

Seasonal Variation and Spatial Heterogeneity of Water Quality Parameter in Chenghai

Zhiming Lu*, Hucai Zhang#, Fengqin Chang, Lizeng Duan, Huayong Li, Rongxin Bi, Han Wu, Shuaiying Zhao, Yang Zhang

Key Laboratory of Plateau Lake Ecology and Global Change, Yunnan Provincial Key Laboratory of Geographical Process and Environmental Change on the Plateau, School of Tourism and Physical Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan
Email: ynnulzm@163.com, *zhanghc@niglas.ac.cn

Received: Jul. 5th, 2017; accepted: Jul. 28th, 2017; published: Aug. 1st, 2017

Abstract

Based on the monitoring data of four vertical cross-section in October 2015, March 2016, May 2016 and July 2016, the variation characteristics of water quality parameters, which include temperature, chlorophyll-a, pH and dissolved oxygen (DO) in Lake Cheng or Chenghai were analyzed. The results indicated that the lake water was well mixed in the winter and spring; during the period the water quality is stable. But when the water temperature stratified in summer and autumn, the content of chlorophyll and the value of pH changed substantially along with the vertical movement of thermocline. Especially, with the temperature rising, the position of stratified DO layer became higher than thermocline, leading to a thickening of water body with low DO content. This process induced the release of nutrients from the lake sediments and promoted eutrophication and cyanobacteria blooming. Moreover, as Lake Cheng is deeper in north while shallower in south, together with stronger wind-wave disturbance in the south, the surface water temperature in south was lower than that in the north all the year round. This situation resulted in the amount of aquatic plant in the lake reduced from north to south gradually. The water quality in south lake is better than that in north, showing an obvious spatial heterogeneity. We recommend that the lake water quality monitoring should be strengthened in order to have a full understanding of the lake water quality and take measurements to prevent further deterioration of the lake water quality.

Keywords

Lake Cheng, Water Quality Parameter, Water Temperature, Wind-Wave Disturbance, Seasonality, Spatial Heterogeneity

*第一作者。

#通讯作者。

程海水质参数季节变化特征与空间异质性

路志明, 张虎才*, 常凤琴, 段立曾, 李华勇, 毕荣鑫, 吴 汉, 赵帅营, 张 扬

云南师范大学旅游与地理科学学院, 高原湖泊生态与全球变化实验室, 云南省地理过程与环境变化重点实验室, 云南 昆明

Email: ynnulzm@163.com, *zhanghc@niglas.ac.cn

收稿日期: 2017年7月5日; 录用日期: 2017年7月28日; 发布日期: 2017年8月1日

摘 要

本文以2015年10月、2016年3月、2016年5月和2016年7月对程海的四次垂直剖面实测数据为基础, 通过分析探讨温度、叶绿素、pH值和溶解氧等参数的变化特征, 发现冬春季程海处于混合期, 水质稳定, 但在夏秋季水温发生分层后, 叶绿素含量和pH值随着温跃层的上下移动而发生明显变化, 尤其是随温度升高, 溶解氧分层位置高于温跃层, 导致溶解氧含量极低的水体厚度增加, 加剧了底层沉积物中的营养盐释放, 造成水体富营养化加剧和蓝藻水华爆发, 对水安全造成威胁。由于程海整个湖盆北深南浅并受风浪扰动影响, 使得南部湖区全年表层水温均低于北部湖区, 导致整个湖区水生植物量自北向南逐渐降低。程海南部湖区水质优于北部湖区, 表现出了明显的空间异质性。建议加强水质监测、掌握其变化规律及影响因素, 搞清营养物质成分来源及湖泊自循环过程, 采取科学措施, 防止水质持续恶化。

关键词

程海, 水质参数, 气温, 风浪扰动, 季节性, 空间异质性

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

深水型湖泊(包括水库)由于水温温差大、持续时间长, 因此引起水体季节分层, 这种现象是深水型湖泊一个重要的特征[1]。相对于浅水湖泊而言, 深水湖泊一方面受风力影响小, 垂直温差大, 易形成稳定的分层现象[2], 其次深水湖泊的热分层阻碍上下层水体的对流交换, 影响氮、磷营养盐及光照在水体中的分布, 从而对水体溶解氧浓度和水生生物的垂直分布产生影响, 引起水环境质量的变化[3] [4] [5]。

我们在长期观测分析过程中发现, 深水湖泊下层水温与当地年平均气温存在某种关系, 因此, 研究湖泊温度变化、叶绿素浓度、溶解氧和 pH 值等水化学参数的变化不仅对湖泊富营养化预防及水质保护具有现实意义, 而且对局部气候变化研究, 甚至全球气候变化研究具有很重要的参考意义。

程海作为重要的淡水资源载体, 一直承担着湖区周边民众的生产生活用水, 湖中动植物资源丰富, 更为重要的是作为世界上三大螺旋藻自然生长地之一, 以出产高质量螺旋藻而闻名[6] [7] [8] [9]。然而, 随着湖周边人口日益增多, 工农业逐渐发展, 程海水质每况日下, 尤其是螺旋藻人工养殖以来, 其水体

富营养化日益严重,一年中水华多次爆发[7][8],对湖泊生态环境产生重要影响。以往的研究大多从水生植物和浮游动物角度对程海的富营养化进行分析,很少有针对水质参数长期定点监测数据的发表或评述,未见有公开发表数据或有效监测数据,同时数据获得困难,更不用讲获得测点位置及其它相关信息。为弥补上述不足、系统了解现今程海水质状况,我们从2015年10月起对程海开展了监测工作,以期得到第一手的现场资料,从水质参数方面分析程海水质变化及差异性特征。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

程海地处青藏高原与云贵高原的衔接部位,东经 $100^{\circ}33'$ 至 $100^{\circ}45'$,北纬 $26^{\circ}25'$ 至 $26^{\circ}40'$,行政区划上属于云南省丽江市永胜县。湖面海拔高程1502.0 m,流域面积 318.3 km^2 ,湖面积 75.971 km^2 ,湖体呈南北向椭圆形展布,南北轴线长19.154 km,东西最大宽度5.205 km,最大水深35.87 m,平均水深24.98 m,湖水容量19.794亿 m^3 ,是典型的高原深水湖泊。程海大约形成于新生代第三纪中期(距今1.2 Ma以前),是喜马拉雅期造山运动形成断裂地堑,中陷低凹之处聚水成湖,湖区气候属中亚热带类型,平均温度 18.7°C ,全年无霜。程海曾经是一个外流湖,湖水通过程河向南30 km流入金沙江,现在为封闭湖泊,主要靠东西两山的地下水和降水补给,由于地处金沙江干热河谷地带,蒸发量大约是流域降水量的3倍,致使湖泊水位持续下降。

2.2. 数据采集

由于程海湖盆底部西侧深度更大,水质应当更具有代表性,所以本研究沿湖泊深水轴自北向南分别设置四个采样点,标记为A、B、C、D(图1),其中A、B点深度大,南部的C、D点较浅。

本文利用2015年10月23日、2016年3月20日、2016年5月20日和2016年7月20日监测数据进行解剖分析。监测过程为从表层开始以1 m为间隔进行水质现场监测,并以2 m为间隔,使用钢化玻璃采水器进行水样采集,用1 L塑料瓶装2瓶放进加冰保温箱保存带回实验室分析。

本研究中温度、叶绿素、pH和溶解氧指标采用美国YSI公司的YSI6600型多参数仪现场连续监测所得数据。测量过程中利用两台仪器进行平行测量以保证数据的准确性和可靠性。

2.3. 统计分析

本研究所有数据均采用Excel、Grapher和SPSS软件完成计算、分析与成图。

3. 结果与分析

3.1. 温度的垂直分层及季节变化

程海地处金沙江干热河谷地带,流域内年均气温较高,从监测数据可以清楚的看到湖泊水温季节变化(图2)。就所监测季节来看,10月的湖水整体温度较高,水平方向上南部湖区温度高于北部湖区,垂向上北部湖水深度较大的A点在20~26 m深度范围内出现了明显的温跃层,温度跃变在 4°C 左右。B点在23~27 m深度范围内出现了明显温跃层,温度跃变也在 4°C ,南部湖水较浅的C、D点未出现明显的温跃层;次年3月的湖水温度是所监测月份中最低的,水平方向上北部湖区温度高于南部,可能为湖水较深区具有更大的热焓有关。垂向上自北向南四个采样点均未出现明显的分层现象,温度只随深度增加而缓慢降低;5月的湖水温度在水平方向上分布比较均匀,南北湖区水温比较一致,垂向上在四个采样点均出现了温度跃变,北部深水湖区的A点在21~24 m深度范围内出现了温跃层,温度跃变 3°C ,同样处于深水区的B点在16~24 m深度范围内出现了温跃层,温度跃变 2.4°C ,温跃层厚度达8 m,南部湖区的C

点在 17~24 m 深度范围内出现了温跃层, 温度跃变 2.4°C, D 点在 8~14 m 深度范围内出现了温跃层, 温度跃变 1.2°C, 温度跃变梯度明显小于其他三个点。7 月的湖水平均温度是四次监测中最高的, 特别是上部水层, 其最大值 25.5°C, 水平方向上表层水温北部湖区高于南部湖区, 垂向上四个采样点均出现了明显温度跃变, A 点在 13~22 m 深度范围内出现了温跃层, 温度跃变 6.8°C, 22 m 以下温度随深度增加缓慢降低, B 点在 7~23 m 深度范围内出现温跃层, 温度跃变 7.1°C, 23 m 以下温度随深度增加缓慢降低, C 点在 0~11 m 深度范围内温度几乎不变, 11~15 m 深度范围内出现了一次小的温度跃变, 在 15~23 m 深度范围内出现了明显的温跃层, 温度跃变 5.5°C, 23 m 以下温度随深度增加缓慢降低, D 点温度在 0~10 m

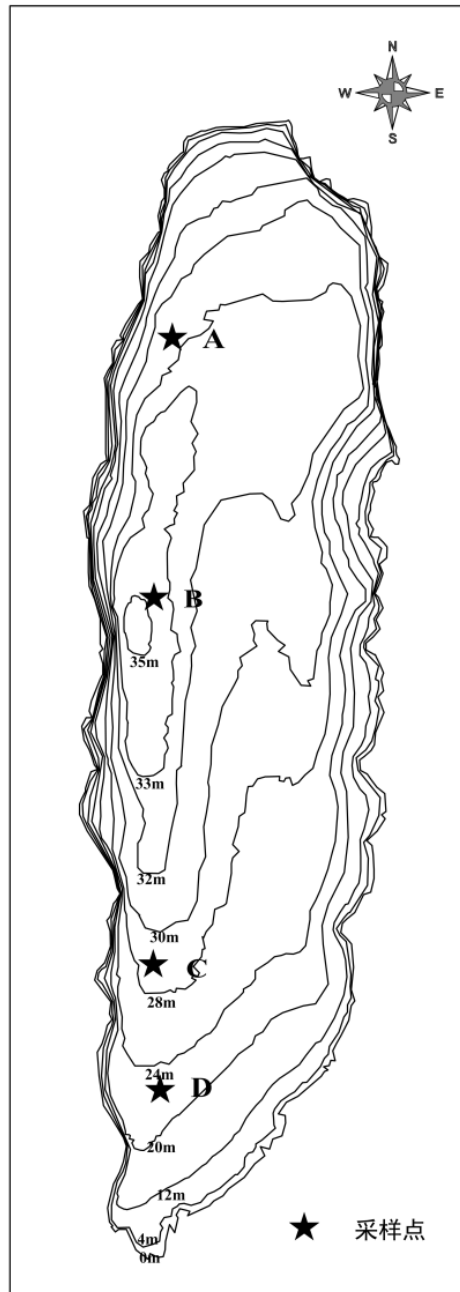


Figure 1. Meuring and sampling sites of water quality in Lake Chenghai
图 1. 程海水质采样点分布

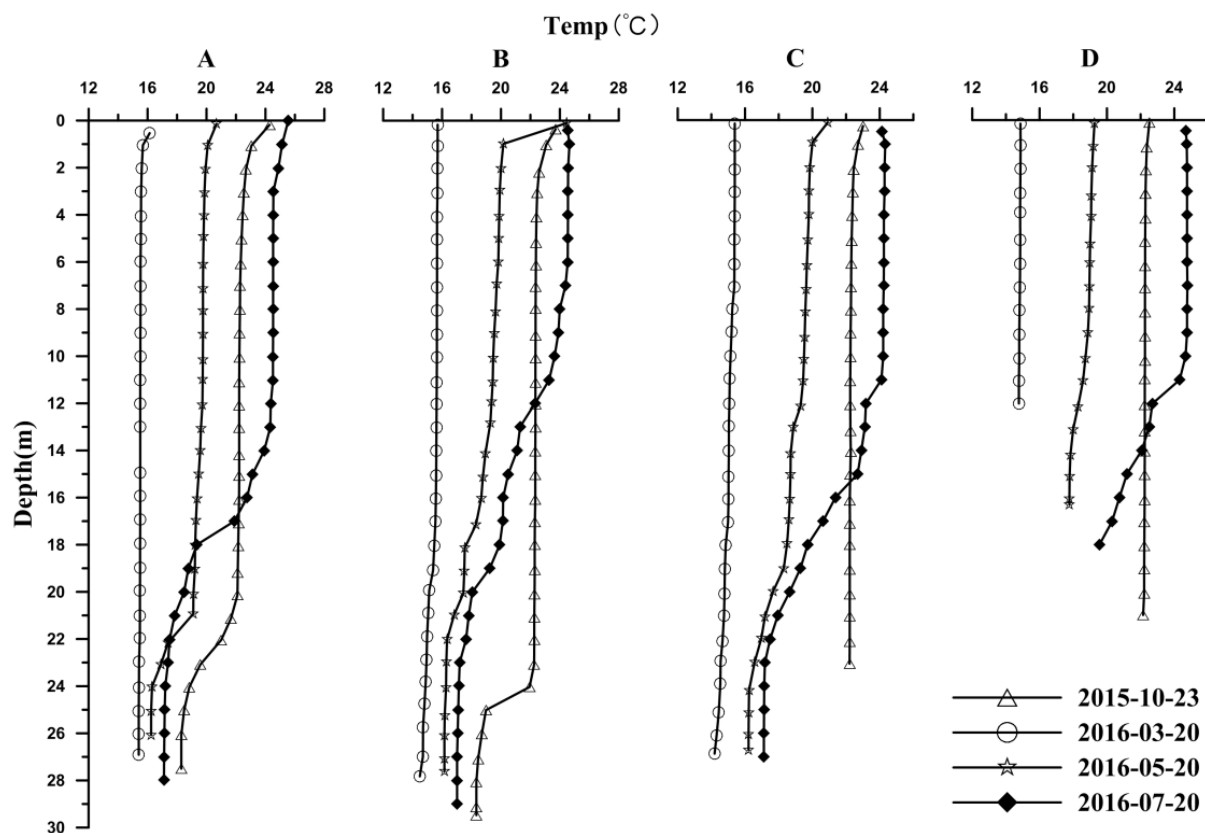


Figure 2. Vertical profile of water temperature in Lake Chenghai
图 2. 程海水温垂直剖面变化

深度范围内几乎不变, 从水深 10 m 开始到湖底(18 m)随深度增加温度急剧降低。

3.2. 叶绿素垂直分层及季节变化

叶绿素含量是反映湖泊浮游植物生物量的重要指标。据研究认为, 程海藻类植物种类 175 种, 其组成结构特点以硅藻、绿藻、蓝藻为主, 数量结构特点则是蓝藻占绝对优势, 表现出典型的富营养化蓝藻型特征[7] [8]。我们的检测结果显示, 程海水体中叶绿素含量在时间和空间上存在很大差异, 如图 3 所示。

监测结果显示, 10 月份程海的湖水中叶绿素含量相对较高, 垂向上北部深水湖区的 A 点 0~7 m 深度范围内自上而下先升高后急剧降低, 最大值出现在水深 1 m 处, 含量高达 15.4 ug/L, 7~26 m 深度范围内叶绿素含量随深度增加缓慢降低, 在水深 26 m 以下则表现出稍有增加趋势, 这主要可能是因为部分藻类死亡沉降所致。B 点 0~6 m 深度范围内先升高后急剧降低, 最大值出现在水深 3 m 处, 含量 11.4 ug/L, 6~16 m 深度范围内叶绿素含量稳定在 8 ug/L 左右, 16~19 m 深度范围内再次出现降低, 19~24 m 深度范围内叶绿素含量基本稳定在 5.5 ug/L, 深度 24 m 至湖底再次出现降低, 总共 29.5 m 深的 B 点叶绿素含量发生了三次明显变化, 说明该区域藻类植物种类相对比较丰富且种群规模相对较大。C 点在 0~6 m 深度范围内先升高后急剧降低, 在水深 2~3 m 处达到最大值 9.5 ug/L, 6 m 以下随深度增加缓慢降低, D 点 0~3m 范围内叶绿素含量逐渐升高, 水深 3 m 之后随深度增加缓慢降低, 最大值出现在水深 3 m 处, 含量为 5.6 ug/L。水平方向上叶绿素含量自北向南逐渐降低, 0~12 m 深度范围内的叶绿素平均含量 A 点为 9.4 ug/L, B 点为 8.4 ug/L, C 点为 7.3 ug/L, D 点为 4.9 ug/L。

次年 3 月的湖水中叶绿素含量相对较低, 垂向上北部深水湖区的 A 点表层含量低, 在 0~3 m 深度范

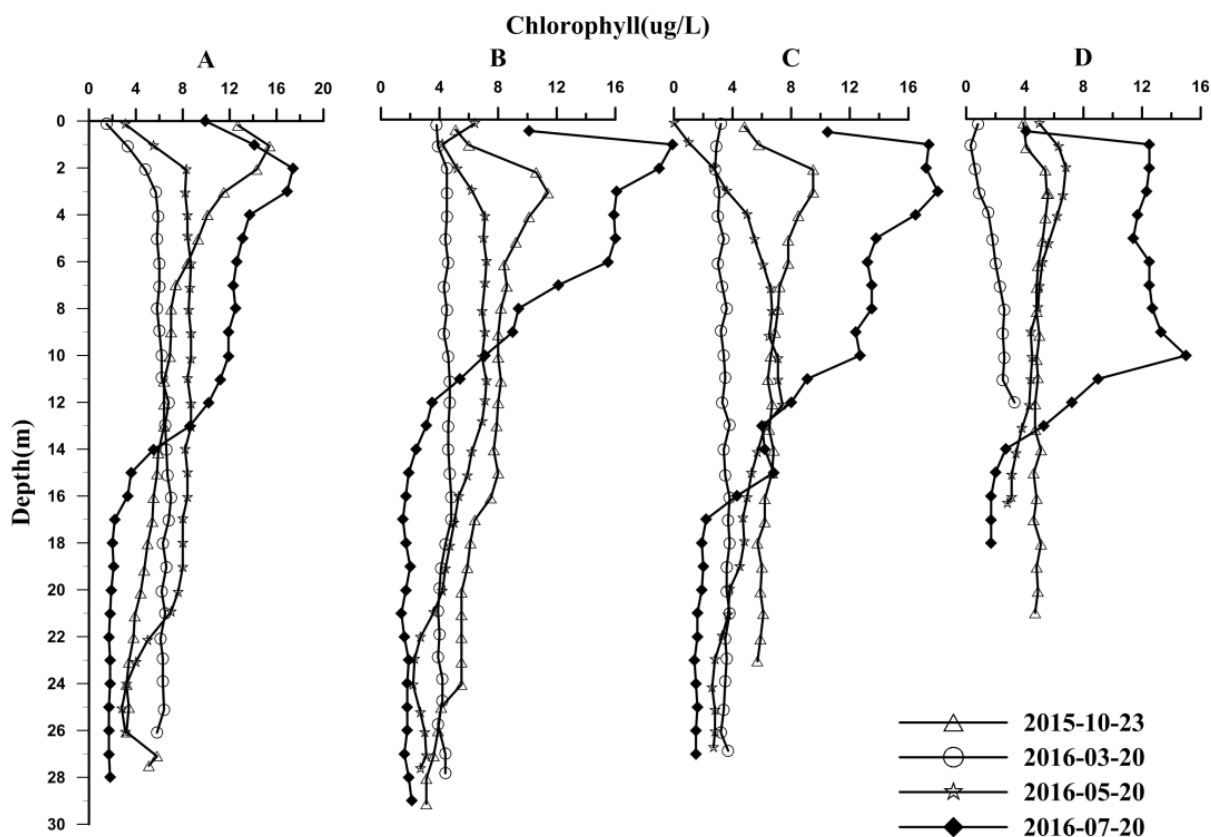


Figure 3. Vertical profile of Chlorophyll in Lake Chenghai
图 3. 程海叶绿素垂直剖面变化

围内迅速升高, 之后变化比较微弱, 3~16 m 深度范围内叶绿素含量随深度缓慢升高, 16 m~26 m 深度范围内叶绿素含量随深度增加有所降低, 最大值出现在水深 16 m 处, 含量为 7 ug/L, B、C 两点叶绿素含量表层到底层整体变化不大, 分布较为均匀, D 点叶绿素含量明显低于其他几个点, 0~12 m 深度范围内随深度增加其含量先降低后升高, 最低值出现在水深 1 m 处, 含量为 0.3 ug/L。水平方向上叶绿素含量自北向南逐渐降低, 0~12 m 深度范围内的叶绿素平均含量 A 点为 5.4 ug/L, B 点为 4.4 ug/L, C 点为 3.2 ug/L, D 点为 1.8 ug/L。

5 月的叶绿素含量在垂向上变化比较大, A 点水深 0~2 m 叶绿素含量从 3.1 ug/L 迅速升至 8.3 ug/L, 2~20 m 深度范围内叶绿素含量基本维持在 8 ug/L 左右, 20 m 以下随深度增加叶绿素含量逐渐降低, 最终低至 3 ug/L。B 点 0~4 m 深度范围内叶绿素含量先降低后迅速升高, 之后在 4~13 m 深度范围内维持在 7 ug/L 左右, 13~24 m 深度范围内叶绿素含量随深度增加持续降低, 24~28 m 深度范围内又缓慢升高, 最低值 2.2 ug/L。C 点在 0~12 m 深度范围内叶绿素含量随深度增加持续升高, 其中 0~4 m 上升幅度较大, 在 12~22 m 深度范围内叶绿素含量随深度增加持续降低, 22 m 以下叶绿素含量基本稳定在 2.8 ug/L 左右。到南部 D 点, 0~2 m 之间叶绿素含量随深度增加快速升高, 2~6 m 随深度增加又快速下降, 6 m 以下持续稳定下降。0~12 m 深度范围内叶绿素平均含量 A 点为 7.9 ug/L, B 点为 6.6 ug/L, C 点为 5.4 ug/L, D 点为 5.3 ug/L。

7 月的叶绿素含量在垂向上变化最为显著, 例如 A 点 0~2 m 叶绿素含量从 9.9 ug/L 急剧升高到 17.4 ug/L, 2~4 m 叶绿素含量又降到 13.7 ug/L, 4~12 m 叶绿素含量随深度增加缓慢降低, 12~17 m 叶绿素含量从 10.2 ug/L 降低到 2.2 ug/L, 17 m 以下基本维持在 1.7 ug/L 左右。B 点 0~4 m 叶绿素含量为所测到的

最大值,达 19.9 ug/L,4~6 m 基本维持稳定在 16 ug/L,6~15 m 叶绿素含量随深度增加急剧降低至 1.9 ug/L,15 m 以下随深度增加缓慢降低,之后稳定在 1.8 ug/L 左右。C 点 0~5 m 叶绿素含量表现为先升高后降低,在 1~3 m 叶绿素含量维持在 17 ug/L 以上的高水平,在 5~10 m 叶绿素含量随深度增加波动降低,10~17 m 叶绿素含量随深度增加从 12.7 ug/L 急剧降低到 2.2 ug/L,17 m 以下维持在 2 ug/L 左右的低水平状态。D 点表层叶绿素含量为 4.1 ug/L,在 1 m 水深处跃升到 12.5 ug/L,1~10 m 叶绿素含量维持在 12 ug/L 左右,但到 15 m 水深处叶绿素含量增加到 15 ug/L,10~15 m 叶绿素含量随深度增加从 15 ug/L 急剧降低到 2 ug/L,15 m 到湖底(18 m)稳定在 1.7 ug/L。水平方向上叶绿素含量中南部湖区的 C 点最高,其次是北部湖区的 A 点和 B 点,南部湖区的 D 点最低,表现出强烈的空间异质性。

3.3. pH 值垂直分层及季节变动

程海水体 pH 值受地理位置、气候条件、区域地质地貌、地球化学背景、湖泊形态特征、封闭状况等因素综合影响导致碱度高[10],从我们的监测数据来看具有非常明显的季节变化(图 4)。同时,对于一般湖泊来讲,存在由于表层湖水藻类光合作用强烈,消耗大量 CO_2 ,pH 值较高,而深层藻类光合作用弱,藻类的大量死亡使 CO_2 大量积累,加之有机质分解产生酸,使 pH 逐渐降低的现象[7] [8] [9] [10] [11]。

10 月湖水 pH 值整体较高,垂向上在北部深水湖区的 A、B 两点温跃层附近出现明显的下降,跃变梯度 0.4 左右,南部浅水湖区的 C、D 两点则在垂向上变化不大,水平方向上呈现出南部湖区高于北部湖区的趋势。3 月湖水 pH 值相对稳定,垂向几乎没有变化,水平方向上呈现出北部湖区高于南部湖区的趋势。5 月湖水 pH 值垂向上在北部湖区的 A、B 两点温跃层附近有明显降低,跃变梯度 0.4 左右,C 点呈

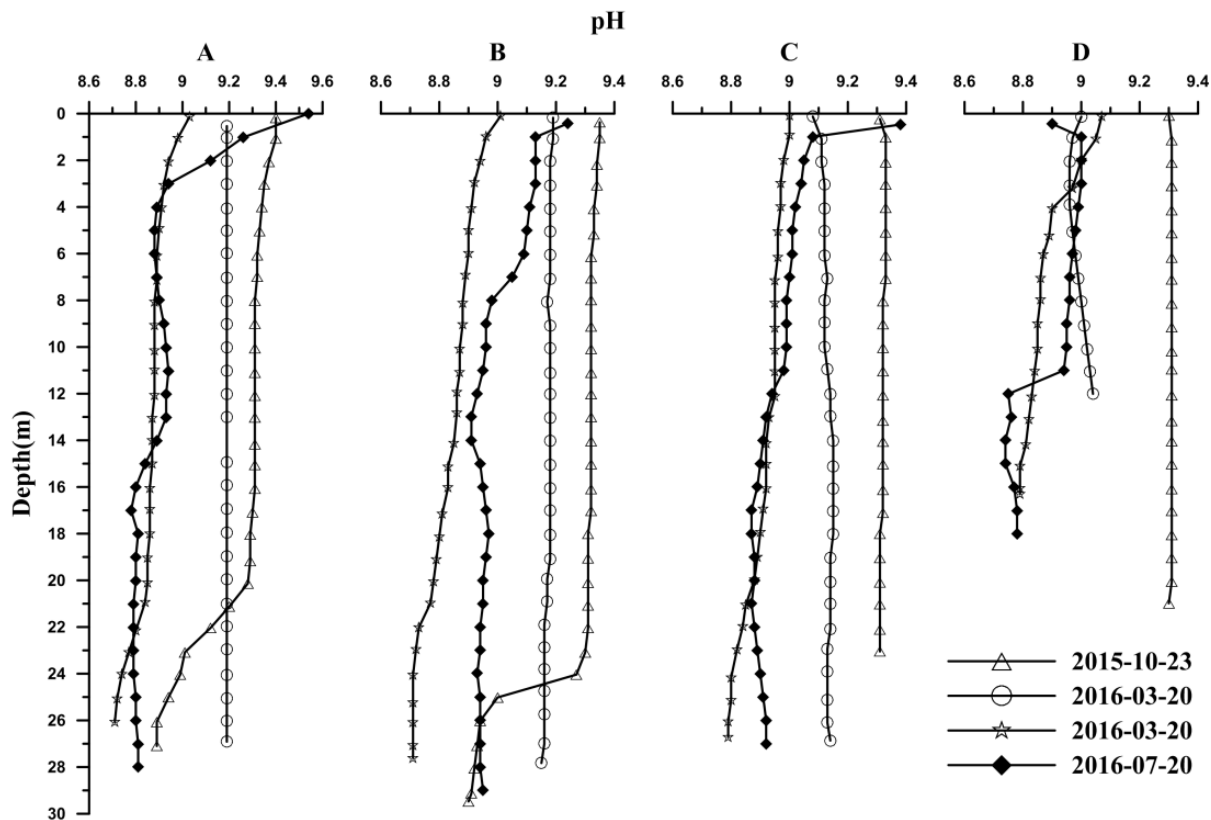


Figure 4. Vertical profile of pH in Lake Chenghai

图 4. 程海 pH 垂直剖面变化

现稳定减小趋势,南部最浅的D点0~4 m急剧减小,之后稳定减小,水平方向上呈现出南部湖区高于北部湖区的趋势。7月pH值垂向上A点从表层到3 m深急剧减小,跃变幅度0.6。3~17 m pH值先小幅度增大后又缓慢减小,之后基本稳定,B点pH值在0~14 m深度范围内随深度增加缓慢减小,之后趋于稳定,C点pH值在0~17 m深度范围内随深度增加缓慢减小,之后随深度增加缓慢增大,D点pH值在0~11 m深度范围内随深度增加缓慢减小,11~12 m跳跃式减小,减小幅度0.2,之后随深度增加pH值缓慢增大,水平方向上,北部湖区pH值高于南部湖区。总体来讲,程海pH变化幅度不是很大。

3.4. 溶解氧垂直分层及季节变化

溶解氧是湖泊初级生产力及水动力条件的综合反映[11][12][13][14][15],程海水体溶解氧季节变化明显,不同月份各自特征鲜明(图5)。

监测数据显示,程海10月湖水中溶解氧含量整体不高,垂向上北部深水湖区的A点在0~7 m深度范围内先略升后降低,在1 m深处达到最大值9.6 mg/L,7~16 m深度范围内溶解氧含量缓慢降低,保持在5.3~4.6 mg/L,16~21 m深度范围内溶解氧含量迅速下降,最终保持在0.3 mg/L左右,B点也是在0~7 m深度范围内有先升高后降低的趋势,之后保持在5 mg/L直到22 m深,在22~25 m深度范围内溶解氧含量急剧下降,最终保持在0.3 mg/L左右,南部湖区的C、D两点溶解氧含量随深度增加缓慢降低,但并未表现出跃变。水平方向上,北部湖区的溶解氧含量远高于南部湖区,0~12 m深度范围内的溶解氧平均含量A点为6.5 mg/L,B点为6.1 mg/L,C点为5.7 mg/L,D点只有4.5 mg/L,表现为有北向南逐渐降低的总趋势。

次年3月的湖水中溶解氧含量相对较高,垂向上北部湖区的A点溶解氧含量只随深度增加缓慢降低,

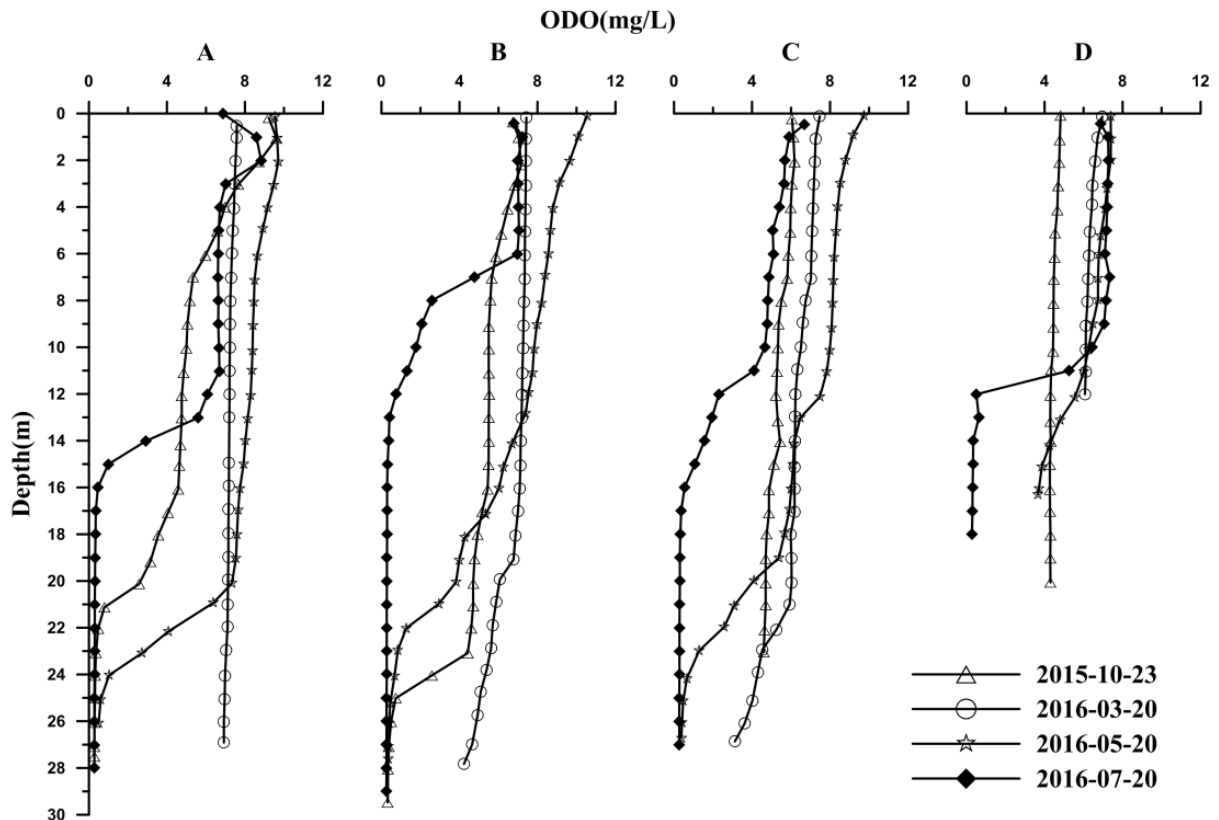


Figure 5. Vertical profile of ODO in Lake Chenghai
图5. 程海溶解氧垂直剖面变化

最大值为 7.58 mg/L, 出现在表层, 最小值为 6.92 mg/L, 出现在底层; B 点 0~19 m 深度范围内溶解氧同样也只随深度增加而缓慢降低, 但在 19 m 之后出现迅速降低。最大值出现在表层, 为 7.43 mg/L, 最小值出现在底层, 为 4.23 mg/L; C 点 0~20 m 深度范围内溶解氧随深度增加缓慢降低, 之后快速降低, 最大值出现在表层, 为 7.47 mg/L, 最小值出现在底层, 为 3.12 mg/L; D 点由于深度较小, 溶解氧含量随深度增加缓慢降低, 最大值出现在表层, 为 6.96 mg/L, 最小值出现在底层, 为 6.07 mg/L。水平方向上北部湖区的溶解氧含量远高于南部湖区, 0~12 m 深度范围内的溶解氧平均含量 A 点为 7.3 mg/L, B 点为 7.3 mg/L, C 点为 6.9 mg/L, D 点仅为 6.3 mg/L。

5 月的湖水中溶解氧含量最高, 垂向上北部湖区的 A 点溶解氧含量上层水体高于下层水体, 0~6 m 深度范围内先升高后降低, 并在 2 m 深处达到最大值 9.71 mg/L, 6~19 m 深度范围内溶解氧随深度增加缓慢降低, 19 m 往下溶解氧含量急剧变化, 最低到 0.3 mg/L; B 点溶解氧含量在 0~4 m 深度范围内下降较快, 7~13 m 深度范围内稳定降低, 在 13 m 之后跳跃式连续下降, 并在 22 m 以下形成了稳定的低氧环境; C 点 0~11 m 深度范围内溶解氧含量随深度增加逐渐降低, 在 11~14 m 深度范围内溶解氧含量急剧降低, 14~19 m 深度范围内溶解氧含量保持稳定降低, 19 m 以下急剧降低, 并在 27 m 以下形成稳定的低氧环境, 南部湖区的 D 点 0~10 m 深度范围内溶解氧含量随深度增加稳定下降, 10 m 以下溶解氧含量急剧下降。水平方向上北部湖区的溶解氧含量远高于南部湖区, 0~12 m 深度范围内的溶解氧平均含量 A 点为 8.8 mg/L, B 点为 8.7 mg/L, C 点为 8.4 mg/L, D 点只有 6.9 mg/L。

程海 7 月的湖水中的溶解氧含量较低, 垂向上北部湖区的 A 点 0~3 m 深度范围内溶解氧含量较高, 3~11 m 深度范围内几乎不变, 11~16 m 深度范围内溶解氧含量急剧降低, 16 m 以下稳定在 0.3 mg/L 以下的低氧水平; B 点 0~6 m 深度范围内溶解氧含量基本维持在 7 mg/L 以上, 6~11 m 深度范围内溶解氧含量急剧降低, 11 m 以下稳定在 0.3 mg/L 以下的低氧水平; C 点 0~11 m 深度范围内溶解氧含量随深度增加缓慢降低, 11~17 m 深度范围内溶解氧含量急剧降低, 17 m 以下稳定在 0.3 mg/L 以下的低氧水平; 南部浅水湖区的 D 点 0~9 m 深度范围内溶解氧含量基本稳定在 7 mg/L 左右, 9~12 m 深度范围内溶解氧含量急剧降低, 12 m 以下溶解氧含量随深度增加缓慢降低。水平方向上溶解氧含量 A、D 点相对较高, B、C 点相对较低。

4. 讨论与结论

从以上数据分析和变化可以得出, 程海水质参数空间和季节性变化十分明显, 出现这种情况的原因并非单个水质参数的变化所引起, 在对温度、pH 值、叶绿素和溶解氧等水质参数做了相关性分析(表 1)后可以看出, 各个水质参数之间呈明显的显著正相关, 尤其 pH 值和溶解氧之间的相关系数为 0.546、温度和叶绿素之间的相关系数为 0.391、pH 值和叶绿素之间的相关系数为 0.391, 很好的验证了温度高低影响叶绿素含量多少, 以及温度与叶绿素共同作用影响 pH 值和溶解氧含量[15]。

从监测数据和永胜县气象数据(图 6)分析来看, 大型水体对气温的反馈敏感度较低, 水体温度变化总是滞后于气温变化, 而降水量则对气温影响较大, 2015 年 10 月和 2016 年 10 月相比较, 前者由于阴雨天数大于后者, 所以月平均气温较后者低 2.3℃。从整年来看, 程海夏秋季南部湖区平均温度高于北部湖区, 但在冬春季北部湖区平均温度高于南部湖区, 湖泊表层水全年均表现出北部湖区温度高于南部的现状, 这主要是由于程海流域常年盛行南风, 受风力扰动影响南部浅水区湖水混合较均匀, 热力交换频繁, 而北部深水湖区较为稳定。由于程海北部深水湖区在夏秋季节出现明显的温度分层, 阻碍了上下层水体间的对流交换, 影响了 N、P 等营养盐及光照在水体中的分布, 从而对水体溶解氧浓度和水生生物的垂直分布产生影响[7]-[18], 继而影响 pH 值变化, 引起水环境质量变化[14]-[24]。

程海水体中叶绿素含量与温度呈显著正相关关系, 随着温度的升高, 水中浮游植物量增加, 并且在不同深度范围内出现多次峰值, 表现出水生植物种类的多样性与复杂性。水体 pH 值的变化主要受到 CO_3^{2-}

Table 1. The correlation among water temperature, pH, Chlorophyll and ODO in Lake Chenghai
表 1. 程海水三体温、pH 值、叶绿素和溶解氧之间的相关性

	pH	Temp	Chl
ODO	0.546**	0.244**	0.297**
pH		0.242**	0.391**
Temp			0.391**

**在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

Weekly mean temperature and precipitation in October 2015 - December 2016

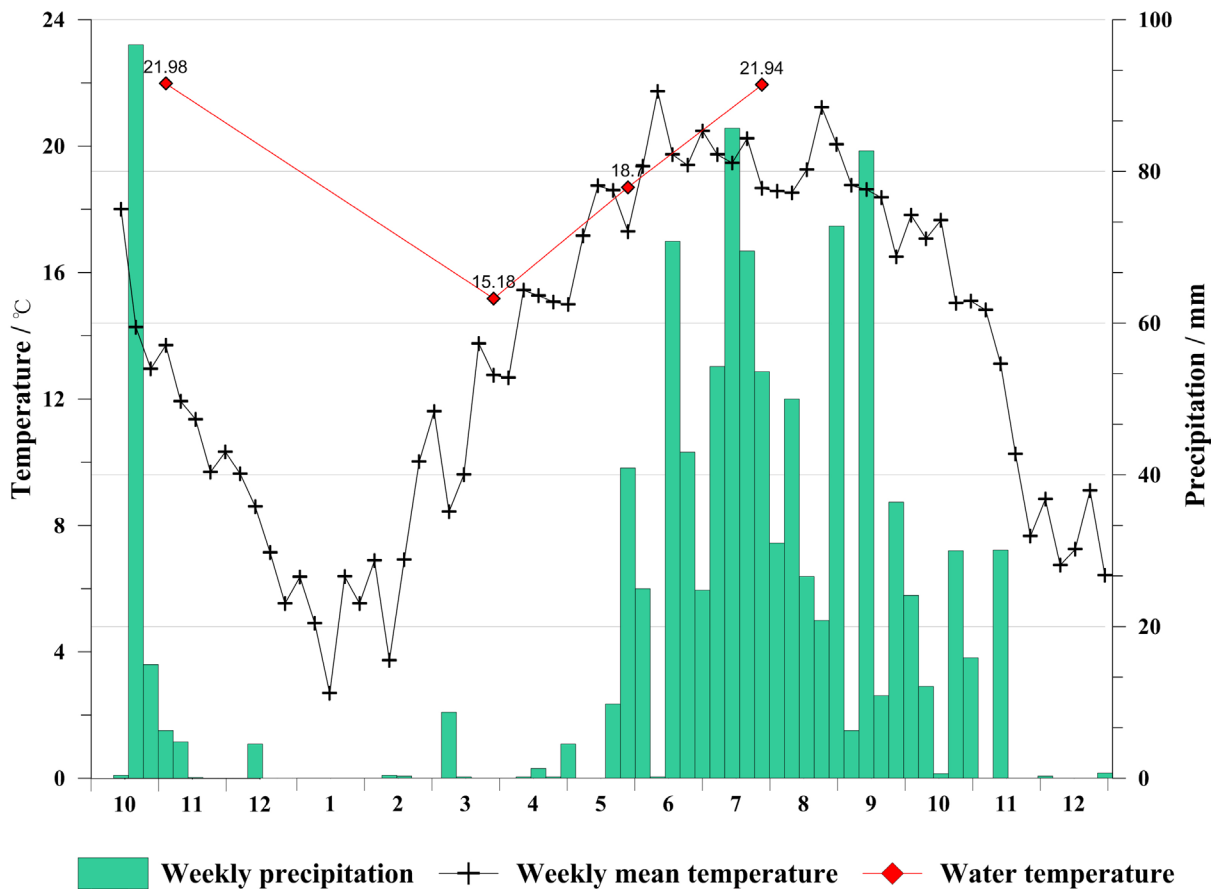


Figure 6. Weekly mean temperature and precipitation of Yongsheng County in October 2015 - December 2016

图 6. 2015 年 10 月~2016 年 12 月永胜县逐周降水量和温度变化

和 HCO_3^- 含量变化的影响，所以当春季温度升高浮游植物大量生长后，pH 值随之升高，但是程海的情况有其特殊性，5 月和 7 月的温度明显高于 3 月，但 pH 值却低于 3 月，这可能是由于这一时期多次水华爆发结束，卷曲鱼腥藻等藻类大量死亡分解所致[7] [9]。

冬季程海处于混合时期，良好的水体对流交换使底层水体始终保持较高的溶解氧水平。夏秋季发生的热分层现象，直接阻碍了变温层和滞水层的物质交换，使溶解氧形成分层，湖水温度越高，溶解氧分层越靠近水面，即缺氧水体厚度越大，再加上底泥中硫化物、亚硝酸根、亚铁离子等还原性物质和微生物的长期作用，底泥附近形成厌氧区域，而厌氧条件会加速沉积物中氮磷的释放进而恶化底层水质。伴随着程海热分层的季节性形成和消失，沉积物中不同形态的氮、磷会在强还原条件下释放和扩散不断促进整个湖泊

的富营养化,因此在程海保护方面应做好夏秋季节的水质监测工作,提前制定快速应急机制[3][14]-[24]。

基金项目

云南省领军人才项目“云贵高原湖泊演化与水安全”(2015HA024)和高端人才引进项目“云南(云贵高原)湖泊记录与生态环境及可持续发展研究”(2010CI111)资助。

参考文献 (References)

- [1] 赵林林, 朱梦圆, 冯龙庆, 等. 太湖水体理化指标在夏季短时间尺度上的分层及其控制因素[J]. 湖泊科学, 2011, 23(4): 649-656.
- [2] 赵林林, 朱广伟, 陈元芳, 等. 太湖水体水温垂向分层特征及其影响因素[J]. 水科学进展, 2011, 22(6): 844-850.
- [3] 卢金锁, 李志龙. 热分层对水库水质的季节性影响——以西安黑河水库为例[J]. 湖泊科学, 2014, 26(5): 698-706.
- [4] 王明达, 侯居峙, 类延斌. 青藏高原不同类型湖泊季节性变化及其分类[J]. 科学通报, 2014(31): 3095-3103.
- [5] 王斌, 马健, 王银亚, 等. 天山天池水体季节性分层特征, 湖泊科学[J]. 2015, 27(6): 1197-1204.
- [6] 吴敬禄, 蒋雪中, 夏威岚, 等. 云南程海近 500 年来湖泊初始生产力的演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(2): 95-98.
- [7] 董云仙, 谭志卫, 朱翔, 等. 程海藻类植物种群结构和数量的周年变化特征[J]. 生态环境学报, 2012(7): 1289-1295.
- [8] 董云仙, 洪雪花, 谭志卫, 等. 高原深水湖泊程海氮磷形态分布特征及其与叶绿素 a 的相关性[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2): 333-337.
- [9] Wang, J.H. and Lu, X.G. (2008) Fuzzy Synthetic Evaluation of Water Quality of Naoli River Using Parameter Correlation Analysis. *Chinese Geographical Science*, 4, 361-368. <https://doi.org/10.1007/s11769-008-0361-5>
- [10] Hu, W.Y., Ji, J. and Pan, H.X. (1992) A Preliminary Study of Water Quality and Salinization in Chenghai Lake. *Journal of Lake Sciences*, 4, 60-66.
- [11] 陈建中, 刘志礼, 李晓明, 等. 温度, pH 和氮, 磷含量对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)生长的影响[J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(5): 714-718.
- [12] Wang, M.D., Hou, J.Z. and Lei, Y.B. (2014) Classification of Tibetan Lakes Based on Variations in Seasonal Lake Water Temperature. *Chinese Science Bulletin*, 34, 4847- 4855. <https://doi.org/10.1007/s11434-014-0588-8>
- [13] 王君波, 彭萍, 马庆峰, 等. 西藏当惹雍错和扎日南木措现代湖泊基本特征[J]. 湖泊科学, 2010, 22(4): 629-632.
- [14] 王永霞. 云南高原程海湖沉积物中的细菌多样性研究[D]: [博士学位论文]. 昆明: 云南大学, 2014.
- [15] 黄岁樑, 臧常娟, 杜胜蓝, 等. pH, 溶解氧, 叶绿素 a 之间相关性研究 I: 养殖水体[J]. 环境工程学报, 2011, 5(6): 1201-1208.
- [16] 潘红玺, 王云飞, 董云生. 洱海富营养化影响因素分析[J]. 湖泊科学, 1999, 11(2): 184-188.
- [17] 陈建良, 胡明明, 周怀东, 等. 洱海蓝藻水华暴发期浮游植物群落变化及影响因素[J]. 水生生物学报, 2015, 39(1): 24-28.
- [18] 刘明亮, 王志旭, 何剑波, 等. 新安江水库(千岛湖)热力学状况及热力分层研究[J]. 湖泊科学, 2014, 26(3): 447- 454.
- [19] 马千里, 胡芳, 魏清伟, 等. 六都寨水库夏季富营养化状况与浮游植物分布特征研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(6): 1497-1504.
- [20] 夏品华, 李秋华, 林陶, 等. 贵州高原百花湖水湖沼学变量特征及环境效应[J]. 环境科学学报, 2011, 31(8): 1660-1669.
- [21] 夏品华, 林陶, 李存雄, 等. 贵州高原红枫湖水库季节性分层的水环境质量响应[J]. 中国环境科学, 2011, 31(9): 1477-1485.
- [22] 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, 1(1): 54-60.
- [23] 袁文权, 张锡辉, 张丽萍. 不同供氧方式对水库底泥氮磷释放的影响[J]. 湖泊科学, 2004, 16(1): 28-34.
- [24] 吴丰昌, 金相灿, 张润宇, 等. 论有机氮磷在湖泊水环境中的作用和重要性[J]. 湖泊科学, 2010, 22(1): 1-7.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：gser@hanspub.org