

# 贵州红枫湖水质时空变化特征研究

张耀<sup>1</sup>, 杨永琼<sup>1\*</sup>, 李晓燕<sup>1</sup>, 王敬富<sup>2</sup>, 余萍萍<sup>2,3</sup>, 陈权<sup>2</sup>, 金祖雪<sup>2,3</sup>

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550001; 2. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081; 3. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** 选取云贵高原典型的人工亚深水型湖泊红枫湖为研究对象, 通过为期 10 个月(2017 年 6 月—2018 年 3 月)、多点位(羊昌河、南湖中、后五、花鱼洞、大坝和北湖中共 6 点位)的月度分层采样监测与化学分析, 阐明了水体中总磷、总氮和氨氮的时空分布特征。结果表明: 红枫湖水体总磷浓度呈现出“上游高于下游、南湖高于北湖”的空间分布特征, 水体总磷的季节变化趋势为丰水期 > 平水期 > 枯水期, 其垂直分布整体呈现出底层 > 中层 > 表层的规律。水体中总氮的季节变化趋势为丰水期 > 平水期 > 枯水期, 羊昌河和后五的总氮含量明显高于其他 4 个点位, 氨氮含量都高于同时段水体中的平均含量。磷是红枫湖全湖水体富营养化的主要限制因子, 研究结果为红枫湖水环境评价与保护提供了科学基础。

**关键词:** 红枫湖; 总磷; 总氮; 氨氮; 时空分布

中图分类号: X824; X524 文献标识码: A

## Temporal and spatial variation of water quality of Hongfeng lake in Guizhou province

ZHANG Yao<sup>1</sup>, YANG Yongqiong<sup>1\*</sup>, LI Xiaoyan<sup>1</sup>, WANG Jingfu<sup>2</sup>,  
YU Pingping<sup>2,3</sup>, CHEN Quan<sup>2</sup>, JIN Zuxue<sup>2,3</sup>

(1. School of Geographic and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China;  
2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550081,  
China; 3. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

**Abstract:** With the monthly stratified sampling monitoring and chemical analysis in multiple spots (Yangchanghe, Nanhuzhong, Houwu, Huayudong, Daba and Beihuzhong, in total six spots) for a period of 10 months from June 2017 to March 2018, this article illuminated the spatial and temporal distribution characteristics of the total phosphorus, the total nitrogen and ammonia-nitrogen in the water. The results indicated that: for the total phosphorus, its concentration in the Hongfeng lake presented spatial characteristics of that the upstream exceeded the downstream and the south over the north, with seasonal changes as flood season > normal season > drought period and the overall vertical distribution as bottom > middle > surface; For the total nitrogen in the water, it has seasonal changes as flood season > normal season > drought period and its volume in Yangchanghe and Houwu are apparently higher

收稿日期: 2018-05-30

基金项目: 贵州省科学技术基金项目( [2014] 2130); 贵州省科技厅-贵州师范大学联合基金项目(黔科合 LH 字 [2017]7344 号)

\* 通讯作者: 杨永琼(1984-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 环境污染控制, E-mail: yyongqiong@163.com.

than the other four spots; The ammonia-nitrogen content is higher than the average during the same period. Phosphorus is the primary limiting factor of water eutrophication in the Hongfeng lake, the research results provided a scientific basis for the environmental evaluation and protection of the Hongfeng lake.

**Key words:** Hongfeng lake; total phosphorus; total nitrogen; ammonia nitrogen; temporal and spatial distribution

## 0 引言

富营养化是中国目前面临的最重要的水环境问题之一,是影响湖泊水质好坏的重要因素。水体氮、磷是湖泊生态系统中重要的生源要素,其形态和含量不仅决定了湖泊初级生产力和生态系统的稳定程度,还是湖泊富营养化过程中关键的影响要素之一<sup>[1-3]</sup>。磷被公认为湖泊富营养化的关键限制因子,是当前湖泊生态系统的重要养分元素<sup>[4]</sup>。

红枫湖是贵阳市的重要饮用水水源地,其水环境的好坏也影响着贵阳市人民的生活质量和库区周边工农业生产水平,近年来其水质情况一直受到广泛关注。磷是影响红枫湖水体富营养化的一个重要指标,它的时空分布也有明显的特征<sup>[5]</sup>。本研究主要考察了红枫湖水体总磷的时空分布特征及变化规律,分析其影响因素及环境效应。此外还对水体中总氮、氨氮的时空分布特征进行了简要说明,以期全面了解红枫湖污染状况及进一步治理提供基础资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

1960年建成的红枫湖是贵州省最大的高原人工湖泊之一,地处贵州中部乌江主要支流猫跳河的上游,坐标为 $106^{\circ}19' \sim 106^{\circ}28' E, 26^{\circ}26' \sim 26^{\circ}35' N$ ,属于峡谷断陷盆地的河流型水库<sup>[6]</sup>。湖区主要由北湖和南湖组成,上至羊昌河,下到偏山寨。红枫湖设计正常高水位1240.00 m(吴淞标高),死水位1227.50 m<sup>[7]</sup>。因为人为调控,湖区的枯水期的储水量比丰水期多。红枫湖流域年均降水量1174.7~1386.1 mm,降水主要集中在6-8月<sup>[8]</sup>。红枫湖现已被国务院批准为国家级风景名胜区,是贵阳的“三口水缸”之一,供应着120余万人的饮水,供水量占贵阳市主城区用水量的70%<sup>[7]</sup>。

### 1.2 采样点设置

根据红枫湖湖区的分布和周围环境状况共设置6个采样点(图1),分别为羊昌河、南湖中、后五、花鱼洞、大坝和北湖中,每个点分表层、中层和底层3个垂直点位采样。

采样时间为2017年6月-2018年3月,每月采样1次。当采样船开到相应采样点采集水样,现场用YSI水质参数仪测定样品水深、温度、透明度、pH值和DO(溶解氧)等参数,采样时间控制在10:00-15:00,采样后将样品送回实验室立即测定。

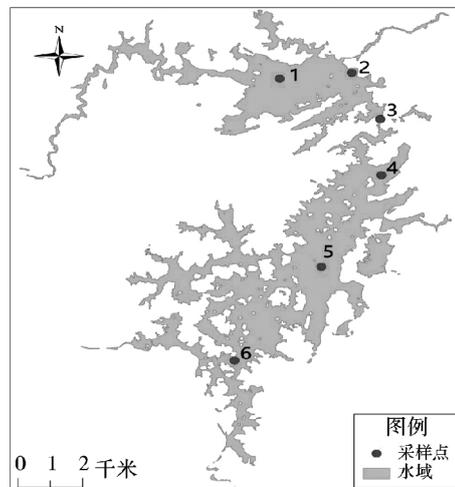


图1 红枫湖采样点分布示意图(1)北湖中;(2)大坝;(3)花鱼洞;(4)后五;(5)南湖中;(6)羊昌河

Fig.1 Sampling points and location of Hongfeng lake  
(1) Beihuzhong; (2) Daba; (3) Huayudong; (4) Houwu;  
(5) Nanhuzhong; (6) Yangchanghe

### 1.3 测定方法

水体总磷按照国标法——钼酸铵分光光度法(GB 11893-89)测定;总氮按照国标法-碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894-89)测定;氨氮按照国标法-纳式试剂分光光度法(HJ 535-2009)测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 红枫湖水体总磷的季节分布规律

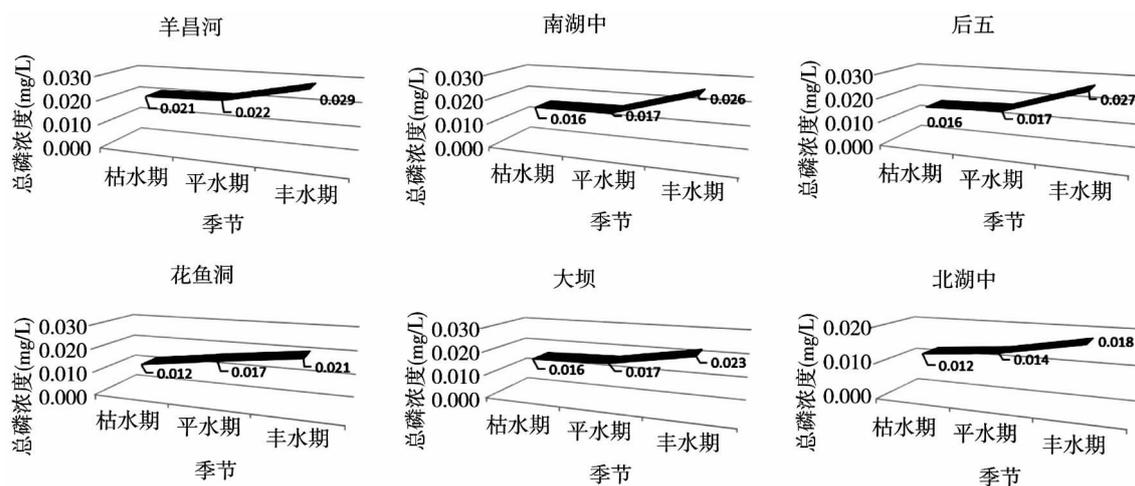


图 2 红枫湖水体中总磷浓度季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of total phosphorus concentrations in Hongfeng lake

从各个采样点在枯水期(12-3月)、平水期(9-11月)、丰水期(4-8月)的总磷浓度季节变化三维折线图(见图2)可以看出,6个采样点的水体总磷浓度季节分布均呈现出丰水期>平水期>枯水期的规律。其中,羊昌河、南湖中和后五的浓度变化幅度较大,而花鱼洞、北湖中和大坝则相对平稳。

表 1 红枫湖不同季节的总磷浓度均值

Tab. 1 Average total phosphorus concentration in different seasons of Hongfeng lake

季节	层面	总磷浓度(mg/L)	平均浓度(mg/L)
枯水期	表层	0.011	0.015
	中层	0.016	
	底层	0.020	
平水期	表层	0.013	0.017
	中层	0.016	
	底层	0.021	
丰水期	表层	0.019	0.024
	中层	0.026	
	底层	0.027	

将每个季节所对应的6个采样点的总磷浓度数据取平均值,结果如表1所示。从表1可知,丰水期浓度最高,为0.024 mg/L,平水期浓度次之,为0.017 mg/L,枯水期浓度最低,为0.015 mg/L。在同一季节,总磷浓度垂直分布均呈现出底层>中层>表层的规律。水体总磷平均浓度的变化情况为:总磷表层浓度变化范围在0.011 mg/L至0.019 mg/L之间,中层浓度变化范围在0.016 mg/L至0.026 mg/L之间,底层浓度变化范围在0.020 mg/L至0.027 mg/L之间。历史资料显示,红枫湖在

2006至2010年间发生蓝藻水华现象严重的时间一般在每年5-8月的晴天高温时<sup>[9]</sup>,pH值均在8至9之间。每年5-8月为降水量较多的丰水期,且总磷平均浓度最高,该季节发生水华的机率较大。另外,通过监测可见,水体不同时期的pH值基本稳定在8至9之间,与历史数据接近。

### 2.2 红枫湖水体总磷的水平分布规律

红枫湖作为河道型梯级开发的人工湖,湖底地形复杂,湖岸蜿蜒曲折,这些自然环境特征也导致了红枫湖水体中磷的含量水平分布不均<sup>[10]</sup>。

研究发现,红枫湖水体中各个点位的总磷含量分布并不平均,如图2所示。湖区总磷浓度最大的为羊昌河点位,其丰水期总磷平均浓度达0.029 mg/L;在同季节,后五的总磷浓度值次之,为0.026 mg/L。后五作为全湖沉积物磷、氮和有机质污染最严重的区域,是湖区最早开展网箱养鱼的区域<sup>[11]</sup>。当前此行为虽已被禁止,但该行为也增加了后五湖区内源磷释放的风险。羊昌河为磷污染的重点区域,位于羊昌河上游平坝县高峰镇、马场镇等村寨所产生的生活垃圾以及该河中下游化工企业所排放的含磷废水都会影响到该区域磷的含量。

选取南湖的代表性区域羊昌河和南湖中,以及北湖的代表性区域大坝和北湖中的不同季节所对应的浓度值进行比较(结果见图3)。由图3可以看出,在3个不同时期,从红枫湖湖区的上游到下游,随着水流的变化,南湖区域(羊昌河和南湖中)水体中的总磷浓度均高于北湖区域(大坝和北湖中),处于上游的羊昌河总磷浓度明显高于北湖中。在全年降雨量最多的丰水期,南湖中的总磷浓度是北湖中的1.61倍。

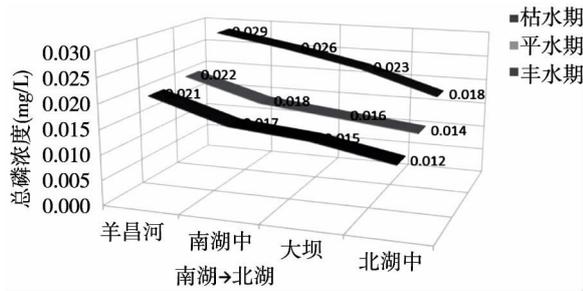


图 3 不同季节南北湖总磷浓度变化

Fig. 3 Changes of total phosphorus concentration in the north and south lakes in different season

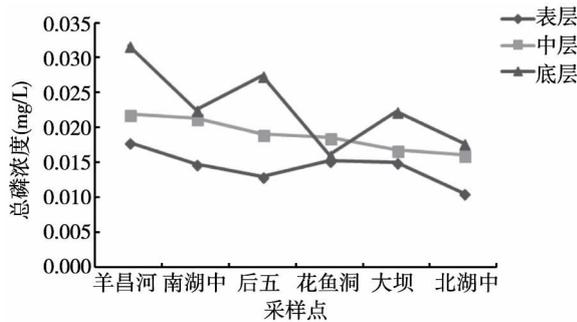


图 4 红枫湖总磷浓度垂直分布趋势

Fig. 4 Vertical distribution of total phosphorus concentration in Hongfeng lake

### 2.3 红枫湖水体总磷的垂直分布规律

整体来看,羊昌河、南湖中、后五、大坝和北湖中这 5 个采样点的总磷浓度垂直分布均呈现出底层 > 中层 > 表层的规律,花鱼洞则呈现出中层 > 底层 > 表层的规律,表层和底层的浓度十分接近(见图 4)。另外,后五和羊昌河的总磷浓度垂直变化幅度较大,而花鱼洞、大坝和北湖中的变化幅度较小。出现这些规律不统一的现象可能是由于不同点位之间水文条件的不同所造成的。红枫湖湖区花鱼洞、大坝和北湖中的水深平均都在 25 m 左右,这 3 个点位为湖区最深的区域。因而,上述 3 个点的总磷浓度垂直变化幅度较小的原因可能是湖中水体交换快。

红枫花花鱼洞大桥是南湖与北湖之间的“分界线”,是南湖水进入北湖的通道,特点是狭窄、水流深急。由于湖岸之间距离较近的特点,水浪与湖岸碰撞及扰动,会导致大量营养盐和沉积物的释放,加上水流速度过快,可能是造成花鱼洞大桥区域总磷浓度垂直变化不规律的原因。

### 2.4 水体 DO(溶解氧)变化规律

从图 5 可以看出,在降雨量充足的丰水期,红枫湖水体 DO 比枯水期和平水期都低,最低值出现

在北湖中,为 1.77 mg/L,而枯水期的溶解氧整体值较大。结合图 2 可以看出,丰水期 6 个采样点的总磷平均浓度均为最高,枯水期最低。一般来说,如果水体发生藻类水华现象,藻类的繁殖消耗氧气。除此之外,死亡藻类的分解作用也会大量消耗氧气,使得水中 DO 降低,水生动物也有可能因为缺氧而死亡<sup>[12]</sup>,若 DO 含量过低可导致水体发黑、发臭。因此在整体 DO 较低的丰水期,发生水华污染现象的可能性较大。

以全年平均气温最高的丰水期为例,从表 2 可以看出,丰水期表层的 DO 含量较高,在 6.75 mg/L 至 11.89 mg/L 之间,表层的藻类繁殖较快,富氧能力较强,因此值较高;在中层,因为水流交换减弱,DO 稳定在 2.41 mg/L 至 2.81 mg/L 之间;而底层 DO 则降低至 0.40 mg/L 以下。随着深度的增加,水体中藻类繁殖能力下降,富氧能力降低,因此 DO 降低<sup>[13]</sup>。

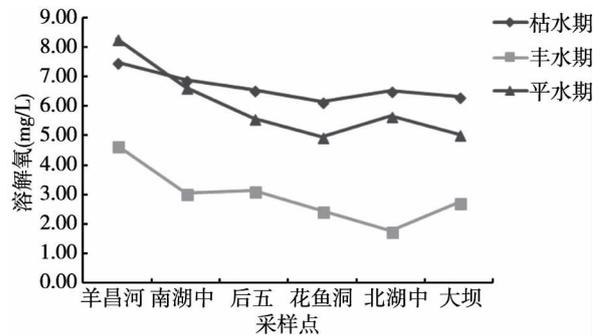


图 5 水体 DO(溶解氧)变化

Fig. 5 Change in dissolved oxygen in water

表 2 丰水期 DO(溶解氧)含量

Tab. 2 The dissolved oxygen content in the fertile period

	羊昌河 (mg/L)	南湖中 (mg/L)	后五 (mg/L)	花鱼洞 (mg/L)	大坝 (mg/L)	北湖中 (mg/L)
表层	11.89	9.6	8.79	8	6.75	7.65
中层	2.81	2.48	2.71	2.46	2.41	2.58
底层	0.32	0.23	0.28	0.2	0.18	0.21

### 2.5 红枫湖水体氮污染特征

如图 6 所示,红枫湖水体中总氮的季节性差异较明显,呈现出丰水期 > 平水期 > 枯水期的规律。在丰水期,高温导致沉积物中的氮矿化速率加快,在微生物的作用下进一步转化释放出氮,在雨季风浪的扰动下会导致水体中总氮浓度升高<sup>[14]</sup>。在枯水期,较低的水温使水体中悬浮颗粒物的溶解度降低,有利于悬浮颗粒物沉积,导致水体中总氮的浓度降低。另外,从图 6 红枫湖水体中总氮的季节变

化图可以看出,在 3 个季节,以花鱼洞为界,北湖区的总氮浓度均明显低于南湖,羊昌河和后五水中总氮浓度明显高于其他 4 个点位。羊昌河中下游化工企业含氮废水的排放,以及附近田地施肥会导致总氮含量变高。另外,降雨也会导致地表径流增大,导致地表化肥的大量流失,也会造成总氮含量的增高<sup>[15]</sup>。

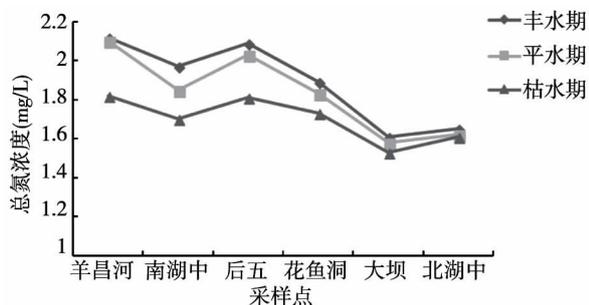


图 6 红枫湖水体中总氮季节变化

Fig. 6 Seasonal changes of total nitrogen in Hongfeng lake

红枫湖水体中氨氮水平变化如图 7 所示,羊昌河和后五的氨氮含量都高于其它点位。这 2 处氨氮浓度过高,可能是由于羊昌河中下游化工企业含氮废水的排放以及 20 世纪 90 年代,后五区域网箱养鱼所带来的污染;也可能是硝化过程受到抑制而导致亚硝态氮的积累,从而导致氨氮的转化不明显<sup>[15]</sup>。除此之外,由于羊昌河的河流较长,后五电厂附近的流域面积较广,所以这 2 个区域受农业产区覆盖面积影响,穿越主农业产区的面积较大,污染物短期内不能及时转化<sup>[15]</sup>。

### 2.6 水体氮磷比对富营养化的影响

氮和磷是衡量湖泊水库水体富营养化的 2 个主要因子,氮磷比是判断水体富营养化、发生蓝藻几率及两者中的主控因子的 1 个重要参数<sup>[16]</sup>。藻类细胞组成的原子比率 C: N: P = 106: 16: 1, 如果氮磷比超过 16: 1, 磷被认为是限制性因素;反之,氮通常被认为是限制性因素<sup>[17]</sup>。

表 3 红枫湖水体不同季节不同点位氮磷比

Tab. 3 The ratio of nitrogen to phosphorous at different points in different seasons in Hongfeng lake

季节	羊昌河	南湖中	后五	花鱼洞	大坝	北湖中	均值
枯水期	86.7	110.5	119.5	153.4	97.0	200.2	127.9
平水期	91.2	94.4	103.9	104.7	104.7	129.0	104.7
丰水期	79.8	72.6	41.1	88.9	70.6	103.2	76.0

相关资料显示总磷浓度在 0.02 ~ 0.05 mg/L 为中营养型,0.05 ~ 0.09 mg/L 为富营养型,高于 0.09 mg/L 为重富营养型<sup>[18]</sup>。根据本研究的监测

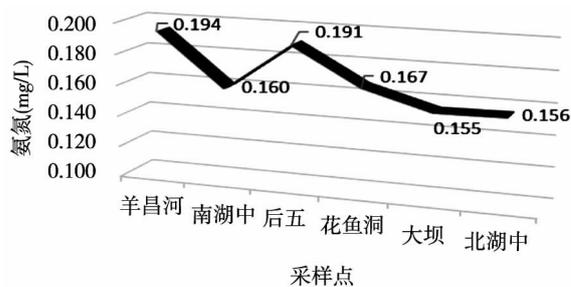


图 7 红枫湖水体中氨氮水平变化

Fig. 7 Ammonia-nitrogen level changes in Hongfeng lake

研究发现,红枫湖水体的氮磷比在 41.1 ~ 200.2 之间(见表 3)。根据表 3 可以看出,在枯水期,湖区不同采样点的氮磷比相差较大,最大值为 200.2,最小值为 86.7,分别出现在北湖中和羊昌河;在丰水期,不同采样点所对应的氮磷比各不相同,数值在 41.1 至 103.2 之间,后五所对应的氮磷比最小,其次为南湖中和羊昌河;在平水期,氮磷比相差也比较明显,最大值出现在北湖中,为 129.0,最小值出现在羊昌河,为 91.2。此外,后五和羊昌河氮磷比整体较小,最高为大坝和花鱼洞。结合前文的总磷水平分布情况,可以看出羊昌河和后五附近的总磷污染比较严重,容易发生蓝藻水华现象,而大坝则相对安全。

红枫湖丰水期、平水期和枯水期的氮磷比均值分别为 76.0、104.7 和 127.9(见表 3),结合图 2 和表 1 的分析,可以说明在氮磷比最高的枯水期,水体发生富营养化的几率较低,在氮磷比最低的丰水期发生富营养化的几率较大。红枫湖独特的地理特征也造成了各个区域的水量大小不一,水量也对湖区水体氮磷比影响较大。在全年降水量最大且极易发生蓝藻水华现象的丰水期。有关部门应加强对后五电厂和羊昌河入口水质变化的监控,避免农业非点源污染,防止发生水体富营养化<sup>[5]</sup>。

结果,在丰水期,羊昌河和后五的总磷浓度为 0.02 ~ 0.05 mg/L,达到了中营养型。当前,贵州省的饮用水源地水库的水质状况仍不容乐观,尤其是在丰

水期<sup>[19]</sup>。从氮磷比的分析来看,红枫湖湖区的氮磷比远远大于16:1这个值,故磷是红枫湖水体富营养化的主要限制因子。

### 3 结论

1) 从水平分布特征来看,受上游污染和水流影响,红枫湖水体总磷浓度呈现出“上游高于下游、南湖高于北湖”的趋势。总磷浓度的最高值出现在后五,其次为羊昌河区域。

2) 红枫湖水体中总磷的季节分布规律主要表现为:丰水期浓度值高于枯水期。在同一水文时期,枯水期、丰水期和平水期时的总磷浓度均呈现出底层>中层>表层的规律。

3) 红枫湖水体总磷的垂直分布规律整体呈现出底层>中层>表层的特点,但花鱼洞由于特殊的地理位置及水文特征则呈现出中层>底层>表层的现象。

4) 红枫湖水体中总氮的季节变化趋势为丰水期>平水期>枯水期,在丰水期所处的夏季,水体中总氮浓度最高,以花鱼洞为界,北湖湖区的总氮浓度均明显低于南湖;羊昌河和后五的氨氮含量都高于同时段水体中的平均含量,可能是由于硝化过程中受到抑制而导致亚硝态氮的积累,从而导致氨氮的转化不明显。

5) 红枫湖水体的氮磷比在41.1~200.2之间,磷是红枫湖全湖水体富营养化的主要限制因子。

### 参考文献:

- [1] BERMAN T, BRONK D A. Dissolved organic nitrogen: A dynamic participant in aquatic ecosystems [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2003, 31: 279-305.
- [2] CARPENTER S R. Phosphorus control is critical to mitigating eutrophication [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105(32): 11039-11040.
- [3] 王珺, 裴元生, 杨志峰. 营养盐对白洋淀草型富营养化的驱动与限制 [J]. *中国环境科学*, 2010, 30(SI): 7-13.
- [4] 范成新, 张路, 王建军, 等. 湖泊底泥疏浚对内源释放影响的过程与机理 [J]. *科学通报*, 2004, 49(15): 1523-1528.
- [5] CHEN Y, LIU R M, SUN C C, et al. Spatial and temporal variations in nitrogen and phosphorous nutrients in the Yangtze River estuary [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(10): 2038-2089.
- [6] 张维. 红枫湖富营养化特征及水质改善对策 [J]. *贵州环保科技*, 2004, 10: 11-19.
- [7] 贵阳市两湖一库管理局、贵州省环境科学研究设计院. 红枫湖百花湖流域污染防治及水环境综合治理规划(2013-2017) [Z]. 2012. 10.
- [8] 杨通铨, 刘鸿雁, 喻阳华. 红枫湖水质变化趋势及原因分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 11(23): 96-97.
- [9] 李峰, 秦红超, 储蓉, 等. 红枫湖水环境因子监测与水华防控措施探讨 [J]. *贵州科学*, 2012, 30(4): 71-73.
- [10] 万国江, 万思源, 陈敬安, 等. 深水人工湖环境生物地球化学过程研究: 以贵州红枫湖-百花湖为例 [J]. *地球与环境*, 2010, 38(3): 262-270.
- [11] 王敬富, 陈敬安, 曾艳, 等. 贵州红枫湖沉积物磷赋存形态的空间变化特征 [J]. *湖泊科学*, 2012, 24(5): 794.
- [12] 申德君, 张曼华, 刘艳, 等. 红枫湖水库富营养化现状分析 [J]. *贵州大学学报(自然科学版)*, 2006, 23(2): 176-177.
- [13] 郭伟. 杜塘水库溶解氧随深度变化规律 [J]. *海峡科学*, 2012, 6: 27-28.
- [14] 王书航, 王雯雯, 姜霞, 等. 蠡湖水体氮、磷时空变化及差异性分析 [J]. *中国环境科学*, 2014, 34(5): 1268-1276.
- [15] 宋晓敏, 季宏兵, 江用彬, 等. 丰水期红枫湖流域氮污染特征的变化规律研究 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2010, 29(1): 27-28.
- [16] 蔡炎龙, 李颖, 郑子航. 我国湖泊系统氮磷时空变化及对富营养化影响研究 [J]. *地球与环境*, 2010, 38(2): 235-240.
- [17] LI R X, ZHU M Y, CHEN S, et al. Responses of phytoplankton on phosphate enrichment in mesocosms [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(4): 603-607.
- [18] 牛晓君. 富营养化发生机理及水华暴发研究进展 [J]. *四川环境*, 2006, 25(3): 74-76.
- [19] 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): 1-7.