

Seasonal Variations of Water Quality Parameters in Lake Qilu

Yu Zhou, Hucai Zhang*, Fengqin Chang, Lizeng Duan, Huayong Li, Xinyu Wen, Rongxin Bi, Han Wu, Mengshu Zhu

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: 595152814@qq.com, *zhanghc@niglas.ac.cn

Received: Jul. 20th, 2017; accepted: Aug. 6th, 2017; published: Aug. 11th, 2017

Abstract

To understand the characteristics of water quality, their seasonal variations and vertical thermal dynamics, the water temperature (Temp), dissolve oxygen (DO), Chlorophyll-a (Chl-a), pH and Turbidity+ (Turbid+) of Lake Qilu, one of the typical plateau shallow lakes in Yunnan Plateau, were measured in October of 2015 and January, May, June, October of 2016. The data analysis results show a complex seasonal change picture of the water quality parameters. The water temperature did not change significantly in the vertical profile and following the air temperature. Affected by the Lake Qilu Basin and the altitude of weather station, the measured water temperature is slightly higher than the air temperature during the monitoring period. As the precipitation in Lake Qilu Basin concentrated in the rainy season, which lasted from June to October, short term local temperature was affected by the evaporation and raining processes. Certainly, the existence of Lake Qilu possesses a strong effect on the climate-environments of the drainage area, especially during the winter. The monitored data revealed large seasonal variations and spatial differences of the contents of chlorophyll-a, dissolved oxygen in the lake water, which are closely related with the human activities in the region. The pH values of Lake Qilu fluctuated between 7.6 - 8.8 that related to the photosynthesis of algae and the aerobic decomposition of organics at the bottom of the lake. The turbidity was higher in June, which might be related to the outbreak of algae, the polluted river water discharges into the lake and pollutant release from the lake sediment caused by lake water disturbance. The contents of both nitrogen and phosphorus in Lake Qilu are at a high level. It was concluded that the external pollutant input is one of the main sources of lake, and further the main factors inducing eutrophication of the lake water. During the monitoring period, the lake water quality as a whole is deteriorating, the lake nutrition is increasing, and the algae concentration is rising. It is the time to take serious measurements to protect the Lake Qilu from the further deterioration, even it is already too late to keep the lake function properly and effectively.

Keywords

Lake Qilu, Seasonal Variation, Water Temperature, Dissolved Oxygen, Chlorophyll-a, pH, Turbidity+

*通讯作者。

杞麓湖水质参数季节性变化

周 瑜, 张虎才*, 常凤琴, 段立曾, 李华勇, 文新宇, 毕荣鑫, 吴 汉, 朱梦姝

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: 595152814@qq.com, *zhanghc@niglas.ac.cn

收稿日期: 2017年7月20日; 录用日期: 2017年8月6日; 发布日期: 2017年8月11日

摘 要

本文通过对杞麓湖2015年10月、2016年1月、5月、6月、10月水温(Temp)、溶解氧(DO)、叶绿素a(Chl-a)浓度、pH、浊度(Turbid+)进行垂直剖面监测数据分析, 给出了杞麓湖水质现状数据, 在此基础上讨论了杞麓湖水体水质参数季节性变化特征。分析结果表明, 作为典型高原浅水湖泊的杞麓湖, 其水质参数季节性变化明显, 其中水温是受季节变化影响最显著的环境因子, 受湖水扰动作用, 混合性较强, 加之由于湖水较浅, 水温表现为垂直方向上变化不明显, 水温随气温变化也不存在滞后效应。受杞麓湖盆地效应及气象站点海拔影响, 监测时段内水温均略高于气温。流域降水集中在每年6~10月, 水气的滴落、蒸发对当地气温短时段变化有一定影响。杞麓湖对流域气候的调节作用显著, 这一点在冬季尤为重要。湖水叶绿素a浓度、溶解氧受人类活动影响, 季节性差异明显, 空间差异较大。杞麓湖各季节pH在7.6~8.8之间波动, 与藻类光合作用及底层有机物腐解关系密切。浊度在6月达到最大值, 可能与藻类爆发、污水的集中输入以及湖水扰动底泥释放有关, 对湖泊产生不利影响。湖水氮磷浓度均处于较高水平, 外源污染输入是造成湖泊富营养化的主要原因, 底泥的释放也是引起湖水营养盐浓度升高的又一原因。监测时段内, 湖泊水质整体处于恶化状态, 湖泊营养化加重、藻类浓度上升、生态效益退化。杞麓湖的生态环境治理需要科学的管理理念和措施、更多的资金投入和更有效的管理。

关键词

杞麓湖, 季节变化, 水温, 溶解氧, 叶绿素a, pH, 浊度

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

湖泊是一个相对独立的自然有机体, 它的发展变化与大气圈、岩石圈、生物圈和陆地水圈密切相关, 对于自然过程的变化有敏感的响应, 是气候、环境及其生物发生变化和演变的理想信息载体[1]。作为重要的自然资源和战略性资源, 湖泊资源在社会经济发展过程中发挥着不可替代的作用。但目前我国已有多个大中型湖库生态系统发生退化, 生态服务功能处于已经丧失或正在丧失的过程中, 这不仅危及湖库生态系统的健康发展, 也严重威胁到流域民众的生产生活, 进而阻碍经济的可持续发展。

湖泊水体理化参数的变化, 受自然环境与人类活动的双重影响, 从某种意义上讲, 人类活动对于湖泊水质变化的影响远远超过了自然环境的作用, 不但加速了湖泊自然演变的进程, 更重要的是打破了生

态系统的平衡, 导致水体污染和富营养化。由于水体中不同的理化参数对湖泊生态系统变化响应不同, 对湖泊水质的实时监测有助于了解湖泊的动态变化, 掌握湖泊生态系统的健康状况, 进而对湖泊生态现状做出正确的评估。这不仅有助于污染严重湖泊治理工作的实施, 同时为了解湖泊在自然与人类活动共同作用下的变化趋势提供了理论基础。

湖水温度是湖水的重要物理属性之一, 它反映湖泊的热学状况, 制约着湖泊的生物化学过程[2]。受水体热力状况、透明度、光照及湖泊形态影响, 大多数深水湖库都会出现水体温度分层现象, 并且一般表现为: 春季有稳定的温跃层出现, 并且温跃层厚度和温度梯度不断增大, 在夏季的 7、8 月份达到最大值, 而秋季温跃层的厚度和温度梯度下降。如天山天池即是如此, 气温的季节性变化及湖库特征使其表现出水体的季节性分层[3]。受温度分层影响, 水体溶解氧浓度、电导率、pH、叶绿素浓度、浊度等水质参数也存在分布上的变化。与深水湖库相比, 浅水湖库垂直温差变化小, 不易形成温度分层现象, 不同水体其他参数的分布情况存在较大差异。

针对高原地区浅水湖泊的研究近年来不断受到重视, 如张虎才[4]对滇池构造漏水隐患及水安全的研究; 张云鹰[5]通过水质参数的监测对星云湖、抚仙湖水质变化趋势分析等。对于杞麓湖的研究, 以往多集中于湖泊富营养化、污染特征、沉积物分析以及流域土地利用变化等方面[6]-[11], 在水质方面研究较少, 且更多学者集中在单个参数与环境因子的相关关系进行研究, 如秦洁[12]等对杞麓湖叶绿素 a 与水质因子时空分布特征及相关性的研究, 在长时间尺度上对杞麓湖水质的监测研究还未见报道。杞麓湖是流域内地表径流汇集的中心, 也是各类污染集中地。受人类活动影响, 杞麓湖水质在近 30 年内不断下降, 水体 pH、总磷、总氮等参数严重超标, 属劣 V 类水质[6]。加上 2009~2012 年间大规模干旱的同时, 受到人类的叠加干预, 湖泊面积进一步急速缩小, 生态环境问题突出。本文从长时间尺度上对杞麓湖的水质状况进行监测分析, 探讨杞麓湖水质参数的季节性分布特征, 以期为杞麓湖的污染治理提供科学参考。

2. 研究区域概况与分析方法

2.1. 研究区域概况

杞麓湖位于云南省玉溪市通海县境内, 地理位置为 $24^{\circ}4'36''N\sim 24^{\circ}14'21''N$, $102^{\circ}33'48''E\sim 102^{\circ}52'36''E$ (图 1), 北与江川星云湖相邻, 南望曲江干流, 西依玉溪大河(曲江上游段), 东邻华宁龙洞河, 属南盘江水系。杞麓湖湖泊呈北东南西向的矩形状, 湖面高程为 1795.7 m 时, 湖面面积为 36.95 km^2 , 东西长 10.4 km, 南北平均宽约 3.5 km。最大水深 6.84 m, 湖容量 $1.47 \times 10^8\text{ km}^3$ 。杞麓湖在最近几十年发生过多次面积缩小、水位下降的事件, 例如 1958 年、1983 年、2012 年等。特别是由于人为泄水造田致使杞麓湖面积从 2012 年 2 月之前的 33.53 km^2 锐减 2013 年 4 月的 21.8 km^2 , 到 2015 年也仅维持在 23 km^2 , 除非重新蓄水养湖, 杞麓湖面积现已跌出云南九大湖泊 30 km^2 的临界值[4]。湖区属亚热带季风气候, 年平均降水 881.0 mm, 年平均气温 15.6°C 。杞麓湖为一封闭性高原浅水湖泊, 无明显出水口, 靠天然溶洞泄水, 水资源的来源主要靠降雨径流补给。周围有红旗河、大新河、者湾河等十多条季节性入湖河流。杞麓湖是通海县较重要的水资源, 杞麓湖流域是通海县社会经济发展的主体, 是通海县生存发展的基础, 具有工农业用水、调蓄、防洪、航运、旅游、水产养殖等功能, 通海人民将杞麓湖称为“母亲湖”。

2.2. 样点布设及采样

依据湖泊的形态及水文状况分别在杞麓湖河流入湖处、湖心、最深点以及没有明显淡水输入的湖滨区域布设采样点并于 2015 年 10 月~2016 年 10 月在杞麓湖开展水质监测工作。采样点由麦哲伦“GPS2000XL 卫星导航仪”确定(图 1)。运用美国维赛 YSI6600V 多参数水质监测仪在监测点以 1 m 为间隔测定水体中的水温、叶绿素 a、溶解氧、pH 值、浊度等水质参数, 每次检测前对仪器进行交叉校正,

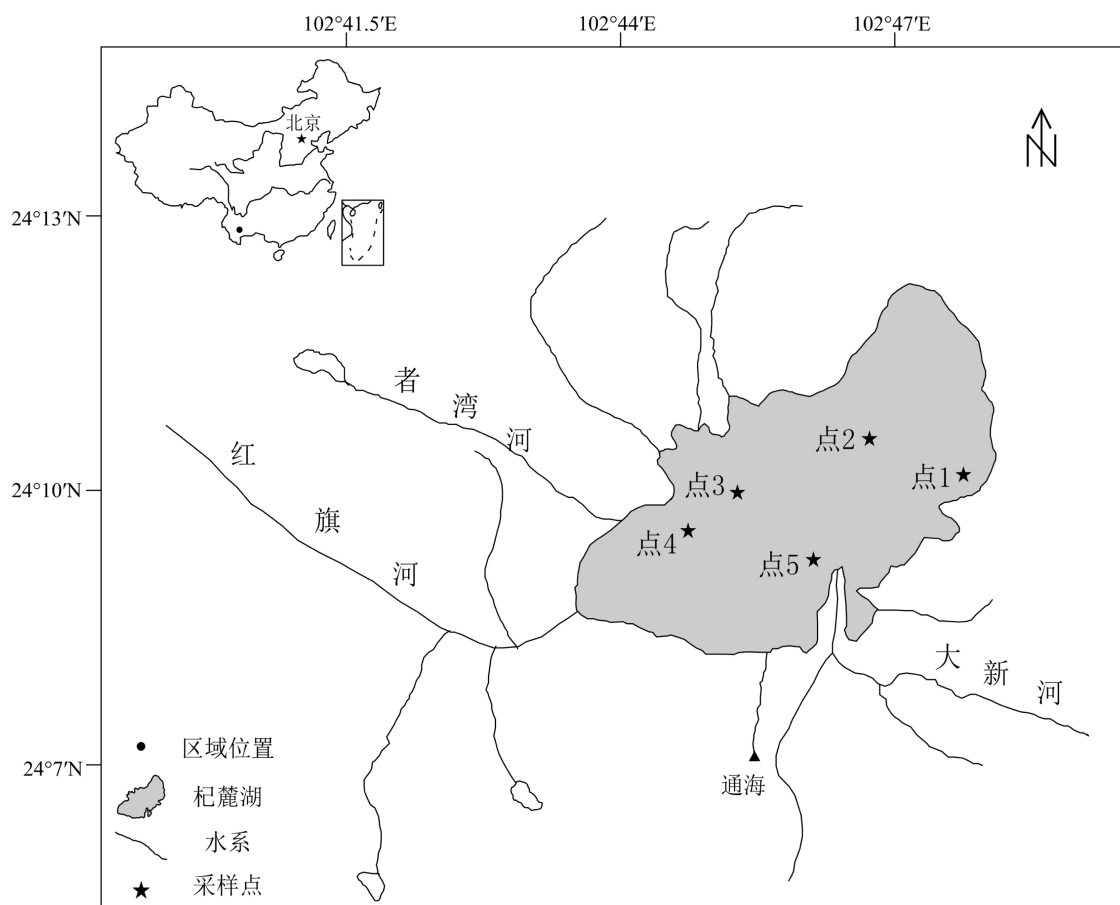


Figure 1. Location and Sampling sites of Lake Qilu

图 1. 杞麓湖位置及采点图

保证数据可靠性。于 2016 年 5 月在靠近湖滨区的 1、3 和 4 号点以 1 m 为间隔采集水柱，通过实验获得其 TP、TN 含量。并结合通海县气象局提供的监测时段内气象数据，对比水温对气温与降水变化的响应，讨论湖泊对流域气候变化的反应及调控作用。

2.3. 数据统计和分析

2.3.1. 数据统计工具

数据整理及制图采用 Excel2007、ArcGIS 和 Grapher 等软件进行统计分析处理。并针对部分数据采用 SPSS16.0 软件在 99%的置信区间进行相关性分析。

2.3.2. 分析方法

1) 水质分析仪 YSI-6600V2

文章中所用到的各水质参数(水温、叶绿素 a、溶解氧、pH 值、浊度、蓝绿藻细胞密度)数据均由多参数水质分析仪美国 YSI-6600V2 所测得。YSI-6600V2 是一款多参数，宽量程的便携式水质监测仪器，是监测工业污水、污水排放口、江、湖、沼泽、江河口、沿海和饮用水水质的理想设备[13]。

2) 分光光度计法

文中所用 TP、TN 数据均采用分光光度计法，由仪器紫外分光光度计 UV-1750 所测得，基本原理为运用紫外分光光度法分别于波长 200 nm、275 nm (TN)和 700 nm (TP)处测定其吸光度，对比标样吸光度

进行校正计算，从而得出 TN、TP 的具体含量。

3. 结果分析与讨论

3.1. 水质参数的变化特征

3.1.1. 水温变化特征

1) 水温垂直变化特征

从 2015 年 10 月~2016 年 10 月水温的垂直变化(图 2)中可以看出，杞麓湖各监测点水温变化与季节变化基本同步。就所监测的时间段而言，最低温度出现在 1 月，水温稳定在 12°C 左右。进入 5 月各监测点水温呈现明显上升趋势，但水温在水平方向上存在不均匀性，整体趋势呈现湖心高边缘低的特点。6 月杞麓湖整体平均水温最高，稳定在 22°C~25°C 之间。10 月水温有所降低，稳定在 20°C 左右。在垂直剖面上，由于湖水较浅，整体而言随着深度的增加水温没有明显的变化。

2) 水温与气温和降水的变化特征

杞麓湖属高原浅水湖泊，水温与气温、降水变化规律较为一致。从图 3 可以看出，监测时段内水温随气温变化基本同步，没有明显的滞后效应，各时期水温均略高于气温，这一点在 2015 年 10 月与 2016 年 1 月较为明显。降水集中在每年 6~10 月，受降水影响气温变化显著。

3.1.2. 叶绿素-a 垂直变化特征

叶绿素 a(Chl-a)是浮游植物生物体的重要组成成分之一，Chl-a 含量的高低是评价浮游植物生物量和现存量的重要指标。从图 4 中可以看出，杞麓湖各监测点叶绿素浓度在 10 月、5 月和 6 月含量均存在差

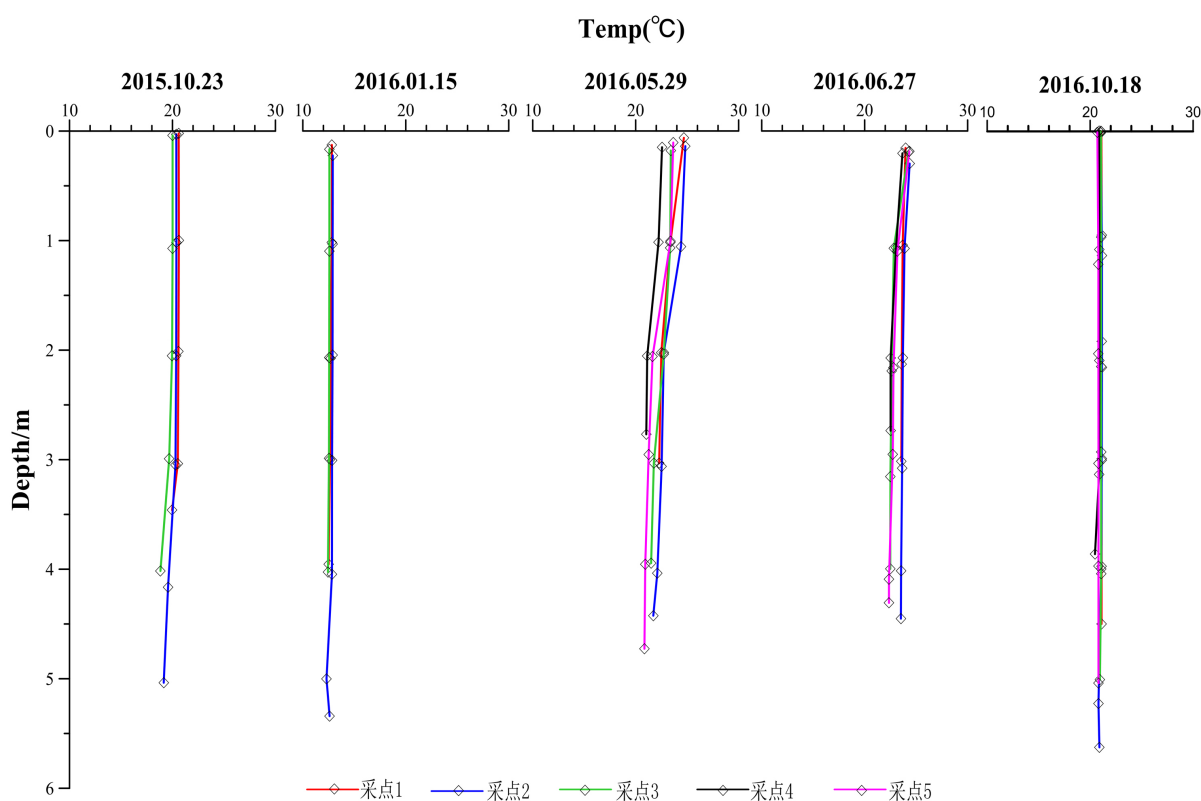


Figure 2. Seasonal variations of vertical water temperature in Lake Qilu

图 2. 杞麓湖水温垂直季节变化

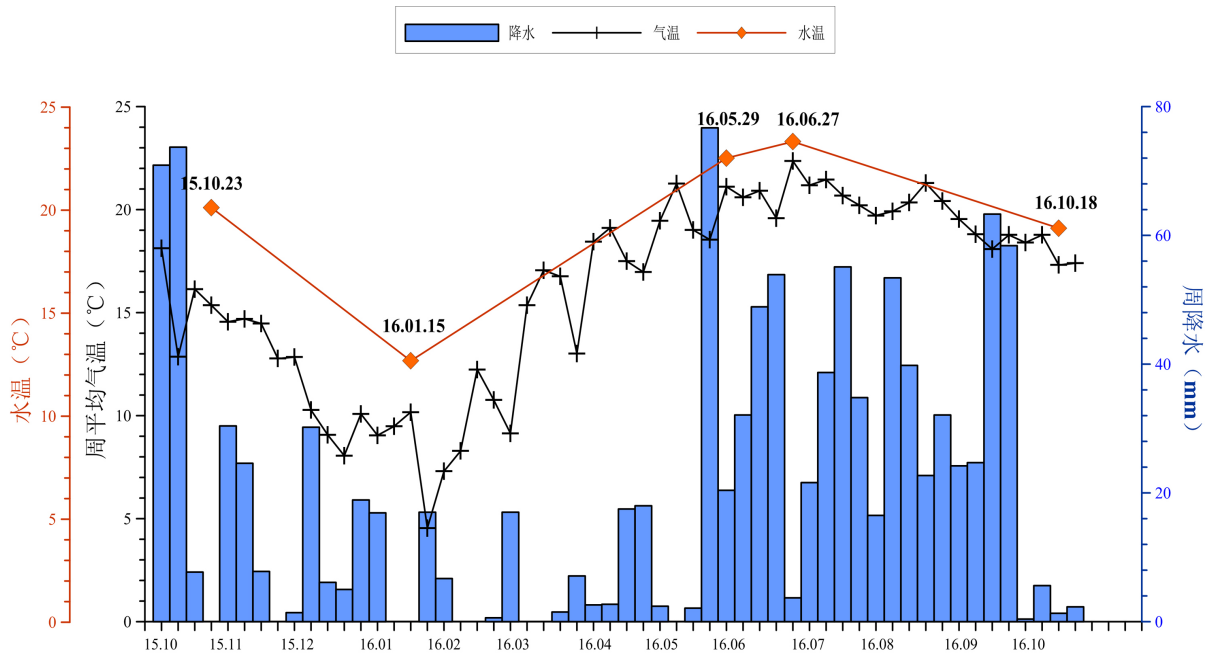


Figure 3. Changes of precipitation, temperature, and water temperature in Lake Qilu from October 2015 to October 2016
图 3. 2015 年 10 月至 2016 年 10 月杞麓湖降水量、气温、水温变化

异, 整体上来看, 叶绿素浓度在水平空间上有从湖周向湖中心递减的趋势, 在 5 月份这一表现最为明显。1 月各点无明显差异, 表明湖泊在冬季完全混合。杞麓湖叶绿素浓度在水平空间上的变化与秦洁、吴献花[12]等对叶绿素 a 时空变化特征研究中所得出的结论相一致。垂直剖面上, 1 月、5 月、6 月和 10 月各点叶绿素 a 浓度均表现为随着深度的增加, 叶绿素 a 浓度不断增高。

3.1.3. 溶解氧垂直变化特征

溶解氧是对湖泊生态系统具有重要影响的关键性因素, 是水体能否保持生态平衡的重要指标, 与其他参数相比, 溶解氧更能反映水生生态系统中的新陈代谢情况[5]。从图 5 中溶解氧垂直变化可以看出, 除 6 月外, 杞麓湖溶解氧浓度值大小在其他季节差异不大, 但垂直变化有一定区别。空间上, 1 月各监测点溶解氧没有明显差异, 而在 5 月、6 月、10 月存在一定差异。总体而言, 溶解氧浓度在 5 月、6 月、10 月均呈现湖心处高, 湖滨低的特征。这一点对于理解杞麓湖溶解氧空间分布、变化及其与其它参数之间的相关关系十分重要, 今后应加强这方面的监测。在垂直剖面上, 1 月各点溶解氧浓度仅在底层出现降低, 其他时段各点总体呈随深度增加溶解氧减少的变化趋势。5 月各点存在溶解氧在 1 米深处达到最大值的情况, 然后随深度增加而减少, 6 月、10 月各点溶解氧浓度随深度增加不断降低。整个监测时段内, 6 月整个水体溶解氧浓度低于其他月份。而根据 2016 年 10 月监测数据来看, 该时期各点溶解氧浓度垂直上都表现为表层水体过高而后迅速降低, 底层水体溶解氧浓度不到 4 mg/L, 这与监测时段内其他时期水体溶解氧浓度变化存在差异。

3.1.4. pH 垂直变化特征

pH 是控制沉积物 P 循环和湖泊富营养化的重要因素, 水体中游离的 CO_2 和 HCO_3^- 离子对 pH 浓度变化有很大影响。监测结果显示, 杞麓湖水体 pH 变化范围在 7.6~8.8 之间, 各点在不同季节 pH 变化各异。其中 1 月各点水平空间没有明显差异, 而在 5 月、6 月、10 月各点差异较为明显。除去污染较为严重的测点 5, 整个湖区 pH 变化呈由东部湖区向西部递减、由湖心向湖滨下降的变化特点, 这可能与湖泊西部

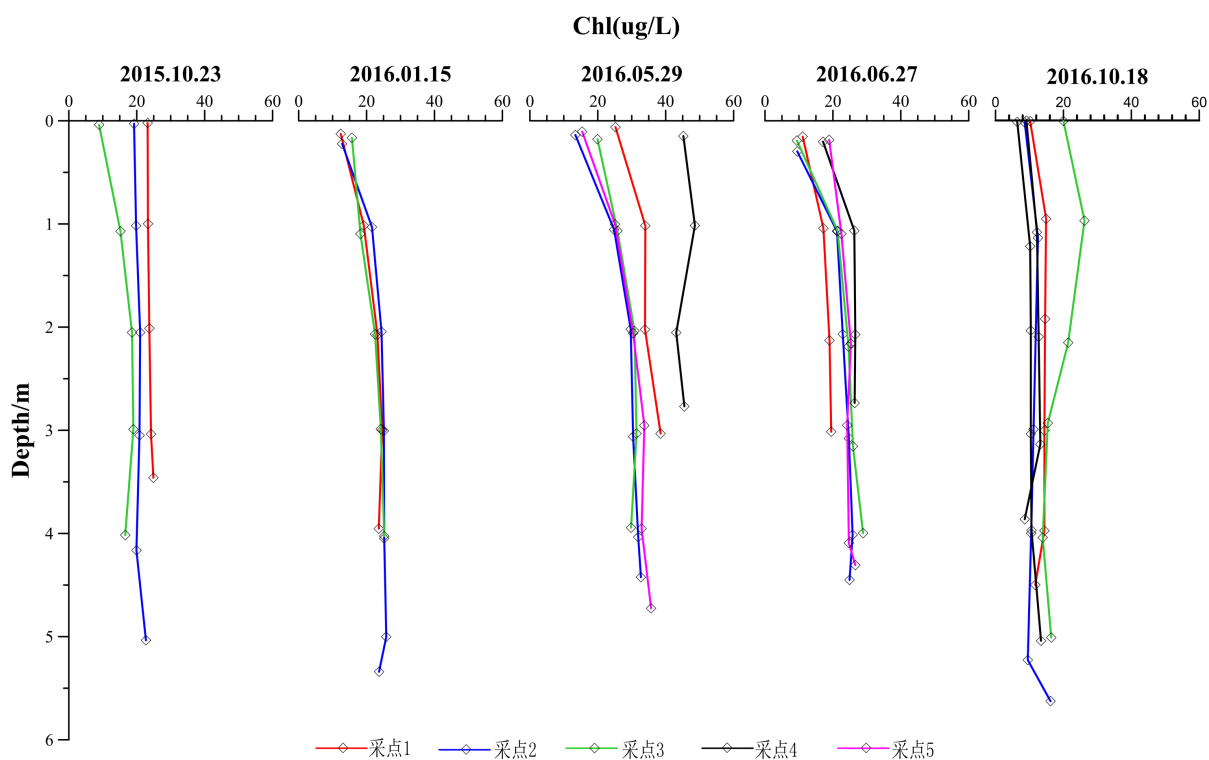


Figure 4. Seasonal variations of vertical Chl-a in Lake Qilu

图 4. 杞麓湖叶绿素 a 垂直季节变化

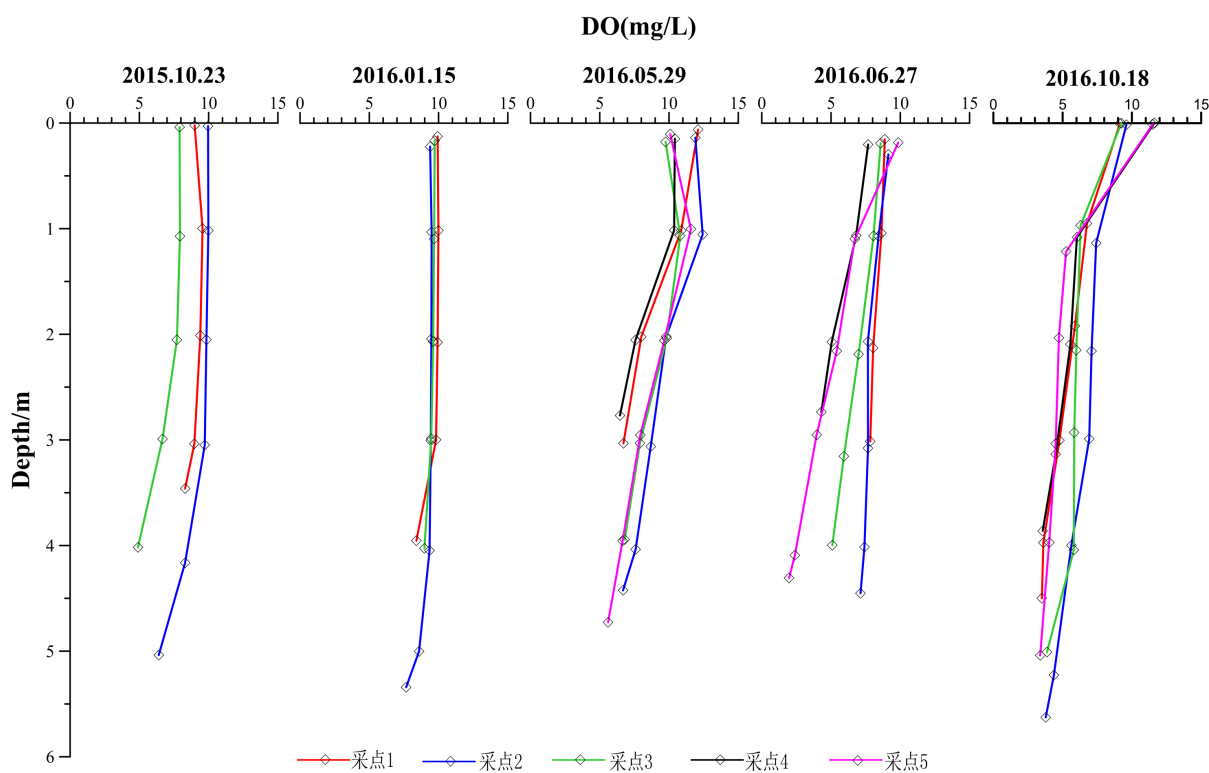


Figure 5. Seasonal variations of vertical DO in Lake Qilu

图 5. 杞麓湖溶解氧垂直季节变化

有主要河流淡水注入的影响有关。垂直剖面上,除1月各点 pH 随深度没有明显变化,其它时期水体 pH 均表现为随深度增加下降的特点。

3.1.5. 浊度垂直变化特征

整体上来看,杞麓湖浊度季节变化较为明显,监测时间段内,随时间、季节变化,表现为水体浊度呈不断上升趋势,这一趋势在5、6月表现较为明显。杞麓湖水体的浊度10月、1月和5月垂直剖面上变化不大,6月各点浊度随深度增加而降低。除6月外,浊度在水平空间上没有明显差异。

3.2. 讨论

杞麓湖水体污染严重,长期处于劣V类,富营养程度为中度~重度富营养[14]。杞麓湖处于流域最低位置,是流域一切污染物的积聚地,社会经济活动加剧了湖泊生态系统脆弱性[15]。杞麓湖流域有红旗河、中河、者湾河和大新河及十余条季节性河流,流域内最主要的土地利用方式是农田,多数居民沿河而居产生大量生活污水。杞麓湖流域工业企业多,主要分布在杞麓湖的南岸的秀山镇、杨广镇和北岸的纳古镇[16]。进入夏季,降雨量增多大量的化肥及生活污水经河流携带汇入湖中,绝大部分污染物滞留在湖内,造成湖泊生态系统循环失衡。

从监测时段内杞麓湖水温的变化特征来看,水温变化具有很强的季节性,随着季节变化也呈现出相应的变化。从图6中我们可以看出,与深水湖相比,水位很浅的杞麓湖在垂直剖面上并未出现明显水温分层现象。进入5月气温开始升高,垂直剖面上各监测点在1~2 m处水温略降低。表层水体与空气热量交换密切,温度的升高使表层水密度降低,出现微弱的重力分层,一定程度上阻碍了热量向下传递,如果出现无风、晴朗天气,水体垂直方向上就可能出现短暂的温度差异。杞麓湖湖盆西部较浅,东部较深,在浅水地区水体应更容易受风力扰动而容易发生混合,致使表层水温相比略低于湖心深水区域。根据对

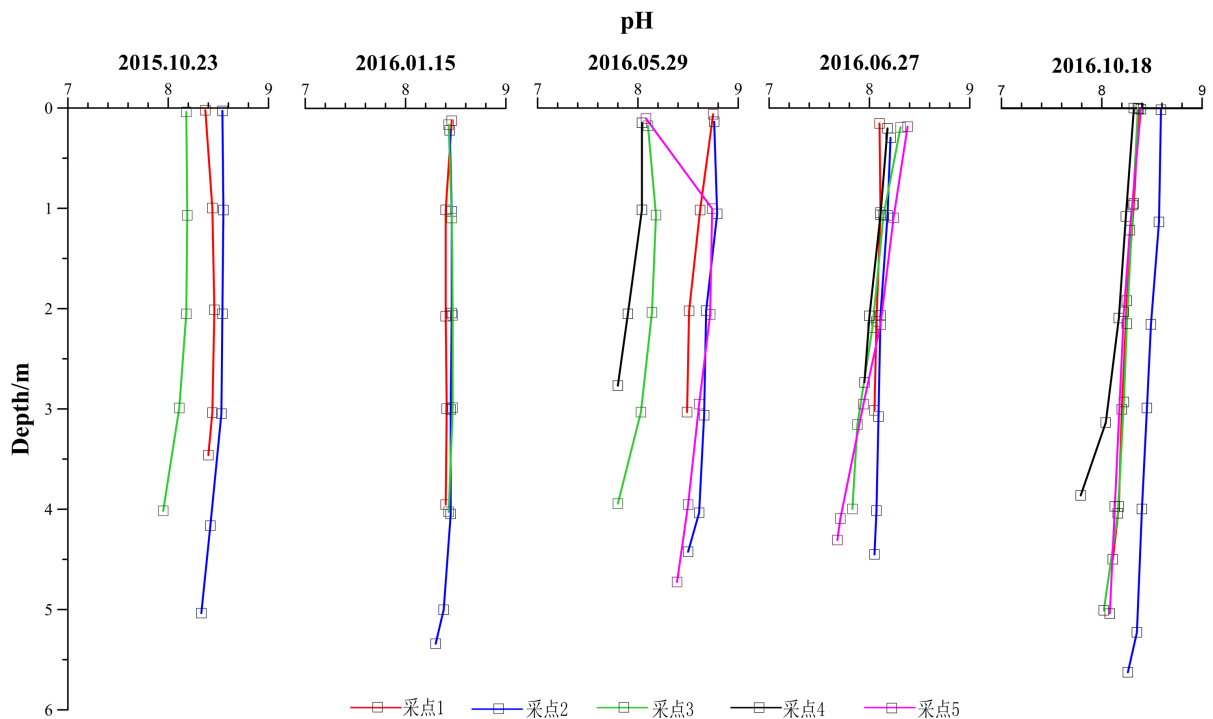


Figure 6. Seasonal variations of vertical pH in Lake Qilu

图6. 杞麓湖 pH 垂直季节变化

杞麓湖 5 月的监测数据来看, 水平空间上, 各点温度差异基本符合这一情况, 而在 6 月湖泊水平空间温度差异并不明显。

杞麓湖为典型高原浅水湖泊, 受人类活动强烈干扰, 湖泊面积不断缩小、水位断崖式下降, 蓄水量减少。由于湖水不存在温度分层现象, 热量在湖水中传递较为迅速, 因而水温受气温变化反应敏感, 温度变化不存在滞后现象, 这一点与云贵高原深水湖库变化特征存在一定差异。杞麓湖流域属中亚热带半湿润季风气候, 雨季降水引起的气温暂时性降低现象明显, 水汽的降落、蒸发使气温短时期降低, 因而监测时段内大范围降雨后出现气温低于水温的现象, 这一特征在 2015 年 10 月较为显著(图 7)。通海县气象站点位于县城西南端, 海拔高出湖面近 150 m, 盆地作用及海拔高度差是湖水温度略高于气象站点温度的主要原因。进入冬季, 气温的降低使湖泊所累积的热量不断散失, 湖泊作为热库对调节流域气候, 对维系周围地区适宜温度起到了至关重要的作用。湖泊面积的缩小, 蓄水量的减弱, 将使湖泊气候调节功能逐渐丧失, 对当地人民的生活环境产生重要影响。

杞麓湖旱季和雨季排水主要污染物浓度差异不大[17], 因而温度对湖泊水生生物生长具有决定作用。从表 1 中 5 月 TP、TN 监测数据可以看出, 这一时期杞麓湖水体 TP、TN 处于较高水平(尤其是 TP)。N、P 是浮游植物生长的必需元素, 杞麓湖的主要四条入湖河流(红旗河、中河、大新河、者湾河)均为 V 类, TN 与 TP 的现状年入湖量已经超出杞麓湖 V 类水的水环境承载能力[18]。杞麓湖西南部区域为流域内主要的蔬菜种植地和农庄的汇集区, 湖周的村庄大多与湖滨农业排涝区相连, 农业废水及生活污水直接通过泵站抽入湖泊[17]。对杞麓湖而言, 夏季降雨量增加, 大量的化肥经雨水冲刷随农田径流进入到杞麓湖中使水中 N、P 浓度不断增加。藻类生长的适宜水温条件为 20°C~30°C, 合适的水温促进藻类生长, 为夏季蓝藻爆发创造了有利条件[19]。在图 8 蓝绿藻细胞密度变化中可以看出, 藻类在 6 月大量繁殖。这与夏季到来温度升高、降水增加、农业排放集中相对应。

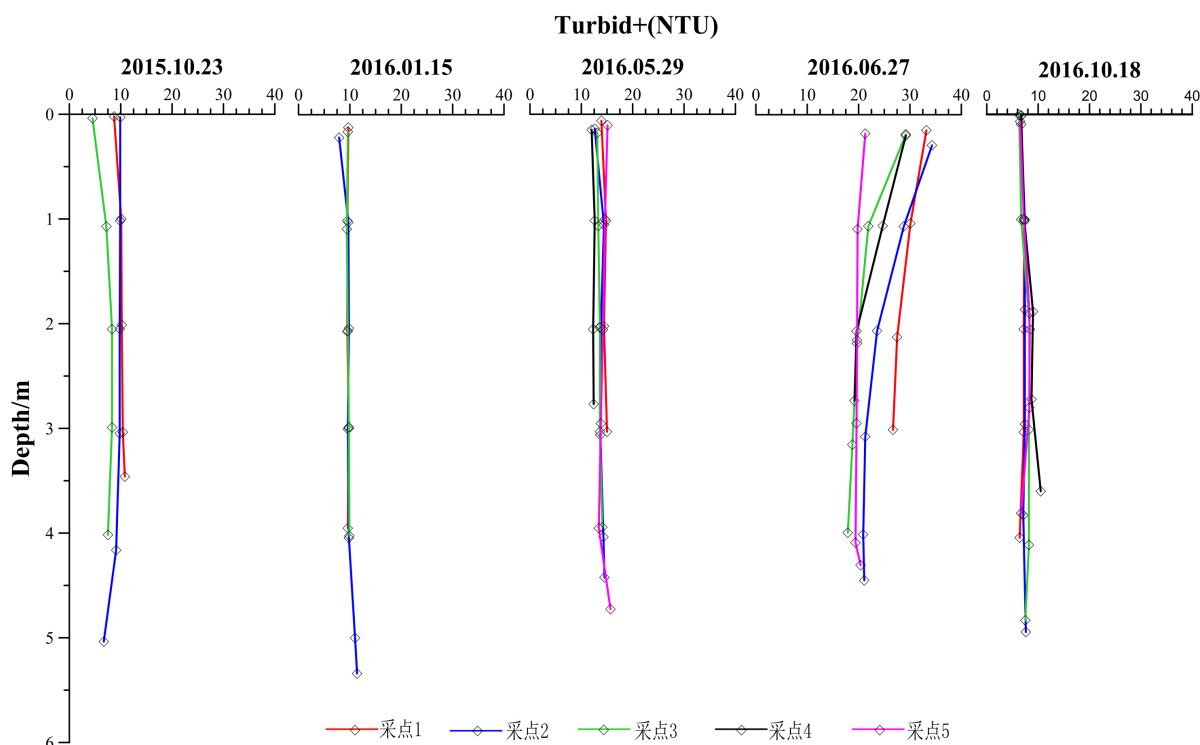


Figure 7. Seasonal variations of vertical turbidity in Lake Qilu

图 7. 杞麓湖浊度垂直季节变化

Table 1. Vertical monitoring datas of TP, TN in Lake Qilu May 29, 2016**表 1.** 2016 年 5 月 29 日杞麓湖 TP、TN 垂直监测数据

采样点	TP (mg/L)				
	0 m	1 m	2 m	3 m	4 m
1	0.615	0.519	0.688	0.572	0.645
3	0.552	0.630	0.654	0.611	0.526
4	0.547	0.517	0.610	0.549	-
采样点	TN (mg/L)				
	0 m	1 m	2 m	3 m	4 m
1	2.81	2.89	3.16	2.85	2.80
3	2.65	2.85	2.78	2.77	2.76
4	2.90	2.89	2.59	2.86	-

叶绿素 a 是浮游植物生物体的重要组成成分之一，在淡水湖泊中，影响 Chl-a 含量因素众多，如气象条件、水动力条件及营养盐等[15]。从四个月的监测结果来看，2015 年 10 月、2016 年 10 月各点差异不大、垂直变化趋势基本相同；1 月由于湖泊完全混合，浓度基本一致；5 月点 1 和点 4 叶绿素浓度变化较大整体偏高，点 1、点 4 靠近湖滨带是污染物的主要汇集区，N、P 和有机物等含量高会促进水生植物的快速生长，同时在适温范围内随着水温的升高，浮游植物的光合作用加强也会加速其生长使叶绿素 a 浓度升高。垂直剖面上，在监测时间段内整体上各监测点在 0~1 m 处叶绿素 a 浓度都有增加的趋势，这可能是由于光照强烈抑制表层水体浮游植物的生长。6 月各点差异相对较小，不同区域叶绿素浓度垂直变化较一致，除点 4 外，各点温度与叶绿素 a 浓度变化呈显著负相关($\alpha < 0.01$)，点 4 相关性较小($\alpha = 0.1$)也呈负相关关系，过高的温度或太阳辐射会使植物光合作用减弱，从而对浮游植物的生长繁殖产生抑制作用，这是夏季表层水体叶绿素 a 浓度随深度增加而增加的另一个原因。

水体溶解氧是水质重要指标之一，也是水体净化的重要因素之一。溶解氧高有利于水体中各类污染物的降解从而使水体较快得以净化，反之溶解氧低水体中污染物降解较慢。水体中的溶解氧主要来自水生植物的光合作用，其次是空气的溶氧。上层水体浮游植物光合作用以及水-气界面氧交换导致上层水体溶解氧含量升高，气压的变化也会导致氧气的溶解度高低变化。蓝藻大量暴发会消耗大量溶解氧，使水体透明度降低，某些藻类甚至产生有毒有害物质，影响其他水生生物的生长和繁殖，破坏水域生态系统的动态平衡[20]。在藻类大量繁殖的季节，水体表层因水生植物光合作用所产生的溶解氧过饱和，而深层水因藻类死亡好氧所致的缺氧状态是富营养化湖泊的典型征兆[21]。从图 5 可以看出整体上五个月份各点溶解氧随深度的增加有降低的趋势。1 月处于冬季，太阳辐射量减弱，气温低，湖水上下层充分混合，溶解氧含量普遍较高。5 月进入雨季，在温度升高与降水集中的条件下，藻类大量繁殖会遮盖在水体表面，降低了水气间的交换能力，同时阻碍了光线向下传播，影响水下植物光合作用。随着深度的增加藻类光合作用减弱，氧气浓度逐渐降低[22]。此外，底泥和悬浮物的好氧过程有机物降解和生物呼吸也会导致底层水体溶解氧大量消耗。低氧的环境在一定程度上会促进 P 的释放，进一步促进藻类的生长[23]。6 月整个水体溶解氧浓度水平低，在底层局部水体出现厌氧环境，这在湖滨处表现更为明显，笔者认为有机污染物的分解和底泥扩散消耗水体溶解氧是造成该现象的主要原因，藻类活动对水生植物光合作用的影响也是导致 6 月底层局部水体出现厌氧环境的另一因素。有机物的分解和水生植物光合作用的减弱以及水体的不完全混合，是造成 2015 年 10 月水体溶解氧分布特征的主要原因，从 2016 年 10 月溶解氧特征来看，该时段溶解氧浓度表现为典型的表层水体过饱和而底层水体处于厌氧的状态。由此可以判断

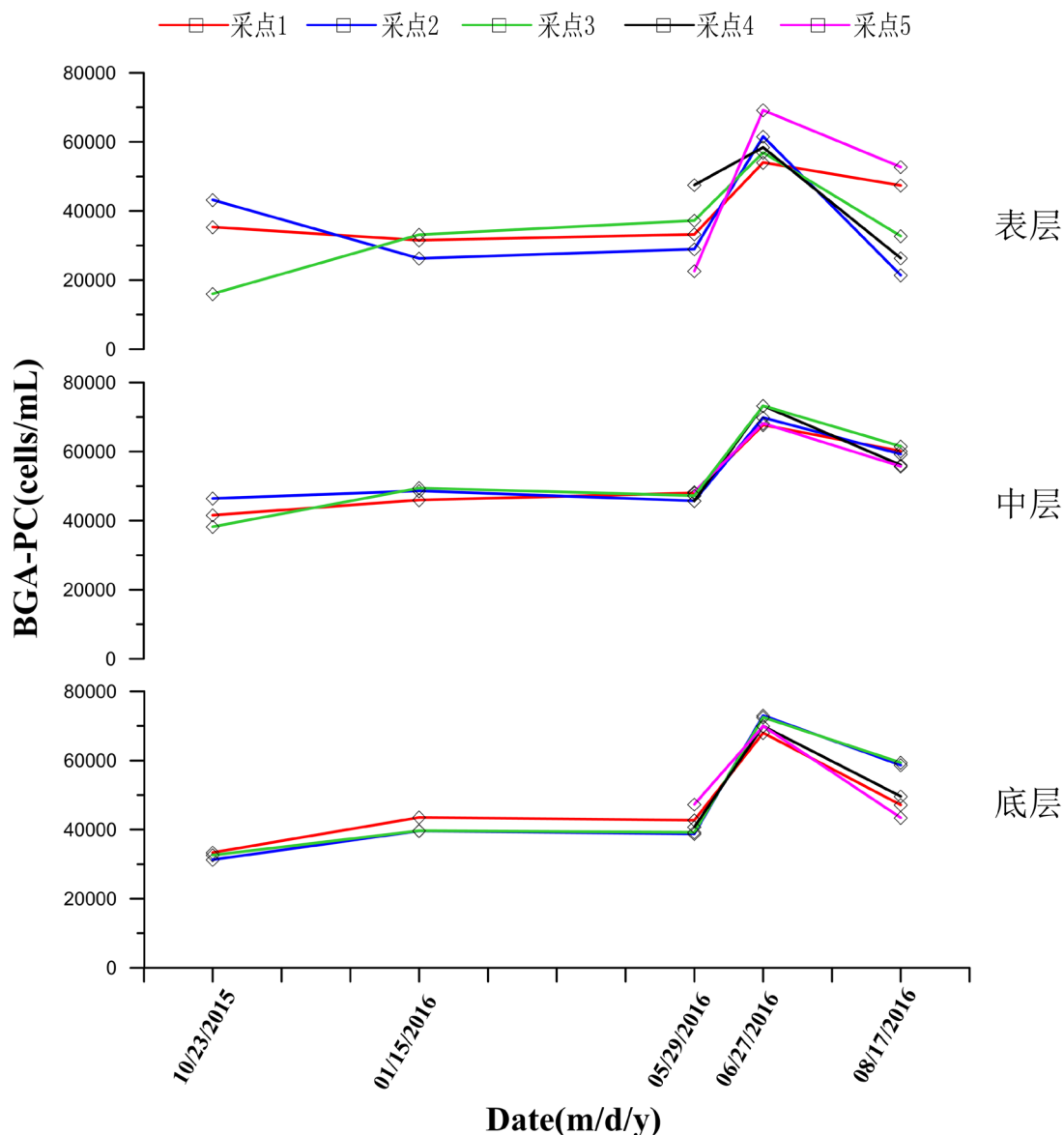


Figure 8. Seasonal variations of vertical BGA-PC in Lake Qilu

图 8. 杞麓湖藻蓝蛋白密度季节变化

自 2015 年 10 月至 2016 年 10 月为期一年监测时段内，由溶解氧所表征的湖泊水体水质处于不断恶化的状况。

pH 主要是与藻类生长过程中的光合作用以及有机物的有氧分解相关，与溶解氧关系密切。藻类光合作用会消耗水中 CO_2 使 pH 升高，水体 $\text{pH} > 8$ 时会促进蓝藻的生长，杞麓湖是典型的蓝-绿藻型湖泊，优势类群为蓝藻门[24] [25]。从图 6 中可以看出 5 月各监测点 pH 值差异较大，东部湖区高于西南部湖区，可能是由于 5 月西岸、南岸农业生产区向湖泊中排放的污染物增多，有机污染物的分解使湖区水体 pH 降低。杞麓湖湖水 pH 值在监测的时段内均呈现碱性，水体表层各监测点 pH 均达到 8 以上。垂直剖面上，各监测点 pH 随着深度的增加逐渐降低，这与水生生物死亡后沉底腐烂分解有关。在监测时段内，水体 pH 与溶解氧浓度具有较高相关性($\alpha < 0.1$)，在 5 月、6 月呈显著正相关($\alpha < 0.01$)。张军莉等[17]研究表明，除富营养化之外，有机污染也是造成杞麓湖水水质恶化的重要因素。大量有机污染物的输入、沉淀以及分

解是导致杞麓湖底层水体溶解氧大量消耗、pH 降低的主要原因，表层水体则受藻类光合作用 pH 处于较高的水平，这一现象在 2016 年 5 月、6 月、10 月监测数据中表现更为明显。与 2015 年 10 月监测数据对比可以看出，2016 年 10 月湖泊表层水体 pH 高于前一年水平，而随着水深增加 pH 降低幅度也较为明显，说明藻类活动强度、有机物的分解不断增加，水质变差，除此之外，底泥中 P 的释放与底泥中有机物的分解会随温度的升高加速，温度变化对水体 pH 也有一定影响。

浊度是对水中含有悬浮及胶体状态颗粒导致水体产生浑浊的现象的描述。对于杞麓湖而言，水体中浊度的变化与水中藻类的数量和容纳的污染物含量有密切关系。从 4 个月的监测数据来看随着气温的回升浊度开始变大，浊度变化较大在 6 月，杞麓湖各监测点浊度差异较明显且随着深度的增加浊度差异变小。藻类爆发与农业污染的加剧是浊度变化的主要原因，除此之外，湖水扰动底泥的释放也可能致使水体浊度增加。

王庭键[26]等研究表明，好氧环境会抑制磷的释放，而在厌氧环境下则会促进底泥中磷的释放。吴献花[27]等通过对杞麓湖表层底泥营养盐分析得出，杞麓湖表层底质污染严重，全部为严重污染状态，冬季高于夏季。由于温度低、溶解氧浓度较高、藻类、浮游植物等生物活性低，加之人类活动相较夏季有所减弱，冬季营养盐更易于沉积而不易扩散，外源输入的污染物更多沉积于湖底，因而底质污染较夏季严重，而水质好于夏季。夏季低溶解氧、水生生物及人类活动等因素，外源输入增大同时又会促进底泥的释放，使水体浊度上升。根据表 1 数据得出，各点 TN 平均浓度约为 2.83 mg/L、TP 平均浓度约为 0.60 mg/L，氮磷比为 4.7:1，各点表层、底层水体氮磷浓度没有明显差异，较大值多出现在中层水体，说明底泥释放对湖泊营养盐浓度产生一定作用，但不是影响湖水 TN、TP 浓度变化的关键因子。

4. 结论

杞麓湖作为高原浅水湖泊，湖泊水温不存在季节性分层现象。水温随气温变化基本同步，盆地作用及气象站点与湖面的海拔高度差是导致湖泊温度在夏秋季节略高于气温的主要原因，降水对气温短时期的影响也较为显著。杞麓湖冬季的热源效应较为明显，对稳定区域气候具有重要意义。同时，水温是控制杞麓湖水生生物生长繁殖的主要因素，受水温变化的影响，藻类爆发多集中于每年 6 月。藻类的大量繁殖是水温升高、降水增加及人类活动的共同结果。

杞麓湖水体 TN、TP 均处较高水平，属中度 - 重度富营养化，其中 TN 是藻类生长的控制因子。水体溶解氧、pH 的季节与空间变化与湖泊有机污染之间存在一定关系。有机污染物的有氧分解消耗水体中的溶解氧，使湖泊活性减弱、自净能力丧失，同时影响水体酸碱性质的变化。pH 的变化使水生生物生长、湖泊溶氧、底泥的释放等情况发生改变，有机污染物的持续输入是致使湖泊水质长期处于较差水平的主要原因。另一方面，夏季藻类的大量繁殖一定程度上抑制了沉水植物的光合作用，从而对水体产生不利影响。

杞麓湖西南部湖区是农业生产用水排放的集中区域，污水的集中排放致使湖泊水体水平空间差异增大。杞麓湖水体冬季完全混合，水质参数没有明显差异，水质状况更利于营养盐的沉积，而夏季水质状况更利于底泥的释放与扩散，底泥扩散是引起湖泊水质变差的又一原因。监测时段内湖泊水体水质处于恶化阶段，富营养化加剧，人类活动的不断增强使当地生态环境面临巨大的挑战。杞麓湖的保护与治理不仅关系到流域内用水需要，也关联着南盘江上游的水安全问题，采取相应措施处理污水排放、改善水质刻不容缓。

参考文献 (References)

- [1] 史正涛, 明庆忠, 张虎才. 云南高原典型湖泊现代过程及环境演变研究进展[J]. 云南地理环境研究, 2005, 17(1): 24-26.

- [2] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 21-384.
- [3] 王斌, 马健, 王银亚, 尹湘江. 天山天池水体季节性分层特征[J]. 湖泊科学, 2015, 27(6): 1997-1204.
- [4] 张虎才. 滇池构造漏水隐患及水安全[J]. 地球科学进展, 2016, 31(8): 849-857.
- [5] 张云鹰, 谢曼平, 刘姗姗, 等. 抚仙湖和星云湖水质变化趋势分析[J]. 地理科学研究, 2015(4): 81-94.
- [6] 师琼. 杞麓湖水质变化分析及保护对策探讨[J]. 人民珠江, 2012, 33(3): 45-47.
- [7] 王建云, 王云华. 星云湖、杞麓湖污染特征与产业结构关联的思考[J]. 环境科学导刊, 2010, 29(6): 35-38.
- [8] 刘阳, 吴钢, 高正文. 云南省抚仙湖和杞麓湖流域土地利用变化对水质的影响[J]. 生态学杂志, 2008, 27(3): 447-453.
- [9] 刘宇, 祁云宽, 刘绍俊, 等. 杞麓湖流域点源污染分析及控制策略[J]. 环境科学导刊, 2016(1): 26-30.
- [10] 杨磊, 常凤琴. 近代以来杞麓湖流域气候变化与人类活动的湖泊沉积记录研究[J]. 城市地理, 2015(18): 247.
- [11] 张东帅, 靳菡. 杞麓湖表层沉积物磷形态的分布特征[J]. 科技创新导报, 2011(31): 151-152.
- [12] 秦洁, 吴献花, 高卫国, 杨世华, 王泉, 罗维佳. 杞麓湖叶绿素 a 与水质因子时空分布特征及相关性研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(1): 345-348.
- [13] 文新宇, 张虎才, 常凤琴, 等. 泸沽湖水体垂直断面季节性分层[J]. 地球科学进展, 2016, 31(8): 858-869.
- [14] 董云仙, 赵磊, 陈异晖, 等. 云南九大高原湖泊的演变与生态安全调控[J]. 生态经济, 2015, 31(1): 185-191.
- [15] 董云仙, 刘宇, 李荫玺, 等. 云南杞麓湖生态脆弱因素分析[J]. 环境科学导刊, 2011, 30(5): 24-29.
- [16] 王建云, 王云华. 星云湖、杞麓湖磷污染来源比较[J]. 环境科学导刊, 2007, 26(3): 8-10.
- [17] 张军莉, 赵磊, 赵琳娜, 谭志卫, 王俊松, 李转寿. 杞麓湖湖滨带农田排涝区农田排水入湖污染负荷研究[J]. 环境科学导刊, 2013, 32(1): 33-34.
- [18] 许杰玉, 赵晓飞, 吕春英, 等. 高原湖泊流域水环境特征与污染防治综合整治研究[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(3): 49-52.
- [19] 王震, 邹华, 杨桂军, 张虎军, 庄严. 太湖叶绿素 a 的时空分布特征及其与环境因子的相关关系[J]. 湖泊科学 2014, 26(4): 567-575.
- [20] 马腾飞. 蓝藻水华暴发对水质参数变化趋势的影响[J]. 广东水利水电, 2013(A01): 54-57.
- [21] 金相灿, 朱萱. 我国主要湖泊和水库水体的营养特征及其变化[J]. 环境科学研究, 1991(1): 11-20.
- [22] 马建薇, 刘俊良, 李燕, 等. 物理因素对白洋淀溶解氧的影响[J]. 中国农村水利水电, 2013(8): 21-24.
- [23] 成晓奕, 李慧赟, 戴淑君. 天目湖沙河水库溶解氧分层的季节变化及其对水环境影响的模拟[J]. 湖泊科学, 2013, 25(6): 818-826.
- [24] 秦洁, 吴献花, 高卫国. 杞麓湖富营养化控制因子研究[J]. 玉溪师范学院学报, 2010, 26(12): 26-30.
- [25] An, K.G. and Jones, J.R. (2000) Factor Regulating Blue-Green Dominance in a Reservoir Directly Influenced by the Asian Monsoon. *Hydrobiologia*, **432**, 37-48. <https://doi.org/10.1023/A:1004077220519>
- [26] 王庭健, 苏睿, 金相灿, 等. 城市富营养湖泊沉积物中磷负荷及其释放对水质的影响[J]. 环境科学研究, 1994, 7(4): 12-19.
- [27] 吴献花, 秦洁, 吴斌, 赵斌, 王泉, 郭红, 等. 杞麓湖表层底质营养盐的时空分布特征及评价[J]. 环境工程技术学报, 2012, 2(4): 296-302.

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