

Seasonal Variation Characteristics and Trend of Water Quality Parameters in Lake Yangzong

Na Cai, Hucai Zhang*, Fengqin Chang, Lizeng Duan, Huayong Li, Yunying Zhang, Xinyu Wen, Nan Li, Yang Zhang

Key Laboratory of Plateau Lake Ecology & Global Change, Yunnan Provincial Key Laboratory of Geographical Process and Environmental Change on the Plateau, College of Tourism and Geography Science, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

Email: zhanghc@niglas.ac.cn, Caina9966@163.com

Received: Jul. 21st, 2017; accepted: Aug. 7th, 2017; published: Aug. 11th, 2017

Abstract

In order to understand the seasonal variation characteristics and trend of water quality parameters in Lake Yangzong, water temperature, dissolved oxygen (DO), pH, conductivity, chlorophyll-a and phycocyanin were monitored from 2013 to 2106 in different seasons. In these parameters, the phycocyanin mainly exists in the cyanobacteria, while Chlorophyll-a is found in all algae. So, the ratio of phycocyanin and chlorophyll-a can be used to represent the relative amount of cyanobacteria in water. Seasonal variation characteristics of water quality parameters and cyanophyte relative quantity index (CRQI) showed that: Lake Yangzong belongs to warm monomictic lakes, the minimum water temperature is higher than 4°C, thermal stratification phenomenon was observed in spring, summer and autumn, and the water mixed in winter; thermal stratification and mixture had influences on vertical distribution of other water quality parameters, variation trends of all parameters are basically consistent; Cyanophyte Relative Quantity Index (CRQI) in spring, summer and autumn is higher than winter, and increased in April 2016, which was higher than that in April 2015. In particular, there is a sharp increase in the southern region of the lake, where rivers brought a lot of sewage. This indicates that human activities have contributed to the deterioration of water quality.

Keywords

Deep Lake, Water Quality Parameter, Temporal and Spatial Variation, Phycocyanin, Cyanophyte Relative Quantity Index, Conductivity, Lake Yangzong

阳宗海水质参数季节性变化特征及趋势

蔡娜, 张虎才*, 常风琴, 段立曾, 李华勇, 张云鹰, 文新宇, 李楠, 张扬

*通讯作者。

文章引用: 蔡娜, 张虎才, 常风琴, 段立曾, 李华勇, 张云鹰, 文新宇, 李楠, 张扬. 阳宗海水质参数季节性变化特征及趋势[J]. 地球科学前沿, 2017, 7(4): 500-512. DOI: 10.12677/ag.2017.74052

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: zhanghc@niglas.ac.cn, Caina9966@163.com

收稿日期: 2017年7月21日; 录用日期: 2017年8月7日; 发布日期: 2017年8月11日

摘要

为了解深水型湖泊水质参数的季节性变化特征和水质状况的变化趋势, 于2013~2016年不同月份对阳宗海水体水温(Temperature或Temp)、溶解氧(DO)、pH值、电导率(Conductivity或CD)、叶绿素a(Chl-a)和藻蓝蛋白(Phycocyanin或PC)浓度进行连续监测。本文根据监测数据, 分析了各参数的时空变化规律; 通过表征蓝藻的藻蓝蛋白浓度和表征所有藻类的叶绿素浓度之比求出水体中的蓝藻相对数量指数(Cyanophyte Relative Quantity Index, CRQI), 并估算了蓝藻在湖泊中的相对数量。结果表明: 阳宗海春、夏、秋季水温热分层明显, 冬季水温混合, 湖泊最低温度高于4°C, 属于暖单循环湖; 阳宗海水温的分层和混合影响着其他各水质参数的分层和混合, 各水质参数的变化趋势基本一致; 阳宗海蓝藻相对指数在春、夏、冬季较高, 2016年4月年蓝藻相对数量指数高于2015年4月有所升高, 尤其是有河流注入的南部湖区大幅升高, 表明人类活动对水质恶化有一定的影响; 阳宗海电导率的变化受汛期降水的影响较大, 电导率较高的季节蓝藻相对数量指数较高, 因此电导率可以作为指示淡水湖泊中指示营养状况的指标。

关键词

深水型湖泊, 水质参数, 时空变化, 藻蓝蛋白, 蓝藻相对指数, 电导率, 阳宗海

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

湖泊具有供水、蓄水、防洪、养殖、运输和旅游等多种功能, 相对而言, 其水体交换周期长, 自净能力弱, 作为接纳水体极易被污染。湖泊水质参数的时空变化能直接反应湖泊的水环境状况。各水质参数的变化会导致湖泊营养水平发生变化[1], 因此, 加强对各水质参数的监测与分析, 对水体富营养化的预防、控制、水质保护及水安全具有现实意义。

已有研究表明, 湖泊水体的水温、溶解氧、叶绿素 a、pH、电导率、蓝绿藻细胞密度、浊度等参数容易在夏季发生垂向季节性分层现象, 在深水型湖泊和水库中, 这种现象尤为明显[2] [3]。水体的分层极易造成水体均温层内缺氧, 变温层内藻类大量生长繁殖, 从而打破水生生态系统的平衡, 使得水质恶化。温度是水体中藻类生长需要的基本条件之一, 在适宜的温度条件下, 藻类生长又影响着其他理化指标的变化, 从而影响湖泊水质。叶绿素 a 是水生态系统的一个重要参数, 其含量是反映水中浮游植物生物量或现存量的一项重要观测项目, 也是计算初级生产力的基础。藻蓝蛋白又称藻蓝素, 是藻胆蛋白中的一种, 藻胆蛋白通常存在于蓝藻、红藻、隐藻和少数甲藻中。在含有藻胆蛋白的几种藻类中, 红藻喜欢固着生长在贫营养溪流中的基质上; 隐藻在贫营养和中营养的水体中贡献最大, 在热带和极地水体中比较常见, 且对浮游植物种类丰度的贡献较小; 甲藻对浮游植物的种类丰度贡献也很低小, 而蓝藻在结构和

功能上具有非凡的异质性,其生态位比较宽泛[4],并且在波长 620 nm 附近有一个吸收峰,基于其对光的波长利用范围较宽,因此通常成为水体中的优势种[5]。根据谢永红[6]等的研究,2013 年阳宗海水体中蓝藻门有 13 属,占 33.3%,甲藻门有 4 属,占 10.3%,隐藻门有 1 属。结合以上分析,可以初步判断蓝藻是阳宗海水体中藻蓝蛋白的主要贡献藻类。然而,以往的研究多数以叶绿素 a 浓度为指示藻类生物量的指标来评价水体的营养程度,而对于藻蓝蛋白(PC)研究较少[7]。一般情况下,水体富营养化的发生都伴随着“蓝藻水华”的暴发,加强对水体中蓝藻数量的估算对预防水体富营养化意义重大。

阳宗海是云南省第三大深水湖泊,具有多种社会经济功能,其水质状况也备受关注。目前,对阳宗海水质问题的研究主要集中在浮游植物生物量和种群结构变化特征分析[6][8],水体总氮、总磷的动态特征及入湖量分析[9][10],水体砷污染源的分析[11][12],重金属砷污染引起的水质变化过程分析[13]及环境风险评估等方面[14],对水质参数的分析研究也只是基于短时间、小尺度的监测数据[15]。因此,本研究结合多季节、高频率、大尺度、连续性好的水质监测数据对阳宗海水温、溶解氧浓度、pH 值、电导率、叶绿素 a 浓度、藻蓝蛋白浓度等水质参数在水体内的垂直分布和水平格局进行全面分析,同时使用叶绿素 a 浓度和藻蓝蛋白浓度对各月份水体中的蓝藻相对数量进行估算。以期对阳宗海水体营养状况评价和水质管理提供科学依据。

2. 材料与方法

2.1. 研究区域概况

阳宗海(24°51'N~24°58'N, 102°55'E~103°02'E)位于云南省宜良、呈贡和澄江三县交界处,属于天然断陷淡水湖泊,平均水深 20 m,最大水深 31 m。湖面平均海拔 1800 m 左右,湖泊面积 31 km²,总蓄水量 6.04 亿 m³。阳宗海流域面积为 192 km²,属于北亚热带季风气候区,气温日较差较大,干湿季分明,旱季蒸发强烈[16]。流域内的主要河流有澄江县的阳宗大河、七星河、鲁溪冲河及宜良县的摆依河、汤池河等[16]。流域的汛期为 5~10 月,降水量占全年降水量的 85%,6~8 月的降水量占整个汛期的 66%。河流的主要补给来源为大气降水,总体表现为夏季丰水、冬季枯水、春秋季节过渡的形式[13]。

阳宗海流域内的经济活动主要以农业为主,工业、旅游业为辅。长期以来,人类活动都是以获取经济利益为目的,往往忽视了湖泊生态系统的脆弱性。农业化肥施用、引水入湖、水产养殖、农村生活污水和固体废物,以及植被破坏造成的水土流失是湖泊污染物的主要来源。湖泊周围发展的工农业和旅游业都来源于阳宗海,特别是近年来湖周的房地产开发和土地置换用水,加之 2008 年的砷污染事件和随后的化学治理,严重影响了湖水水质。虽然通过治理后取得了一定的成效,但目前阳宗海水质状态为中营养状态[8][9],随时面临着富营养化的威胁。

2.2. 数据采集

2.2.1. Sampling

根据阳宗海的湖体形状特征,在北、中、南三个断面中央各设置了一个监测点(图 1),于 2013 年 7 月、2015 年 4 月和 11 月、2016 年 1 月、3 月、4 月、6 月和 7 月分别进行现场监测。本研究采用 GPS 卫星导航仪对监测点进行定位,使用 YSI6600V2 多参数水质监测仪对各个点的水温、溶解氧浓度、叶绿素 a 浓度、pH 值、电导率、藻蓝蛋白浓度等参数进行垂向上的连续监测,从水面以下 0.1 m 开始,以 1 m 为间隔,直至底泥以上 0.5 m 结束,每个深度测 6 次,以确保数据的准确性。

2.2.2. 数据处理

监测的水质参数从仪器中导出后,使用 Excel 表格对数据进行整理,然后用 Grapher 软件绘制各月份

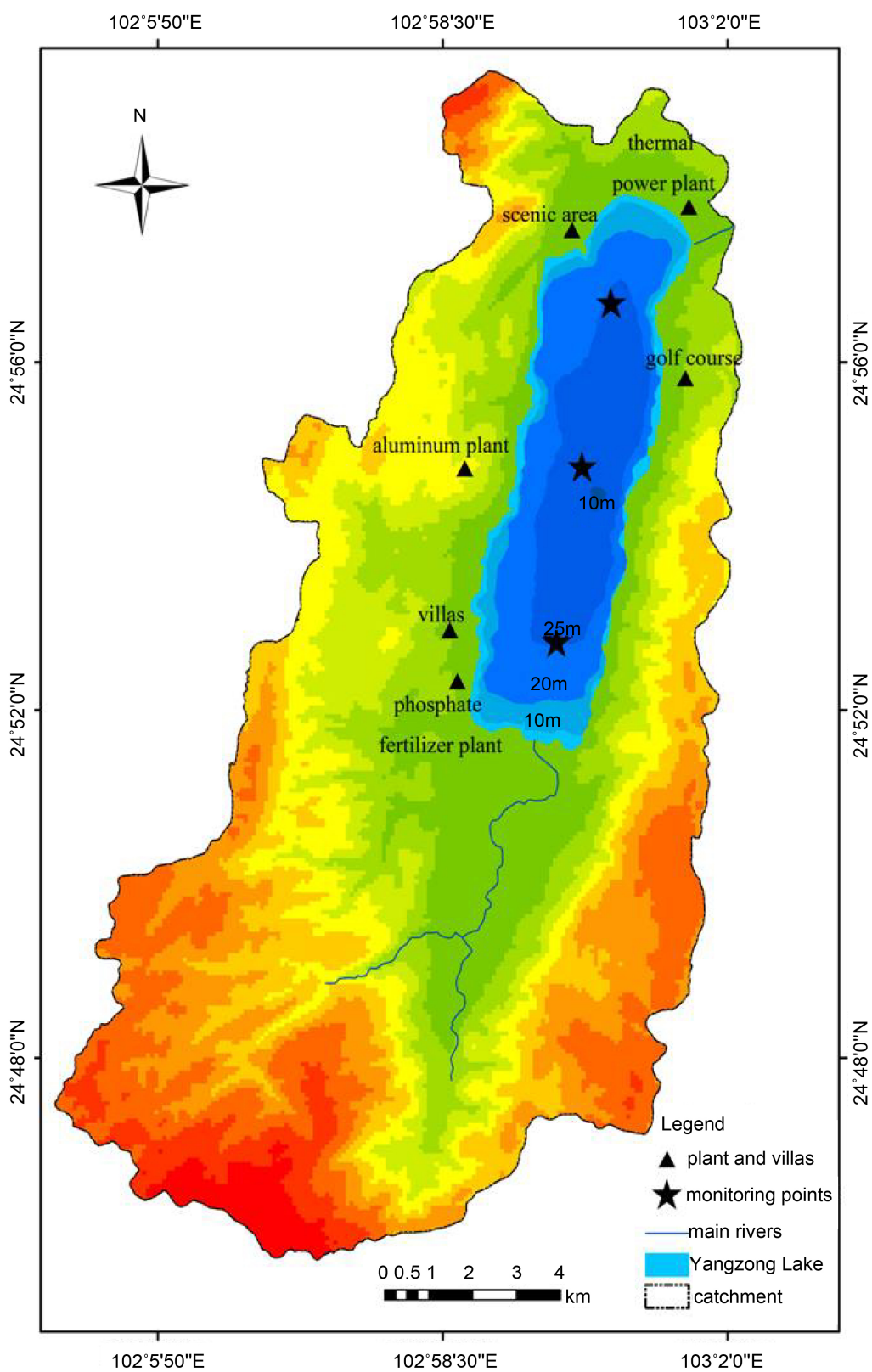


Figure 1. Distribution of sampling sections in Lake Yongzonghai
图 1. 阳宗海采样点分布图

北、中、南三个点各水质参数的垂向分布图。

由于蓝藻体内既含有叶绿素 a 又含有藻蓝素，因此，我们希望通过代表蓝藻的藻蓝素浓度和代表所有藻类的叶绿素 a 浓度的比值来估算蓝藻的相对数量。本研究根据尹斌利用遥感 MERTS 数据建立的蓝藻相对数量指数(Cyanophyte Relative Quantity Index, CRQI)的计算公式，即： $CRQI = [PC]/[chl-a]$ [7]，结合实测的叶绿素 a 浓度和藻蓝蛋白浓度对阳宗海水体中蓝藻所占比重进行估算，以避免单纯使用叶绿素 a 表征蓝藻数量造成的估计误差。

3. 结果

3.1. 水温的季节性变化特征

通常情况下，高原深水湖泊水温都会对季节气温度变化做出敏感的反应[2] [17]，即在夏季出现水体热力分层现象，表现出变温层和均温层水体温度随深度加深缓慢下降，温跃层温度随深度加深急剧下降的特点。同其它高原(高山)深水湖泊一样，阳宗海水体水温在垂直剖面上也存在着明显的分层与混合的现象。呈现出春、夏、秋季分层、冬季混合的趋势(图 2)。

阳宗海水温的变化趋势可以分为 4 组：2016 年 1 月和 4 月属于第 1 组，2015 年 4 月和 2016 年 4 月属于第二组，2013 年 7 月、2016 年 6 月、7 月属于第三组，2015 年 11 月为最后一组。这种分组方式基本与四季的划分一致。在冬季和早春季节(第一组)湖泊温度最低，受气温的影响，湖泊表层和底部的密度差减小，除了表层 0~2 m (1 月)和底层 14~23 m (3 月)有细微的变化之外，其余深度水体发生混合，此时湖泊处于混合期。春季，气温有所上升，表层水体快速升温，底层水体升温缓慢，升温速度不同使得湖泊在垂向上出现分层，形成了变温层、温跃层和均温层，但此阶段内分层还处于发展阶段，

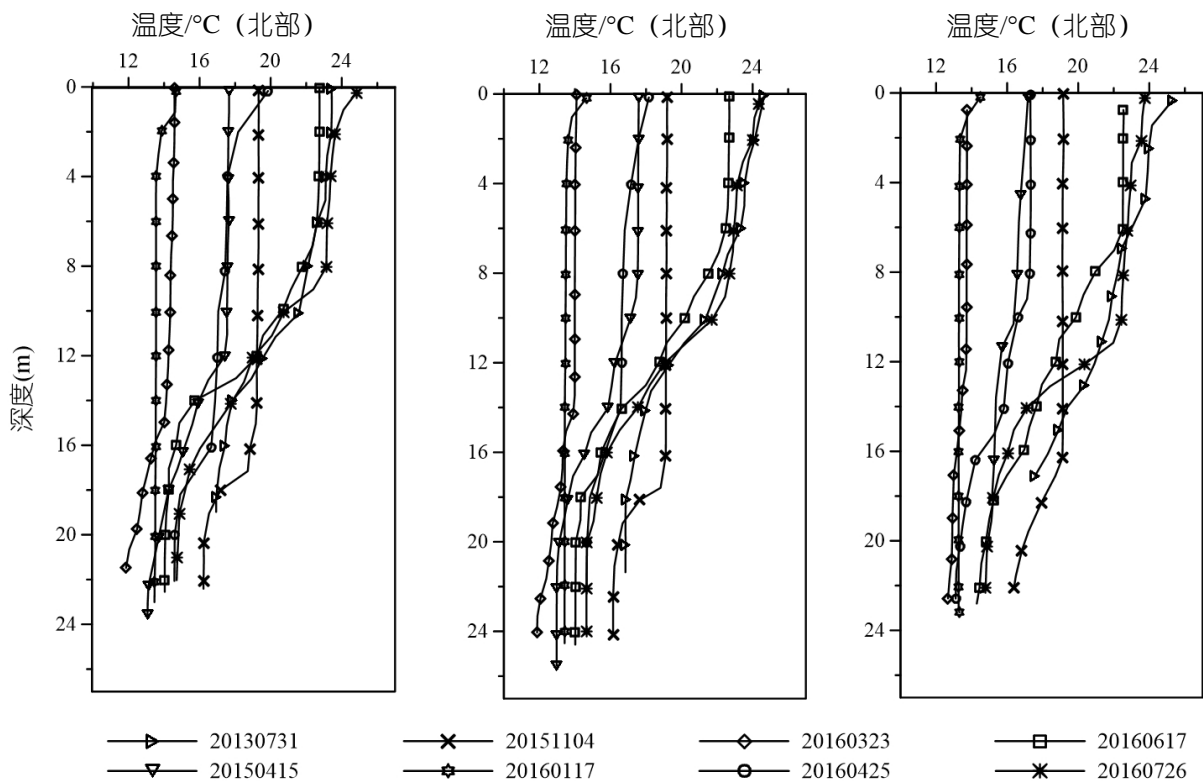


Figure 2. Vertical profile of water temperature in Lake Yangzong
图 2. 阳宗海水温垂直剖面图

分层结构还不稳定。夏季, 变温层(0~6 m)内温度急剧上升, 而均温层(18 以下)内温度变化不大, 与春季相比, 温跃层变厚, 温度梯度增大, 此阶段内形成了稳定的分层结构。秋季, 太阳辐射减弱, 水体降温明显。变温层内的温度变化一直深入到深层水体中, 均温层的温度在夏季结束之前上升到一个高值, 并一直持续到秋季, 温跃层的范围减小, 并形成在较深的水体中。此阶段为分层的消失阶段, 当变温层温度下降到与均温层温度一致时便会发生混合。四个季节内所监测到的表层温度变化范围为 13.74°C~25.29°C, 最大温差为 11.55°C, 底层温度变化范围为 11.86°C~17.56°C, 最大温差为 5.7°C。此外, 湖泊的最高温和最大温差出现在夏季。

从水平布局上看, 三个监测点水温变化不大。3 月北部水温稍高; 2015 年 4 月, 湖泊北部和中部温跃层较厚; 2016 年 4 月, 在表层 4 m 的范围内, 温度北部最高; 11 月, 温跃层下移到 16 m 以下, 根据温跃层的严格定义[4], 南部的温跃层消失, 开始进入混合期。

3.2. 水质剖面的季节动态与分布特征

3.2.1. 溶解氧(DO)

阳宗海水体中溶解氧浓度的变化存在明显的季节性分层与混合现象(图 3)。

溶解氧的变化趋势与温度的变化趋势一样, 其变化曲线也可以分为相同的四组。冬季和初春, 溶解氧浓度出现了全年的最高值, 且在垂向上变化不大, 不同深度的溶解氧浓度基本相同。在水平分布上, 2016 年 3 月北部溶解氧含量较高, 2016 年 1 月北部和中部溶解氧浓度较高。春季溶解氧含量相对于冬季有所降低, 溶解氧浓度随着深度加深而降低, 从表层到底部溶解氧呈递减趋势。溶解氧分层的现象开始形成, 但分层尚不稳定, 只在湖泊中部出现明显的分层现象。夏季在水下 4~14 米的范围内形成了明显的

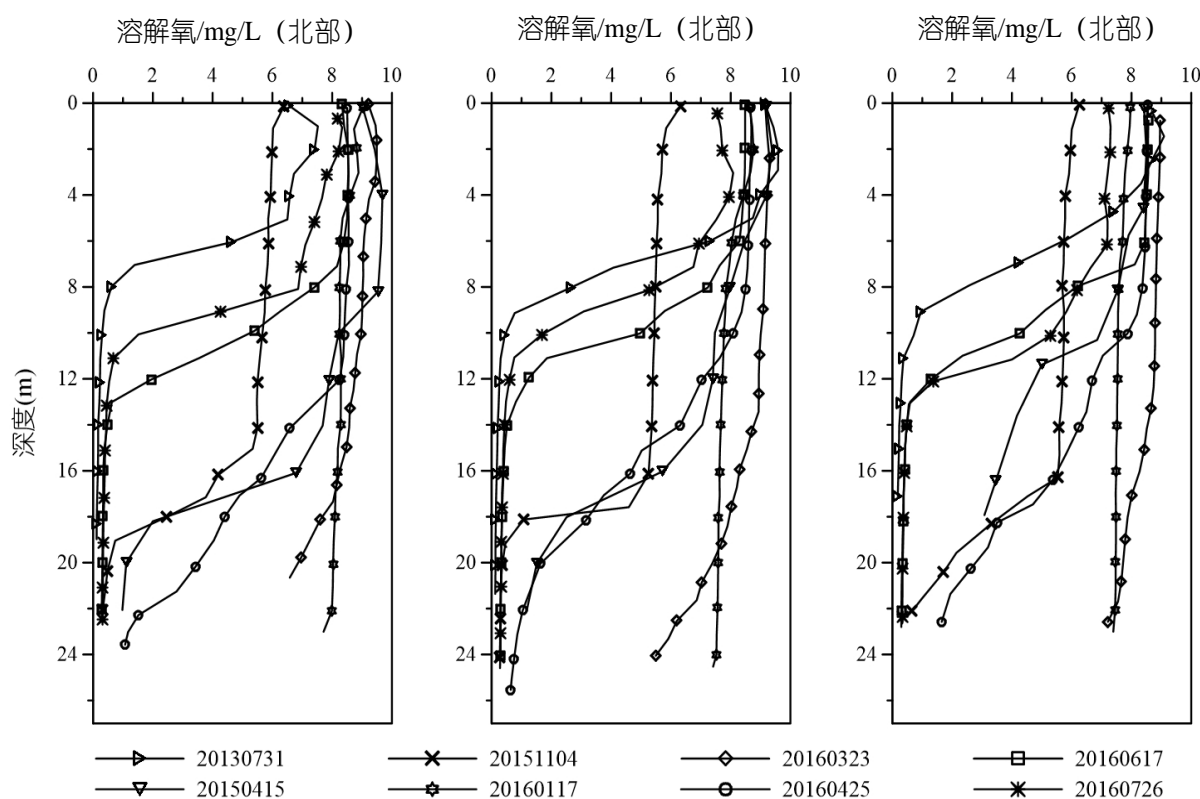


Figure 3. Vertical profile of Dissolved Oxygen (DO) in Lake Yangzong

图 3. 阳宗海溶解氧垂直剖面图

溶解氧梯度,在此范围内溶解氧含量急剧减少。此时溶解氧分层稳定,深层水体中缺氧严重。水平方向上,各个监测点的变化趋势极为相似,只有2013年7月和2016年7月在表层形成浓度差异。秋季,溶解氧浓度较低,在15米以上的水体混合比较均匀,溶解氧浓度基本保持在同一水平。此时溶解氧处于分层的末期,南部的稳定分层现象已经消失,溶解氧的变化趋势与温度的变化趋势基本一致。

3.2.2. pH 值

阳宗海水质整体偏碱性,季节性变化特征明显(图4)。在有温度分层的春、夏、秋季,pH值也呈现出明显的分层现象,其变化特征可以在与温度和溶解氧相同的分组模式下进行分析。在冬季和早春季节,pH的变化范围较小,仅在表层存在差异。2016年1月,在表层0~6m的范围内,南部pH值急剧下降,而在表层0~2m的范围内,pH随深度下降而升高。春季,pH值变化幅度扩大,表层和底层之间的差异使得pH在垂向上开始出现分层现象。2015年4月,在垂向上形成了pH急剧变化的水层,而在2016年4月,各深度内pH梯度基本一致。由于各个监测点的深度不同,pH急剧变化的水层的深度也不同。夏季,除了2016年7月份南部比较特殊之外,其余时间内各个监测点的pH随深度加深而降低,并在此阶段内形成稳定的pH分层现象,明显的变化主要发生在湖泊南部。秋季,pH值的变化趋势与温度和溶解氧的变化趋势完全一致,北部pH值相对较低。

3.2.3. 电导率

电导率是表示物质传输电流能力强弱的一种测量值,受盐度、水中溶解固体物质、温度、水源补给等因素的影响。阳宗海电导率的季节变化特征较明显,春冬季节垂向变化不大,夏秋季节形成明显分层现象(图5)。

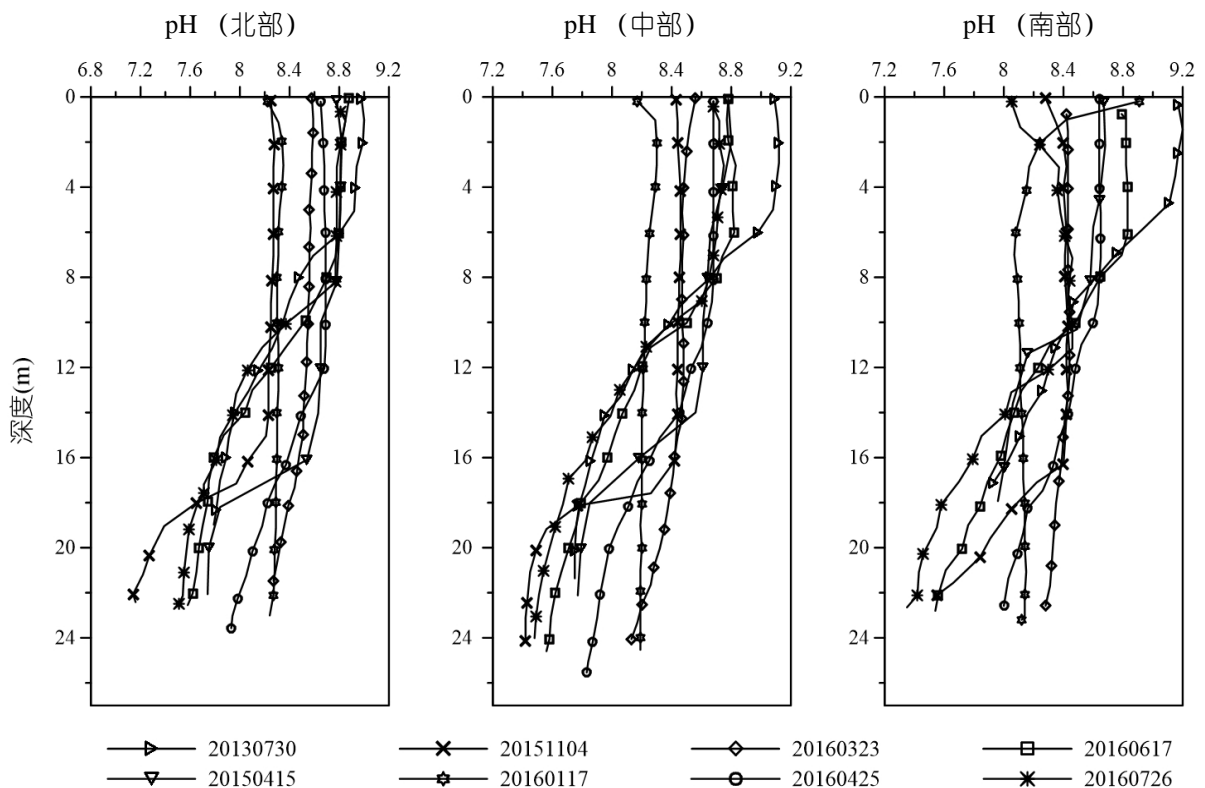


Figure 4. Vertical profile of PH in Lake Yangzong
图4. 阳宗海 pH 垂直剖面图

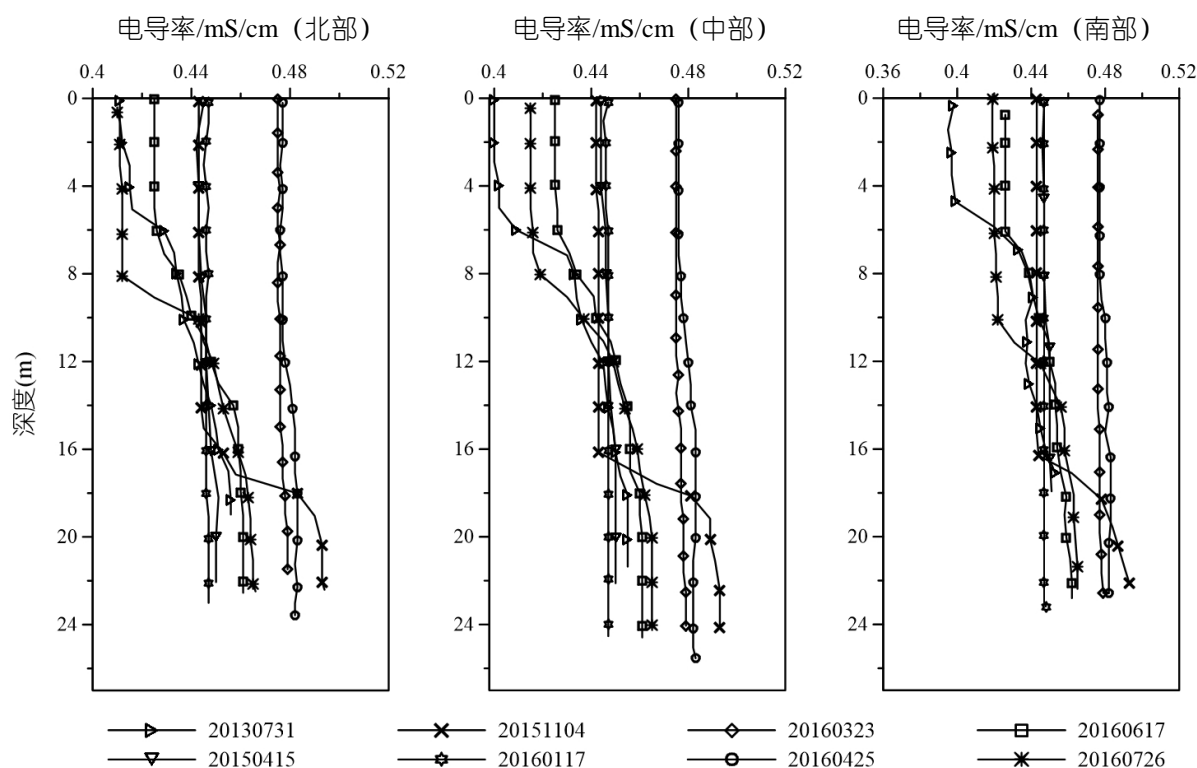


Figure 5. Vertical profile of conductivity in Lake Yangzong

图 5. 阳宗海电导率垂直剖面图

电导率的变化趋势曲线也可以像温度、溶解氧、pH 的变化曲线一样分为四组。2016 年 1 月和 3 月，除了这两个月份的电导率值不一样以外，电导率在水平和垂直方向上的变化不大。春季，电导率在垂直方向上随深度加深稍有增加，三个监测点的变化趋于一致。但是，2016 年 4 月的电导率值比 2015 年 4 月的高，与以上参数不同的是电导率在此阶段内没有发生分层。2016 年 1~4 月，阳宗海水体电导率逐月上升，直到夏季才出现稳定的电导率分层现象。在此阶段内，垂直剖面的中部电导率明显上升，但各月份“剧变层”的深度不同，在同一个月份，水平上的差异很小。秋季，电导率相对于夏季有所升高，垂向上，在水深 16~20 米的范围内，电导率大幅增加，其他深度的变化很小。水平分布上，三个监测点之间没有明显的不同。

3.2.4. 叶绿素 a

与其他参数相比，叶绿素的变化有其独特的特点，秋冬季节总浓度较高(图 6)。

冬季和早春，叶绿素浓度值和变化趋势都存在明显的不同。2016 年 1 月，叶绿素浓度在表层 4 米范围内急剧增加，4 米以下浓度值保持不变。2016 年 3 月，南部和北部整体上呈现出叶绿素浓度随深度增加而下降的特点，两个监测点的不同之处是南部在表层 6 米范围内叶绿素浓度快速降低；而在湖泊中部，叶绿素浓度在表层 4 米范围内随深度加深而增加，在其他深度范围内变化不大。冬季的叶绿素浓度高于早春的叶绿素浓度。春季，水平和垂直方向上的变化非常明显。2015 年 4 月，北部的叶绿素浓度明显较高，在 4~8 米范围内形成明显的峰值，中部和南部湖区分别在 4 m 和 6 m 处形成较小的峰值。2016 年 4 月，叶绿素浓度曲线在垂直方向上来回摆动，中部和南部的摆动范围较大。两个 4 月份相比，2015 年 4 月份的叶绿素浓度高于 2016 年 4 月份的叶绿素浓度。这个季节湖泊叶绿素浓度的变化没有规律可循，北部湖区的叶绿素浓度较高。夏季，垂直方向上形成了稳定的叶绿素浓度峰值。2013 年 7 月，峰值出现并保持

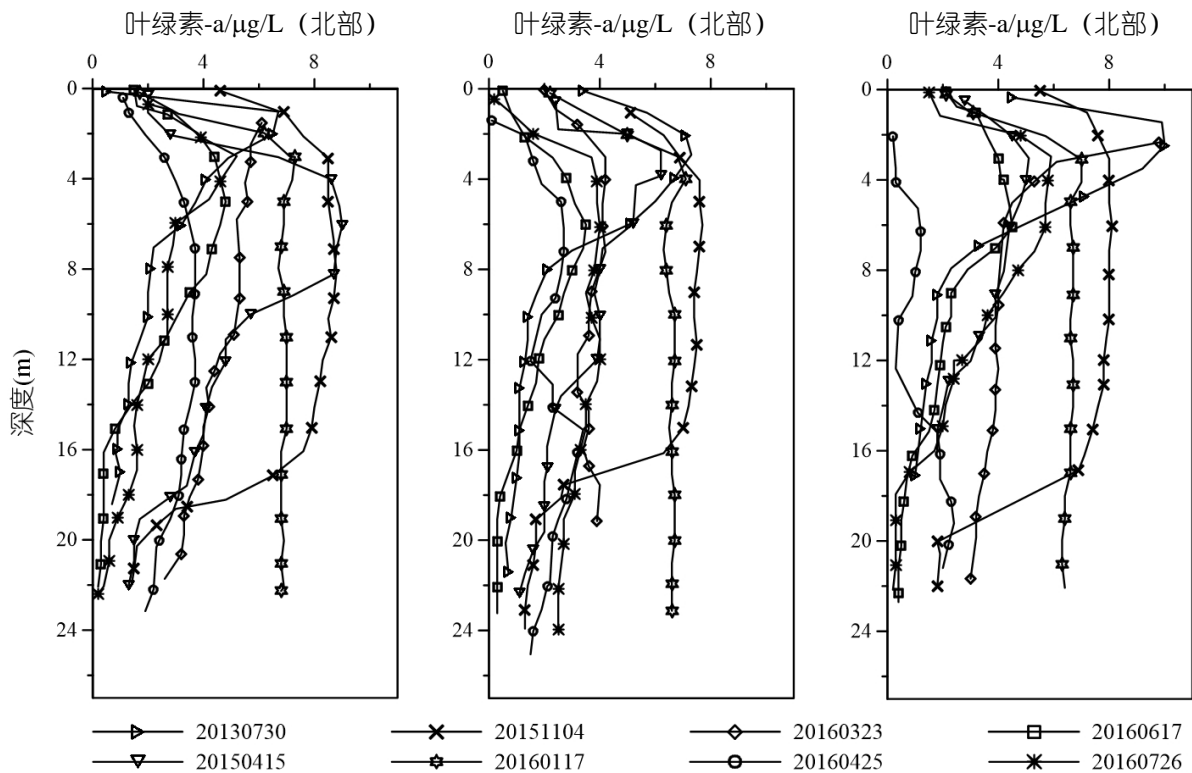


Figure 6. Vertical profile of chlorophyll in Lake Yangzong

图 6. 阳宗海叶绿素 a 垂直剖面图

在水深 0~4 m 范围内，并且浓度较高。2016 年 6 月和 7 月与 2013 年 7 月相比，叶绿素浓度峰值及其所在的深度都有所下降，除了 2013 年的中部监测点以外，夏季各月份在各个监测点都形成了稳定的分层结构。秋季，叶绿素浓度水平极高，在 2~18 米的范围内浓度聚集，此阶段内叶绿素 a 浓度分层明显，各个监测点的变化趋势基本一致。

3.2.5. 藻蓝蛋白

水体中藻蓝蛋白与叶绿素 a 有同样的指示作用，均能反应水体中浮游生物量的多少和水体的营养状态，二者差别是叶绿素 a 几乎存在于所有的真核生物中，而藻蓝蛋白主要存在于蓝藻中。阳宗海水体中，藻蓝蛋白的季节分布有其自身的特点(图 7)：从季节变化上看，从 1 月到 11 月，藻蓝蛋白浓度呈现出冬、春季节逐月降低，夏季表层在表层逐月上升，秋季整体相对上升的趋势。1~4 月阳宗海水体中藻蓝蛋白数量逐月减少。其中，1、3 月份浓度较大，在水下 4~17 m 的范围内大量分布。2015 年 4 月份藻蓝蛋白从北向南集中生长的范围逐渐缩小，其余月份在水平方向上变化不大；6、7 月份，大约在表层 7 m 的范围内藻蓝蛋白浓度逐月升高，分层明显。6 月在 7~14 m 范围内形成一个生长高峰层，2013 年 7 月藻蓝蛋白集中分布的位置上移到 0.5~6 m 的范围内，各湖区变化趋势基本一致；2016 年 7 月北、中、南三个区域内集中生长的范围分别为 2~9 m、6~13 m 和 1~8 m。11 月，整个湖泊内藻蓝蛋白在 5~16 m 的范围内浓度较高且，垂向上变化较小，16 m 以下藻蓝蛋白浓度大幅降低。

3.2.6. 蓝藻相对数量指数的季节性变化

阳宗海水体中蓝藻相对数量指数春、夏、冬季相对较高，秋季较低(图 8)。

从上图中可以看出，蓝藻相对数量指数从大到小的月份依次为 2016 年 4 月、2016 年 3 月、2013 年

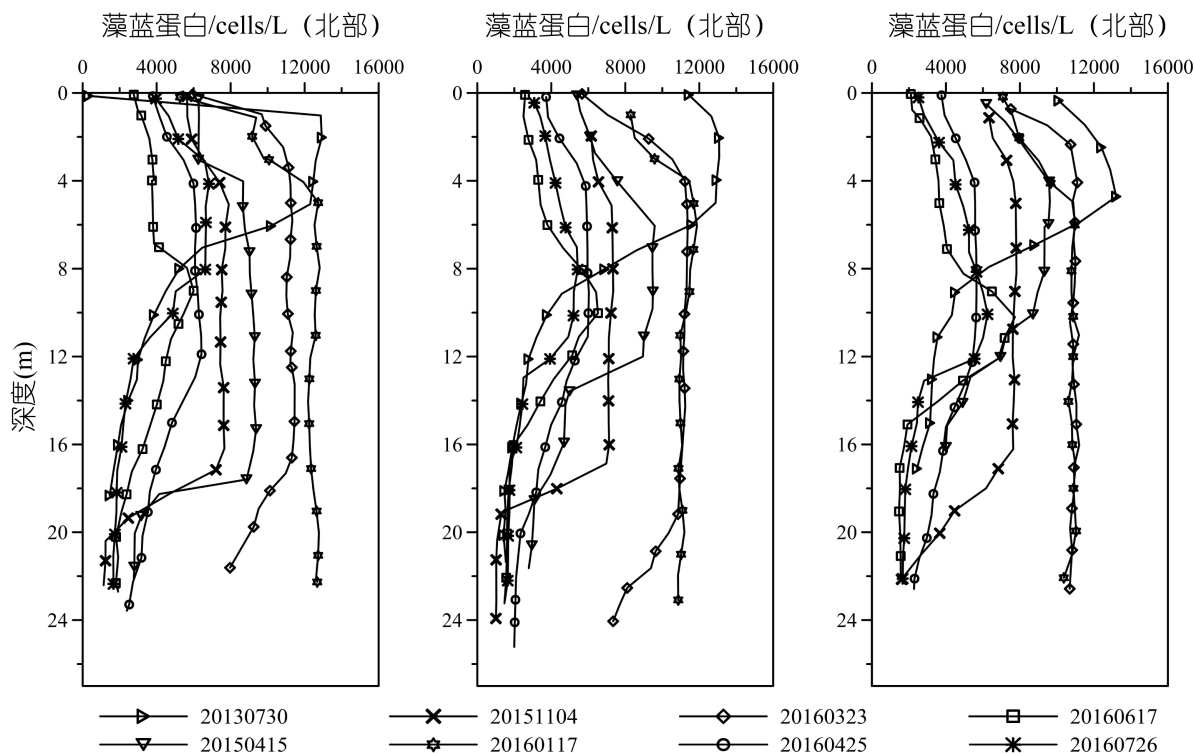
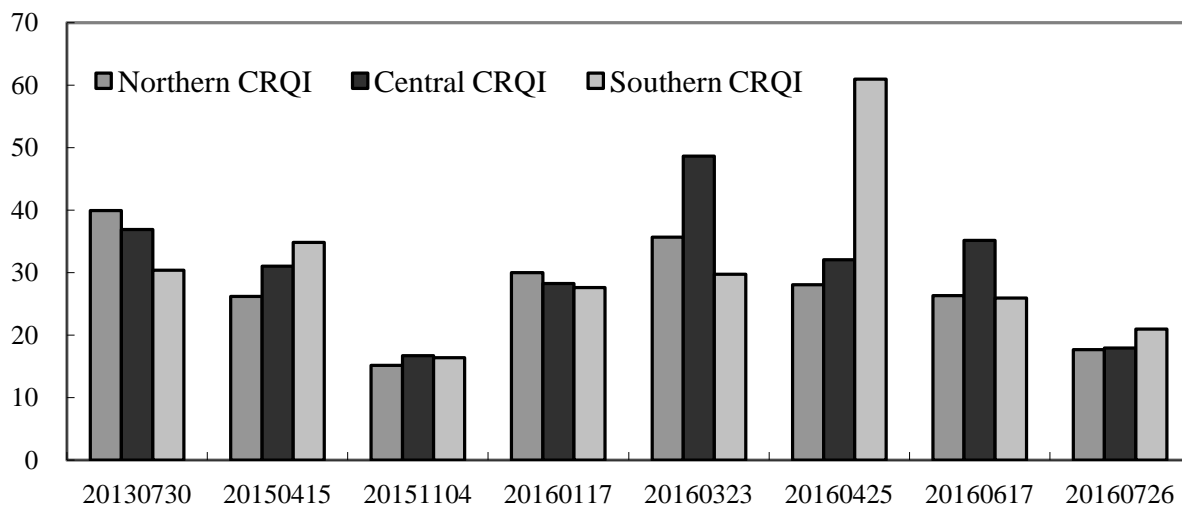


Figure 7. Vertical profile of phycocyanin (PC) in Lake Yangzong
图 7. 阳宗海藻蓝蛋白垂直剖面图



说明：纵坐标数值由公式 $CRQI = [PC]/[chl-a]$ 计算而来，水质参数仪实测数据中 PC 和 chl-a 的单位分别为 cells/L 和 ug/L，为了使二者具有可比性，根据水质参数仪使用说明书将单位换算一致。应该注意的是，藻蓝素和叶绿素是两种不同性质指标，不存在包含关系，因此不用百分比表示。

Figure 8. Cyanophyte Relative Quantity Index in each month of 2013~2016 in Lake Yangzong
图 8. 阳宗海 2013~2016 年各月份蓝藻相对数量指数

7月、2015年4月、2016年6月、2016年1月、2016年7月和2015年11月。从2015年11月到2016年7月，蓝藻相对数量指数总体上呈现出先升高后降低的趋势。其中，2016年4月份蓝藻相对数量指数最高，空间上南部最高；2016年3月次之，湖泊中部蓝藻相对数量指数较高。2016年4月与2015年4

月相比, 各个湖区蓝藻相对数量指数有所上升, 特别是南部湖区上升幅度较大。可以看出, 2016年蓝藻数量相对于2015年有所增加。2013年7月, 蓝藻相对数量指数也比较高, 从北向南依次减少; 与2013年相比, 2016年7月蓝藻相对数量指数有所降低。2015年11月蓝藻相对指数为所有监测季节中最低, 北、中、南三个断面差别不大。

4. 分析与讨论

4.1. 阳宗海水体混合类型

按照湖水季节性温度分层和混合特征, 湖泊可以分为6种类型[18], 其中把分布在温带、亚热带山区和受大洋气候影响的地区, 每年循环一次, 且湖水水温从不低于4°C的湖泊分类为暖单循环湖。阳宗海属于该类湖泊, 从春季到冬季, 温跃层从无到有、从有到无, 形成一个由分层到混合的动态循环过程。

4.2. 水质参数的分层与混合特征

湖泊水温是决定湖泊初级生产力的重要因素, 影响着湖泊水体的物理特性、化学反应过程和生物活动, 分层湖库水温的分布及温跃层的形成和消失对湖库水化学参数具有重要影响[3] [19]。结合阳宗海水体中温度、溶解氧、pH值、电导率、叶绿素a和藻蓝蛋白的分布特征可以看出, 水温的变化影响着其他各水质参数的变化。同时, 根据水体温度的变化特征, 可将4、6、7和11月份分为水温分层期, 1、3月份分为混合期。

溶解氧是从空气中溶解到水中的分子态氧, 湖泊水体中溶解氧会受到温度、藻类生长、水体生化反应等因素的影响。水温分层期, 水体表层藻类光合作用与大气复氧作用较强, 溶解氧浓度较高。随着深度加深, 光合作用减弱, 上层水生生物的呼吸作用消耗光合作用产生的氧气, 使得向下传输的氧源减少, 加之下层水体和沉积物中的有机质的氧化反应大量耗氧, 使得下层水体中的氧气利用殆尽, 因此分层期从湖上层到底层溶解氧浓度逐渐降低, 尤其是夏季, 湖中层溶解氧急剧降低, 湖下层出现缺氧现象。根据Jacob Kalff [4]的研究, DO在淡水中的溶解度主要取决于水温, 在气压一定时, 水温越低, 溶解氧浓度越高。因此, 在温度较低的水体混合期(1、3月份), 溶解氧浓度较高。然而, 温度较低的1月份溶解氧浓度低于3月份, 在此阶段内, 1月份水体中的叶绿素a和藻蓝蛋白含量都较高, 电导率、pH值都低于3月份, 表明1月份阳宗海水体中有藻类生长, 而藻类活动主要则以呼吸作用为主。原因是1月份温度较低, 光合作用不太强烈, 并且呼吸作用需要有氧气和有机物作为原料, 那么水体中的溶解氧和营养盐就会被消耗, 导致1月份溶解氧和电导率下降, 同时, 呼吸作用释放出的CO₂溶于水使得pH值也降低。

通常情况下, 水体中CO₂的高低影响着pH值的变化, 而水体CO₂的多少又受制于水体表层浮游藻类的多少和底层有机物的分解。表层水体中藻类的光合作用消耗掉大量的CO₂, 使酸根离子减少, pH值上升, 水体碱性增强; 底层水体中, 藻类光合作用较弱, 有机物的分解释放出CO₂, 使水体酸性增强。藻类生长和有机物分解都需要适宜的温度, 因此, 在温度分层的季节, pH也发生分层, 上层水体pH值较高, 底层较低, 阳宗海的pH值变化符合这种趋势。在水体混合期, 温度较低, 浮游藻类光合作用较弱, 水体的理化反应也不强烈, 湖泊的酸碱度在垂向上变化不大, 整体比较均匀。2016年1月和7月份, 各个监测点表层PH的变化趋势有所不同, 造成这些月份pH值变化较大的原因可能是南部有河流注入, 河水中的污染物使得pH发生改变。这里我们需要指出的是, 阳宗海下部水体相对上部水体来讲有从偏碱性向中性发展的趋势, 特别是湖泊南部比较明显, 加之溶解氧急剧减少, 可能会使湖泊下部向酸化无氧状态发展, 对底栖生物种类及数量产生影响。

阳宗海流域内植被覆盖率较低,降水较集中的季节,入湖河流和地表径流把大量的泥沙和工农业污染物带入湖内,成为营养盐,一部分在表层被藻类吸收利用,其余入湖物质沉降到下层水体中,使得水体中营养盐和固体溶解物质随深度加深而增加,水体电导率也随之增加,因此表层水体电导率较低,中下层电导率随着深度加深而增加。秋季,降水量减小,湖上层降蒸发量大于降水量,水体中的盐类物质被浓缩,此时湖泊电导率相对于夏季有所增强。因此,在热分层期,降水是影响电导率的主要因素。春、冬季节,降水较少,入湖物质较少,垂直剖面内电导率基本保持在同一水平。2016年4月阳宗海电导率比2015年4月高,表明水体中盐类物质浓度升高,因此2016年4月蓝藻相对数量指数也高于2015年4月。这与近年来阳宗海周围别墅区、工厂和高尔夫球场的建设有一定的关系,别墅区建设、工厂运作和高尔夫球场的保养都需要大量的水资源,这些设施的用水一方面会造成湖泊水位下降,另一方面,别墅区排出的生活污水、工厂排出的废水和高尔夫草地上施用的肥料都含有大量营养盐和污染物质,也会渗入湖盆中增加水体中的盐分。因此,湖泊周围人类活动可能是2016年4月电导率和蓝藻相对数量较2015年4月上升的原因之一。

叶绿素 a 和藻蓝蛋白的浓度均能反映藻类的多少。藻类的生长受到的温度、光照、营养盐等多种因素的影响,在适宜的温度和深度范围内,藻类大量生长繁殖。水体热分层期,光照较强,中上层水体的温度适宜,此阶段内降水充沛,入湖径流带来大量的营养盐,为藻类的光合作用和呼吸作用提供了充足的条件,因此水温分层期阳宗海藻类生长也形成集中分布的水层。混合期,各深度的电导率变化不大,表明水体中营养盐分布也较均匀,因此藻类在各深度分布均匀。阳宗海水体中,除了3月份南部表层叶绿素逐渐降低外,叶绿素 a 和藻蓝素的分布趋势基本一致。造成3月份南部表层叶绿素 a 含量较高的原因可能是南部注入的河流带来了大量的营养物质。

4.3. 基于叶绿素 a 浓度、藻蓝素浓度和蓝藻相对数量指数的水质状况分析

在水体营养状况的研究中多数以叶绿素 a 浓度作为表征藻类生物量多少的指标,在使用藻类种群对水体的营养状况进行评价时,如果不进行显微镜检测就以叶绿素 a 浓度高来说明水体藻类含量较高显然不精确,原因是其他水生植物和进入水体的外源物质中也可能含有叶绿素 a,因此叶绿素 a 含量只能用来粗略地估算水体中的藻类含量。单独使用藻蓝素来估算水体中蓝藻数量时,仅能反应含有藻蓝素的藻类的数量,而不能反映出蓝藻相对于所有藻类的丰度比例。因此,把二者结合起来,计算得出藻蓝素与叶绿素 a 的色素比能很好的反应水体中蓝藻的丰度,以估算某一时期内水体中的优势种群是不是蓝藻,以预防水华发生。根据阳宗海蓝藻相对数量指数的估算值,春、夏、冬季蓝藻相对指数较高,并分别在2016年3、4月份的中部湖区和南部湖区形成生长高峰,而此时水体中的电导率也较高,表明此阶段内水体中营养盐含量较多,为蓝藻的生长提供了充足的营养物质。因此春季应加强对蓝藻数量的监测,以防止蓝藻过量生长引发水华。同时,对于底层缺氧较严重的夏季的监测也不容忽视。监测数据分析结果揭示,相对于2015年4月,2016年4月蓝藻相对数量指数有所增加,说明2016年水质相对于2015年有所恶化。

5. 结论

通过对阳宗海各季节水质参数的垂直和水平空间布局特征和蓝藻相对数量指数的分析可以得出以下结论:

阳宗海水体各水质参数在春、夏、秋季节存在明显的季节性垂向分层特征,在冬季和初春混合均匀,湖泊水体每年对流一次,且最低温不低于 4°C ,为典型的暖单循环湖。

阳宗海水体中溶解氧、pH值、电导率、叶绿素 a 和藻蓝素的垂向分层和混合特征与水温的分层特征较为相似,说明水温的季节性变化影响着水体中其他各水质参数的季节性变化。

春、夏、冬季, 阳宗海水体中蓝藻相对数量指数较高, 尤其是春季 4 月份, 2016 年蓝藻相对数量指数比 2015 年大, 表明水质状况有所恶化。

在湖泊南部, 一些月份 pH、叶绿素 a 和蓝藻相对数量变化趋势都与北部和中部有所不同, 这与南部河流的注入密切相关, 而湖泊南部人口密集, 人类活动造成的污染较大, 因此, 要保护好阳宗海水质和用水安全, 因控制外源污染物的注入。加强水体断面各种物力参数的变化, 特别是 pH 值的变化, 对水体底部 pH 值的持续降低给予高度关注, 防止过渡酸化。

基金项目

云南省领军人才计划(No. 2015HA024)和云南省高端人才引进项目(2010CI111)资助。

参考文献 (References)

- [1] 于洋, 张民, 钱善勤, 等. 云贵高原湖泊水质现状及演变[J]. 湖泊科学, 2010, 22(6): 820-828.
- [2] 王斌, 马健, 王银亚, 等. 天山天池水体季节性分层特征[J]. 湖泊科学, 2015, 27(6): 1197-1204.
- [3] 董春颖, 虞左明, 吴志旭, 等. 千岛湖湖区水体季节性分层特征研究[J]. 环境科学, 2013, 34(7): 2574-2581.
- [4] Jacob Kalf, 著, 古滨河, 刘正文, 李宽意, 等, 译. 湖沼学——内陆水生态系统[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 154-330.
- [5] 庞晓宇, 段洪涛, 张玉超, 等. 富营养化湖泊水体中藻蓝蛋白提取方法的对比[J]. 湖泊科学, 2014, 26(5): 799-806.
- [6] 谢永红, 李春永, 杨中兰. 阳宗海浮游生物群落结构研究[J]. 水资源保护, 2015, 31(4): 47-51.
- [7] 尹斌. 基于 MERIS 数据的太湖蓝藻估算研究[D]: [硕士学位论文]. 南京师范大学, 2011.
- [8] 李春永, 杨中兰. 阳宗海浮游植物群落与营养状态评价[J]. 人民珠江, 2013(3): 20-23.
- [9] 李晓铭, 李世玉. 阳宗海叶绿素 a、磷、氮动态特征及富营养化趋势[J]. 水资源保护, 2014, 30(4): 43-46+52.
- [10] 杨常亮, 李世玉, 刘仍兵, 等. 阳宗海外源氮磷负荷入湖量分析[J]. 上海环境科学, 2014, 33(2): 47-52.
- [11] 张玉玺, 向小平, 张英, 等. 云南阳宗海砷的分布与来源[J]. 环境科学, 2012, 33(11): 3768-3777.
- [12] 齐剑英, 许振成, 李祥平, 等. 阳宗海水体中砷的形态分布特征及来源研究[J]. 安徽农业科学, 2010(20): 10789-10792.
- [13] 毕建培, 刘晨, 黎绍佐. 阳宗海砷污染水质变化过程分析[J]. 水资源保护, 2014(1): 84-89.
- [14] Wang, Z.H., He, B., Pan, X.J., et al. (2010) Levels, Trends and Risk Assessment of Arsenic Pollution in Yangzonghai Lake, Yunnan Province, China. *Science China (Chemistry)*, **53**, 1809-1817. <https://doi.org/10.1007/s11426-010-4039-3>
- [15] 袁琳娜, 杨常亮, 李晓铭, 等. 高原深水湖泊水温日成层对溶解氧、酸碱度、总磷浓度和藻类密度的影响: 以云南阳宗海为例[J]. 湖泊科学, 2014, 26(1): 161-168.
- [16] 祝艳. 阳宗海流域环境背景状况[J]. 环境科学导刊, 2008, 27(5): 75-78.
- [17] 黄磊, 王君波, 朱立平, 等. 纳木错水温变化及热力学分层特征初步研究[J]. 湖泊科学, 2015, 27(4): 711-718.
- [18] 沈吉. 湖泊沉积与环境演化[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 7.
- [19] 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(6): 844-850.

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：ag@hanspub.org