特点突出<sup>[6]</sup>, 喀斯特岩溶分布广泛, 碳酸盐岩石出露面积便占全省总面积的 73%<sup>[7-8]</sup>; 发育水文系统“二元”结构, 水文动

态变化快, 地表水下渗严重; 土壤贫瘠, 生态环境脆弱。随着人类活动强度加深, 水污染问题也逐渐突显<sup>[9]</sup>。本文以百花湖水库为研究对象, 统计了 2012-2016 年间各月的水体参数, 运用综合营养状态法评价百花湖水水质, 旨在为百花湖富营养化的防控提供一定依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

百花湖(见图 1)地处贵州高原中部, 建成于 1966 年, 属云贵高原乌江支流猫跳河六级开发中的第二级的大型人工水库。该水库具有调洪、供水、农业灌溉和养殖、旅游等功能。属亚热带湿润季风气候, 夏秋季水温可达 26℃左右, 冬季约 10℃<sup>[10]</sup>, 湖泊长 18km, 平均宽度 0.8km, 湖泊流域面积 1 895km<sup>2</sup>, 湖面面积为 14.5km<sup>2</sup>, 多年平均降水量为 1 200mm, 流域内地质岩性以碳酸盐岩分布最广, 湖泊最大水深 45m, 平均水深 12.55m, 设计正常高水位 1 195m, 相应库容 1.82×10<sup>9</sup>m<sup>3</sup>, 设计供水 3.1×10<sup>9</sup>m<sup>3</sup>, 年总供水量为 2.87×10<sup>7</sup>m<sup>3</sup>; 发电装机容量 2.2×10<sup>4</sup>kw; 红枫湖的下泄水为百花湖主要补给水源, 湖泊补给系数为 182.2, 湖水滞留时间为 0.102a<sup>[11-14]</sup>。

收稿日期: 2019-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41263011); 贵州省国内一流学科建设项目“贵州师范大学地理学”(黔教科研发[2017]85号)

作者简介: 赵梦(1991-), 男, 贵州赫章人, 硕士, 主要研究方向为水文水资源与 GIS。E-mail: 1303133746@qq.com

通讯作者: 焦树林(1969-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 教授, 主要研究方向为喀斯特水文水资源与流域地表过程与环境变化。E-mail: jiaoshulin@gznu.edu.cn

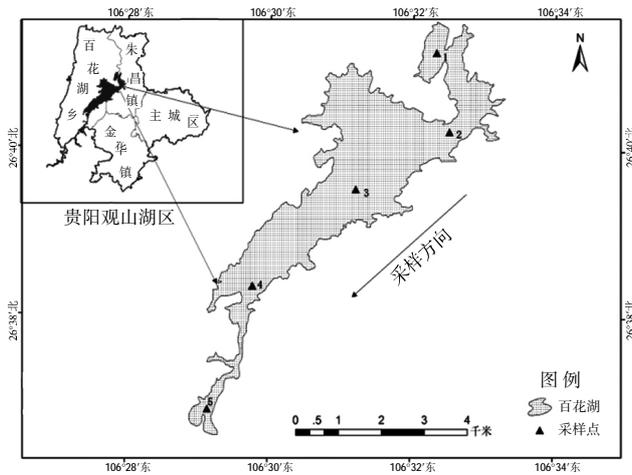


图1 研究区采样图  
Fig.1 The sampling map of the study area

2020年将在百花湖周边建成百花新城,因此百花湖对该流域乃至贵阳的可持续发展具有重要战略意义。

## 1.2 采样与分析方法

本次采样根据百花湖湖泊形状、湖泊入湖支流分布的特点,于湖泊表层布设五个采样点并逐月采样(见图1)。使用LocaSpace Viewer和ArcGIS10.1软件确定空间采样位置,水体理化参数的测定标准按照金相灿等编著的《湖泊富营养化调查规范》进行测定<sup>[15]</sup>,共涉及8个参数:氨氮、总氮、总磷、pH、溶解氧、温度、透明度及叶绿素a<sup>[16]</sup>。利用Ultra-II(6p)水质参数仪现场测定水温、pH。

## 1.3 富营养状态评价

本文采用修正后的卡尔森指数法计算富营养状态指数。分别选取TN、TP、SD、Chl.a作为评价湖泊富营养化的基准参数,评价方法:营养状态指数法(trophic state index, TSIc)参照李祚泳与张辉军方法进行计算<sup>[17]</sup>。

评价公式如下:

$$\text{TSIc}(\text{TN})=10 \times (5.24 + 1.86 \times \ln(\text{TN})) \quad (1)$$

$$\text{TSIc}(\text{TP})=10 \times (9.40 + 1.62 \times \ln(\text{TP})) \quad (2)$$

$$\text{TSIc}(\text{SD})=10 \times (5.52 - 1.94 \times \ln(\text{SD})) \quad (3)$$

$$\text{TSIc}(\text{Chl.a})=10 \times (2.46 + 1.09 \times \ln(\text{Chl.a})) \quad (4)$$

$$\text{TSI}(\Sigma)=\sum_{j=1}^m W_j \times \text{TSI}(j) \quad (5)$$

式中:TSIc(TN)为总氮营养指数;TSIc(TP)为总磷营养指数;TSIc(SD)为透明度营养指数;TSIc(Chl.a)为叶绿素a营养指数;TSI(Σ)为综合营养状态指数; $W_j$ 为第j种相关参数的营养状态指数的权重;TSI(j)为

第j种参数的营养状态指数; $m$ 为评价参数的个数。TSI(Σ)分级见表1。

表1 综合营养状态指数分级  
Table1 The classification of the comprehensive trophic state indexes

等级	贫营养	中营养	富营养	轻度富营养	中度富营养	重度富营养
TSI(Σ)	<30	30-50	>50	50-60	60-70	>70

## 2 结果

### 2.1 湖泊理化参数年变化

百花湖属亚热带湿润季风气候,夏季高温,冬季寒冷。由图2、图3可知,百花湖2012~2016年水温变化趋势基本一致。pH值除2012年1月出现极小值外,2012年~2016年均均在7.7~8.3之间波动,湖泊水体元素的溶解沉积、迁移转化均受pH值的影响<sup>[18-19]</sup>。百花湖虽然是世界上酸沉降较为严重的地区之一,但因湖泊地处喀斯特高原地区,特殊的碳酸盐体系具有极强的缓冲能力,因此湖泊并未发生酸化现象<sup>[12]</sup>。

溶解氧的逐年变化趋势大致呈锯齿状下降,2012年波动最为明显。2012~2016年溶解氧在夏季和初秋的含量出现低值区,可能是由于大量外源营养物质输入,表层有机物的降解作用增强,而消耗大量溶解氧造成的。氨氮在2012~2014年上半年变化幅度大,下半年变化整体平稳;2015~2016年在 $0.05\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上下小幅波动,分析认为,上半年氨氮波动大是因水库进入汛期,库区各干支流将流域周围排放的污染物带入水库,使得氨氮含量增加。

总磷的逐年变化可分为两个阶段:1~7月整体呈上升-下降-上升的循环变化趋势,而8~12月大致为平稳上升的态势;2014年总磷变化幅度最显著;总氮在2012~2016年之间的变化趋势大体一致,除2012年(1~8月)整体呈下降趋势,之后(9~12月)呈上升态势外,其余年份变化一样,皆是先升后降的趋势,2013~2014年的变化起伏更明显。氨氮、总氮和总磷2012~2016年大致为上半年变化剧烈,下半年趋于平稳,这种差异可能是外源营养物质输入造成的。

透明度除2013~2014年变化较显著外,其他年份整体为平稳下降的态势,各年份最小值大致集中于夏季,这与夏季水质状况、藻类大量繁殖、水中悬浮物增多和浮游生物的生长有关。

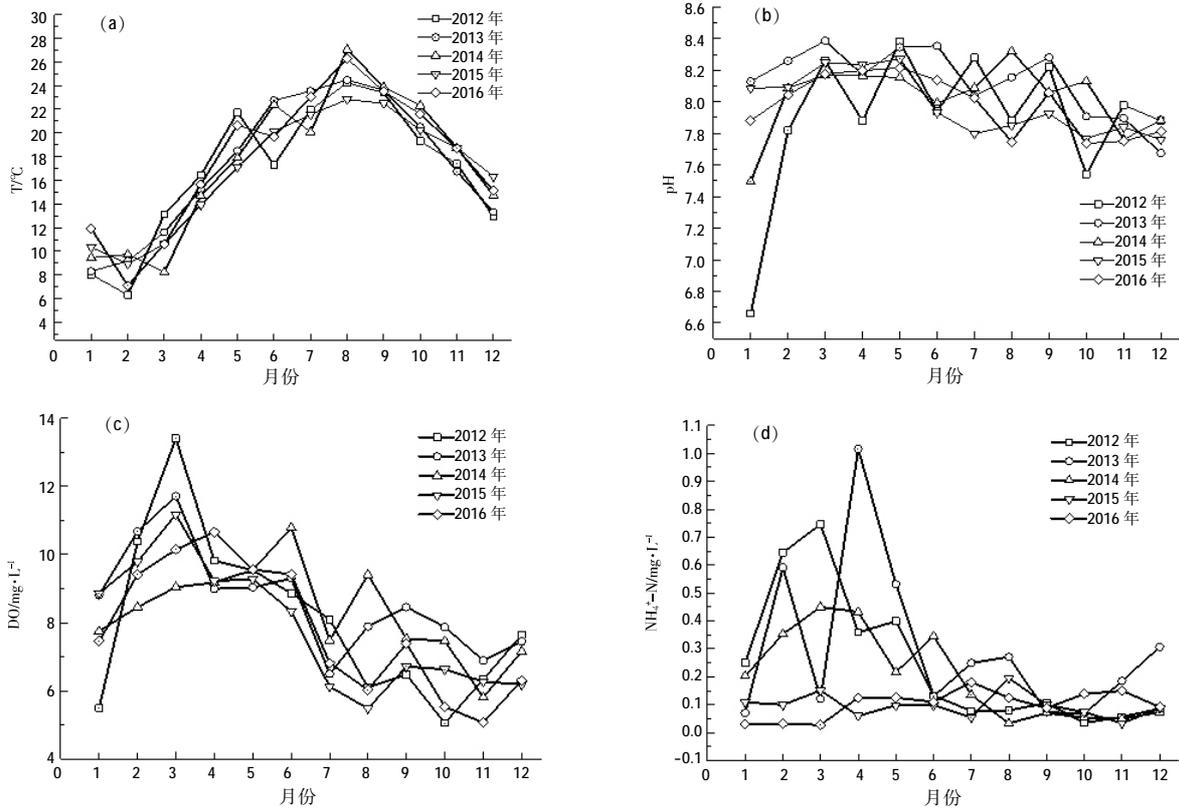


图2 百花湖理化参数变化  
Fig.2 The variation of physical and chemical parameters in the Baihua Lake

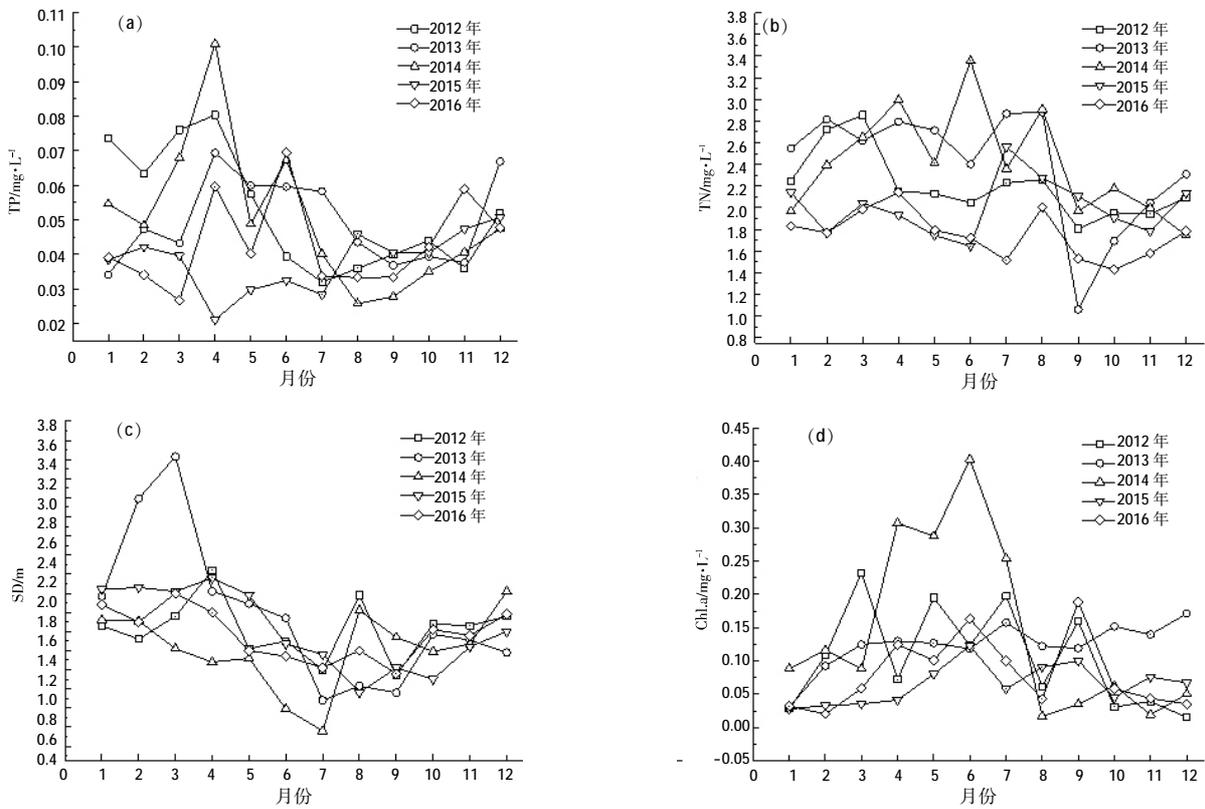


图3 百花湖富营养化参评参数变化  
Fig.3 The variation of eutrophic parameters in the Baihua Lake

叶绿素 a 在 2012 年整体为上升-下降-上升的锯齿状趋势;2013 年整体平稳,呈上升态势;2014 年变化较剧烈;2015~2016 年呈先升后降趋势。5~7 月叶绿素 a 含量整体偏高,夏季地表径流将大量陆源营养物质带入百花湖,为浮游植物生长提供基础,较高的水温利于水生生物进行光合作用和其他生命活动,而水体叶绿素 a 能够反应浮游植物生物量的高低,其作为浮游植物现存量的重要指标,也是水体初级生产力和水体富营养化水平的重要指标<sup>[20-22]</sup>。

就 2012~2016 年各参数( $C_v$  值)起伏动态来看(见表 2),2014 年总磷变化幅度最大,2015 年总磷变幅最小;总氮在 2013 年变幅最大,2016 年变幅最小;透明度变幅最大年份为 2013 年,变幅最小的年份为 2016;叶绿素 a 变幅最大年份为 2014 年,变幅最小年份为 2013 年。2012~2016 年氮磷比均值皆高于 16,可知百花湖是一个高氮、高磷所控制的高原水库。

表2 百花湖水体参数特征值变化  
Table2 The characteristic variation of water parameters in the Baihua Lake

年份	参数	最小值	最大值	均值	$C_v$
2012	TP/mg·L <sup>-1</sup>	0.032	0.080	0.053	0.315
	TN/mg·L <sup>-1</sup>	1.806	2.856	2.203	0.133
	N/P	26.791	69.625	45.246	0.266
	SD/m	1.140	2.240	1.627	0.180
	Chl.a/mg·L <sup>-1</sup>	0.015	0.232	0.105	0.688
2013	TP/mg·L <sup>-1</sup>	0.034	0.069	0.050	0.239
	TN/mg·L <sup>-1</sup>	1.060	2.883	2.396	0.222
	N/P	28.734	74.496	49.683	0.262
	SD/m	0.880	3.430	1.781	0.417
	Chl.a/mg·L <sup>-1</sup>	0.031	0.171	0.124	0.277
2014	TP/mg·L <sup>-1</sup>	0.026	0.101	0.050	0.394
	TN/mg·L <sup>-1</sup>	1.744	3.357	2.411	0.193
	N/P	29.675	113.010	53.667	0.394
	SD/m	0.560	2.020	1.420	0.279
	Chl.a/mg·L <sup>-1</sup>	0.017	0.403	0.144	0.879
2015	TP/mg·L <sup>-1</sup>	0.021	0.051	0.038	0.217
	TN/mg·L <sup>-1</sup>	1.646	2.561	2.003	0.124
	N/P	37.674	91.316	55.680	0.300
	SD/m	0.960	2.160	1.618	0.249
	Chl.a/mg·L <sup>-1</sup>	0.028	0.123	0.065	0.443
2016	TP/mg·L <sup>-1</sup>	0.027	0.069	0.043	0.290
	TN/mg·L <sup>-1</sup>	1.429	2.142	1.756	0.119
	N/P	24.750	74.060	43.877	0.303
	SD/m	1.160	2.000	1.572	0.164
	Chl.a/mg·L <sup>-1</sup>	0.020	0.188	0.081	0.651

## 2.2 百花湖各采样点综合营养状态指数(TSI( $\Sigma$ ))变化

5 号采样点 TSI( $\Sigma$ )均值明显高于其余的四个采样点,最大值也出现在本采样点,而 1~4 号采样点值都较接近;就各采样点 TSI( $\Sigma$ )值的变化幅度来看,5 号采样

点数值变幅最大,3 号采样点变幅最小。这与百花湖水体营养物质的来源有关,5 号采样点处于百花湖上游入湖口附近,上游水体携带的外源营养物质输入百花湖并富集,致使百花湖综合营养状态指数值的变幅和最大值都出现在 5 号采样点(见表 3)。从图 4 中也可知:2012~2016 年,5 号采样点 TSI( $\Sigma$ )值的变幅均较其余 4 个采样点剧烈,1~4 号采样点的 TSI( $\Sigma$ )变化趋势大致相同。

表3 采样点综合营养状态指数特征值  
Table3 The characteristics of comprehensive trophic status indexes at the different sampling points

参数	采样点	最小值	最大值	均值	标准差	$C_v$
TSI( $\Sigma$ )	1 号点	21.64	42.78	30.34	4.78	0.157
	2 号点	21.78	43.2	30.72	4.53	0.148
	3 号点	22.46	42.87	31.51	4.26	0.135
	4 号点	24.66	44.77	32.92	4.51	0.137
	5 号点	25.42	57.94	39.05	7.83	0.201

## 2.3 百花湖综合营养状态指数(TSI( $\Sigma$ ))分析

由表 4 可知:百花湖 TSI( $\Sigma$ )最大值出现在 2014 年,变化幅度也最大( $C_v=0.185$ )。整体而言,2012~2016 年间百花湖 TSI( $\Sigma$ )变幅稳定,TSI( $\Sigma$ )大致呈逐年下降的趋势(见图 5)。在 TSI( $\Sigma$ )分级中,百花湖 2012~2016 皆属中营养状态。

表4 研究区2012~2016年综合营养状态指数特征值  
Table4 The characteristics of comprehensive trophic status indexes in the study area during 2012-2016

参数	年份	最小值	最大值	均值	标准差	$C_v$
TSI( $\Sigma$ )	2012	26.05	49.12	33.46	4.48	0.134
	2013	24.43	51.64	34.54	4.05	0.117
	2014	24.52	57.94	34.80	6.29	0.185
	2015	21.64	44.39	31.04	3.83	0.123
	2016	21.78	51.11	30.70	4.00	0.130

## 2.4 百花湖出现富营养化现象分析

分析百花湖出现富营养化的部分原因,一是地处亚热带湿润气候区,夏季高温多雨、冬季寒冷少雨的气候特点适合“水华”生长,并且夏季浮游植物利用径流所带来的营养物质也会造成大量繁殖<sup>[23]</sup>。

其次是湖泊沉积物释放的氮、磷元素。经过复杂的化学过程后,部分含氮物质以气体形式释放至大气中,其余通过吸附、络合、絮凝、沉降等作用被沉积物接纳,成为湖泊氮的重要库源;沉积物中的氮素不断向上覆水体释放,成为湖泊水体氮素内源<sup>[24]</sup>。沉积磷的赋存形态发生变化时会引起向上覆水体再释放,从而

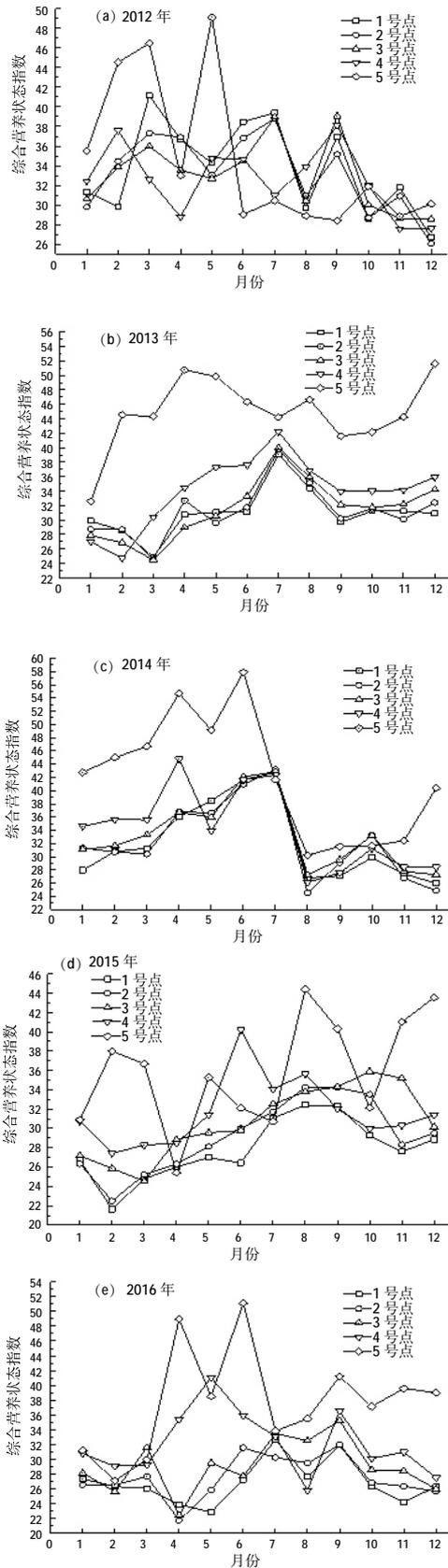


图4 研究区各采样点综合营养状态指数变化  
Fig.4 The variation of comprehensive trophic status indexes at the different sampling points in the study area

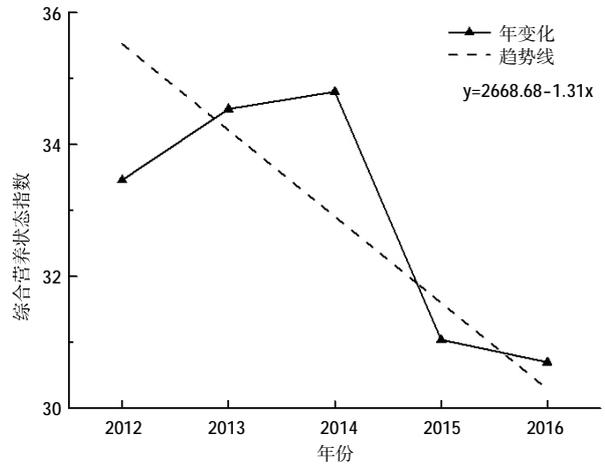


图5 百花湖 2012-2016 年综合营养状态指数变化趋势  
Fig.5 The change trends of comprehensive trophic status indexes in the Baihua Lake during 2012-2016

重新参与湖泊生态系统的物质循环,在一定条件下可能是湖泊的重要营养物来源<sup>[25]</sup>。

外源物质的输入,陆源营养物质的注入也导致百花湖水体富营养化的原因之一。百花湖上游的红枫湖同为富营养化湖泊,其下泄水携带营养物质。除此外,清镇市区生活污水及其工厂排放的污水为百花湖重要的污染源;同时旅游设施及周边的娱乐饮食所排放的废水、网箱养殖投入的鱼饲料里也含有一定量的氮磷<sup>[2]</sup>。

### 3 防治措施

百花湖当前的水环境质量逐渐趋于良好。但随着人口的增加和城市发展,加之在 2020 年将建成百花新城,百花湖未来水质会因此受到影响。鉴于此,本文提出以下治理措施:

(1)针对湖区水生植物吸收外来营养物质大量繁殖及对上游红枫湖下泄水的治理措施:①生活生产的废渣污水处理达标后排放,加强城市雨水管道的铺设,避免大气降水产生的径流与生活污染汇流。湖区生活垃圾定点收集,杜绝湖区居民直接将垃圾扔入湖泊。②政府应引导湖区工业向绿色生产方向发展。③湖区网箱养殖投入的饲料应满足水体自身净化饲料中氮磷元素的要求。④农业区要推广生态农业,鼓励使用农家肥。⑤兼顾上游地区及湖区入湖支流的治理,加强水体周期性监测,力求从污染源头消除污染。

(2)针对湖泊自身沉积物释放氮磷的措施:生物措施与工程措施相结合,利用水生生物吸收氮、磷元素,如种植适量美人蕉、水葫芦等来吸收水体中的营养物质,

工程措施包括底泥疏浚、封闭底泥、引清冲污等,但这些方法容易引起水体恶化和污染物转移,所以应具体分析湖泊实际情况,生物措施为主,工程措施为辅<sup>[2]</sup>。

(3)完善相关管理体制,联合水利、农业、城市建设等部门开展工作。提高人们保护景区的旅游意识,实现绿色旅游。

## 4 结论

百花湖水源地生态环境易受人类活动干扰,为治理好湖泊水质,本文基于综合营养状态指数法对该湖泊进行评价,提出湖泊防治措施。

百花湖表层水温在夏秋季可达 26℃,冬季水温在 8℃上下波动,pH 值除 2012 年 1 月出现最小值外,2012~2016 年间的 pH 值在 7.7~8.3,溶解氧逐年的变化趋势呈锯齿状下降趋势,总氮、总磷和氮磷比分别在 1.06~3.357mg·L<sup>-1</sup>、0.021~0.101mg·L<sup>-1</sup>、24.750~113.010 mg·L<sup>-1</sup> 之间,为高氮、磷控制的水库。透明度和叶绿素 a 历年均值分别为 1.60m、0.104mg·L<sup>-1</sup>。径流输入为百花湖营养盐来源之一,百花湖 2012~2016 年 TSI(Σ)值变化稳定且均值为 32.91,大致呈逐年下降的趋势,属中营养状态。湖泊上游采样点 TSI(Σ)均值高于其余采样点,这应为百花湖上游水体携带的营养物质富集所致。其富营养化原因有:该地区气候利于“水华”生长、径流所带来的营养物质促进浮游植物繁殖、水库自身沉积物以及陆源营养物质的输入等。

综上所述,百花湖水体防治应分为内外污染源治理。针对湖泊自身氮磷较高,可种植吸收氮磷元素的水生植物,底泥疏浚、封闭底泥、引清冲污等措施进行整治;而治理外源污染物应从湖泊干支流及红枫湖下泄水的定期监测入手,湖区周围的居民点产生的废弃物可集中处理并及时运走,工农业产生的“三废”应处理后达标排放并向绿色生态型产业发展;此外,应加强宣传教育保护湖区的知识教育,提高人们的保护意识,同时制定保护百花湖的政策。未来保护百花湖可利用 RS、GIS 及相关的水文预测模型等技术相结合的手段,届时的湖泊防治措施将更科学有效。

### 参考文献:

[1] 金相灿. 中国湖泊环境 [M]. 北京: 海洋出版社, 1995. (JIN Xiangcan. China Lake Environment [M]. Beijing: Ocean Press, 1995. (in Chinese))  
 [2] 彭敏,王新宇,黄志红,等. 水体富营养化监测、评价与防治[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989. (PENG Min, WANG Xinyu, HUANG Zhihong, et al. Monitoring, Evaluation and Prevention of Eutrophication of Water Bodies [M]. Beijing: China Environmental Science

Press, 1989. (in Chinese))  
 [3] 何淑英,徐亚同. 太湖蓝藻的成因与启示[J]. 上海化工, 2007,(9):1-3. (HE Shuying, XU Yatong. Formation and revelation of blue algae in Taihu Lake [J]. Shanghai Chemical Industry, 2007,(9):1-3.(in Chinese))  
 [4] 李娜,黎佳茜,李国文,等. 中国典型湖泊富营养化现状与区域性差异分析[J]. 水生生物学报, 2018,42(4):854-864. (LI Na, LI Jiaxi, LI Guowen, et al. The eutrophication and its regional heterogeneity in typical Lakes of China [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2018,42(4): 854-864. (in Chinese))  
 [5] 何佳,徐晓梅,杨艳,等. 滇池水环境综合治理成效与存在问题[J]. 湖泊科学, 2015,27(2):195-199. (HE Jia, XU Xiaomei, YANG Yan, et al. Problems and effects of comprehensive management of water environment in Lake Dianchi [J]. Journal of Lake Sciences, 2015,27(2):195-199. (in Chinese))  
 [6] 欧阳阳远. 中国西南喀斯特生态脆弱区的综合治理与开发脱贫[J]. 世界科技研究与发展, 1998,(2):53-56. (OUYANG Ziyuan. On the comprehensive management,development and breaking away from poorness of the ecologically fragile Karst area in South-West China [J]. World Sci-Tech R & D ,1998,(2):53-56. (in Chinese))  
 [7] 彭贤伟,熊康宁. 喀斯特地区可持续发展指标体系构建与可持续发展能力评价——以贵州清镇退耕还林(草)生态示范基地为例[J]. 中国岩溶, 2003,22(1):18-23. (PENG Xianwei, XIONG Kangning. Index system constitution and ability appraisal of sustainable development in Karst areas—A case study on the Qingzhen demonstration base returning arable land to woodland (grassplot) in Guizhou [J]. Carsologica Sinica, 2003,22(1):18-23. (in Chinese))  
 [8] 钱莉莉,贺中华,梁虹,等. 基于降水 Z 指数的贵州省农业干旱时空演化特征[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2019,37(1):10-14. (QIAN Lili, HE Zhonghua, LIANG Hong, et al. Spatial-temporal evolution characteristics of agricultural drought based on precipitation Z index in Guizhou [J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2019,37(1):10-14. (in Chinese))  
 [9] 李秋华. 贵州高原水库富营养化特征及评价[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2018,36(2):1-8. (LI Qiuhua. Characteristics and evaluation of eutrophication in Guizhou plateau reservoirs [J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2018,36(2):1-8. (in Chinese))  
 [10] 夏品华,林陶. 百花湖水库后生浮游动物群落结构时空分布特征及水质评价[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2018,36(1):45-50+56. (XIA Pinhua, LIN Tao. Spatial and temporal distributions of the metazooplankton community structure and water quality in Baihuahu reservoir [J]. Journal of Guizhou Normal University(Natural Sciences), 2018,36(1):45-50+56. (in Chinese))  
 [11] 连国奇. 百花湖富营养化调查及沉积物磷形态研究 [D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2009. (LIAN Guoqi. Eutrophication Investigation of Baihua Lake and Study on the Phosphorus Forms in Sediments [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2009. (in Chinese))  
 [12] 廖国华,钟晓,庞增铨. 红枫湖、百花湖水污染趋势分析及控制对策[J]. 地球与环境, 2004,32(3):49-52. (LIAO Guohua, ZHONG Xiao, PANG Zengquan. Analysis of water pollution and control measures

- in both Hongfeng Lake and Baihua Lake [J]. *Earth and Environment*, 2004,32(3):49-52. (in Chinese)
- [13] 张杰,胡继伟,黄先飞,等. 百花湖表层沉积物磷的化学形态及 pH 值对磷释放的影响[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2011,29(3):36-41. (ZHANG Jie, HU Jiwei, HUANG Xianfei, et al. The influence of phosphorus form and pH value on release of phosphorus from sediment in Baihua Lake [J]. *Journal of Guizhou Normal University(Natural Sciences)*, 2011,29(3):36-41. (in Chinese))
- [14] 王雨春,朱俊,马梅,等. 西南峡谷型水库的季节性分层与水质的突发性恶化[J]. *湖泊科学*, 2005,17(1):54-60. (WANG Yuchun, ZHU Jun, MA Mei, et al. Thermal stratification and paroxysmal deterioration of water quality in a Canyon-Reservoir, Southwestern China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2005,17(1):54-60. (in Chinese))
- [15] 金相灿,屠清瑛. 《湖泊富营养化调查规范》(第二版)[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1990. (JIN Xiangcan, TU Qingyu. *Guidelines for Lake Eutrophication Survey (Second Edition)* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990. (in Chinese))
- [16] 张远,郑丙辉,刘鸿亮,等. 三峡水库蓄水后氮、磷营养盐的特征分析[J]. *水资源保护*, 2005,21(6):27-30. (ZHANG Yuan, ZHENG Binghui, LIU Hongliang, et al. Characters of nitrogen and phosphorus of the Three Reservoir after impounding [J]. *Water Resources Protection*, 2005,21(6):27-30. (in Chinese))
- [17] 李祚泳,张辉军. 我国若干湖泊水库的营养状态指数 TSic 及其与各参数的关系[J]. *环境科学学报*, 1993,13(4):391-397. (LI Zuoyong, ZHANG Huijun. Trophic state index and its correlation with lake parameters [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1993,13(4):391-397. (in Chinese))
- [18] 白占国,吴丰昌,万曦,等. 百花湖季节性水质恶化机理研究[J]. *重庆环境科学*, 1995,17(3):10-14. (BAI Zhanguo, WU Fengchang, WAN Xi, et al. Mechanism of water quality worsening seasonally in Lake Aha[J]. *Chongqing Environmental Science*, 1995,17(3):10-14. (in Chinese))
- [19] 陈田耕. 关于磷自沉积物的释放[J]. *环境科学丛刊*, 1988,8(1):36-41. (CHEN Tiangeng. About the release of phosphorus from sediments [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 1988,8(1):36-41. (in Chinese))
- [20] Jones R I, Reynolds C S. *The Ecology of Freshwater Phytoplankton* [M]. Cambridge University Press, 1984.
- [21] 胡初,林秋奇,段舜山,等. 热带亚热带水库浮游植物叶绿素 a 与磷分布的特征[J]. *生态科学*, 2002,21(4):310-315. (HU Ren, LIN Qiuyi, DUAN Shunshan, et al. Distribution of Chlorophyll-a and phosphorus in subtropical reservoirs, South China [J]. *Ecological Science*, 2002,21(4):310-315. (in Chinese))
- [22] Sakamoto M. Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth [J]. *Archiv für Hydrobiologie*, 1996,62:1-28.
- [23] 韩菲,陈永灿,刘昭伟. 湖泊及水库富营养化模型研究综述[J]. *水科学进展*, 2003,14(6):785-791. (HAN Fei, CHEN Yongcan, LIU Zhaowei. Advance in the eutrophication models for lakes and reservoirs [J]. *Advances in Water Science*, 2003,14(6):785-791. (in Chinese))
- [24] 金赞芳,龚嘉临,施伊丽,等. 沉积物-水界面氮的源解析和硝化反硝化[J]. *环境科学*, 2017,38(4):1423-1430. (JIN Zanfang, GONG Jialin, SHI Yili, et al. Nitrate source identification and nitrification-denitrification at the sediment-water interface [J]. *Environmental Science*, 2017,38(4):1423-1430. (in Chinese))
- [25] Ruttenberg K C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments [J]. *Limnology & Oceanography*, 1992,37(7):1460-1482.

## Eutrophication of Lakes in Karst Plateau Based on the Comprehensive Trophic State Index Method

ZHAO Meng<sup>1,2</sup>, JIAO Shulin<sup>1,2</sup>, LIANG Hong<sup>1,2</sup>

(1. School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China;

2. Key Laboratory of Remote Sensing Application on Mountain Resources and Environment in Guizhou Province, Guiyang 550001, China)

**Abstract:** Many lakes have been seriously polluted by increasing human activities on the earth's surface with social and economic development, especially for eutrophication caused by the nutrients such as nitrogen and phosphorus. Karst plateau lakes have unique ecological environment and geographical background. Because of their fragile ecosystem, it is difficult to recover from ecological damage. Therefore, this paper monitored and counted the monthly physical and chemical parameters in the Baihua Lake during 2012-2016. In addition, it analyzed the temporal and spatial trends of the different indexes, then the comprehensive evaluation of Baihua Lake was carried out by using the comprehensive nutritional status index evaluation method. The results show the eutrophication grades and its changing trend of the reservoir, which would provide a basis for comprehensive prevention and control of pollution in the Baihua Lake.

**Key words:** water quality; comprehensive trophic state index method; Baihua Lake

赵梦,焦树林,梁虹同志的题目为《基于综合营养状态指数的喀斯特高原湖泊富营养化研究》的论文已于 2019 年 11 月 11 日在中国知网网络首发。网络首发地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1814.P.20191109.1154.001.html>