

The Analysis of Water Quality Change Trend for Lake Fuxian & Lake Xingyun

Yunying Zhang^{1,2,3}, Manping Xie^{1,2,3}, Shanshan Liu^{1,2,3}, Huayong Li^{1,2,3}, Lizeng Duan^{1,2,3}

¹College of Tourism & Geography Science, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

²Key Laboratory of Plateau Lake Ecology & Global Change, Kunming Yunnan

³Yunnan Provincial Key Laboratory of Geographical Process & Environmental Change on the Plateau, Kunming Yunnan

Email: eagle21@126.com, formelody@126.com, shanshan7737@163.com, Lihuayong2010@hotmail.com, duanlizeng00@163.com

Received: Jul. 13th, 2015; accepted: Jul. 30th, 2015; published: Aug. 6th, 2015

Copyright © 2015 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

Abstract

The domestic written research on water environment of Lake Fuxian & Lake Xingyun has begun since 1963. But after 2008, the research on Lake Fuxian & Lake Xingyun is almost blank, and the research on the linkage mechanism between the two lakes is also insufficient. Based on the meteorological data from 1957 to 2009 and on the water quality parameters, this paper analyses the situation of lakes in response to global climate change, at the same time explores the mechanism of influence and its spatial difference. It is found that in nearly half a century, the temperature fluctuations increase markedly, and the precipitation fluctuation decline slightly. Compared with summer, the two lakes have more sensitive response to global climate change in winter. Lake Fuxian & Lake Xingyun of Yunnan plateau are developing in the direction unfavorable to a virtuous cycle; Lake Fuxian & Lake Xingyun both have spatio-temporal heterogeneity and areas less affected by human activity. The water quality is relatively good, and the water quality on the east side of Lake Xingyun is better than that in the west; almost all the indicators of Lake Xingyun are higher than those of Lake Fuxian. The conductivity (Spcond) of Lake Xingyun is about twice of Lake Fuxian. The Cynobacteria of Lake Xingyun is about 21 times of Lake Fuxian. However, the PH values of Lake Fuxian & Lake Xingyun are both on the high side.

Keywords

Lake Fuxian, Lake Xingyun, Water Quality Change Trend

抚仙湖和星云湖水质变化趋势分析

张云鹰^{1,2,3}, 谢曼平^{1,2,3}, 刘姗姗^{1,2,3}, 李华勇^{1,2,3}, 段立曾^{1,2,3}

¹云南师范大学旅游与地理科学学院, 云南 昆明

²高原湖泊生态与全球变化重点实验室, 云南 昆明

³高原地理过程与环境云南省重点实验室, 云南 昆明

Email: eagle21@126.com, formelody@126.com, shanshan7737@163.com, Lihuayong2010@hotmail.com, duanlizeng00@163.com

收稿日期: 2015年7月13日; 录用日期: 2015年7月30日; 发布日期: 2015年8月6日

摘要

国内有关抚仙湖及星云湖的水环境指标的成文调查研究始于1963年。但2008年抚仙湖—星云湖倒流之后的研究几乎空白, 对两湖联动机制研究也较少。本文结合1957~2009年的气象数据和两湖水质参数, 分析湖泊对全球气候变化的响应, 同时探究两者联动影响机制及其空间差异。发现近半个世纪以来, 温度有明显的波动上升, 降水量有轻微的波动下降趋势, 相比夏季, 冬季对全球气候的变化有更敏感的响应, 云南高原湖泊的抚仙湖和星云湖正向着不利于湖泊良性循环的方向发展; 抚仙湖和星云湖均存在时空异质性, 受人类活动比较小的地区, 水质较好, 星云湖东岸水质好于西岸水质; 在各项指标中, 星云湖几乎均高于抚仙湖, 其中, 星云湖的电导率(Spcond)约是抚仙湖的2倍, 星云湖的藻蓝蛋白约是抚仙湖的21倍, 但抚仙湖和星云湖的PH值均偏高。

关键词

抚仙湖, 星云湖, 水质变化趋势

1. 引言

湖泊是陆地表面具有一定规模的天然洼地和蓄水体系, 是湖盆、湖水以及水生生态系统组合而成的自然综合体, 其生态环境受流域过程和社会经济发展的强烈影响, 因而湖泊的物理、化学及生物过程对流域开发、污染物排放、渔业捕捞等人类活动影响十分敏感[1]。地质构造运动在湖泊演化中的作用是长尺度的, 它控制了湖泊演化的格局。而气候条件对湖泊的塑造更为直接, 在气候的诸要素中, 降水量与温度对湖泊的影响最为显著[2]。高原湖泊是云南地区特殊的自然综合体, 为云南社会经济发展提供重要的自然资源和环境基础。但是云贵高原湖泊的入流水系普遍较少、水量偏少、换水周期较长, 湖岸较陡且滩地不太发育, 所以水生生态系统比较脆弱[3]。近年来, 由于经济和社会的高速发展, 加之对湖泊资源的不合理利用和开发, 导致湖泊演化的速度加快、湖泊功能急剧退化。20世纪80年代以来, 国内外相继开展的以水体水质和生态系统健康为主的湖泊与流域监测工作主要集中在美国、加拿大、澳大利亚等地区[4]-[6]。国内开展的流域尺度的研究, 主要集中在长江中下游地区[7]。与我国其他区域相比, 云南高原湖泊资料的深度和精度均显不足。

抚仙湖和星云湖位于滇中地区江川盆地东部, 属典型的北亚热带湿润高原季风气候, 四季温差小、干湿季分明, 年降雨量偏少且分布不均, 80%以上降雨集中在5~10月, 根据1957~2009年的气象数据统计, 多年平均气温约为18.4℃。属于典型的半封闭高原淡水湖泊, 由断层陷落形成, 属珠江流域西江水

系, 径流面积达 1053 km², 两湖由隔河相连, 构成一个相连湖泊的微生态系统, 对调节滇中气候影响非常大。据江川县县志记载, 从抚仙湖南岸、星云湖东岸的路居光坟头、麦冲螺蛳山发现的代表古湖岸线遗址的螺蛳壳层高度分析, 在湖盆发育最盛时期, 抚仙湖、星云湖、杞麓湖三湖为连通的古抚仙大湖。到第四纪, 南北向断裂活动, 地壳沿断裂沉陷使抚仙大湖解体, 形成了现在的抚仙湖和星云湖[8]。2004 年 4~5 月, 在国家自然科学基金、云南省自然科学基金和中科院南京地理与湖泊研究所“百人计划”共同资助下, 云南师范大学和中国科学院南京地理与湖泊研究所的研究人员对云南高原 7 个代表性湖泊和湖区地貌环境进行系统考察并钻探取样时, 在界鱼石附近观音寺和龙门发现了螺壳层, 进一步说明星云湖、抚仙湖曾经在高湖面期自然相连[9]。

国内有关抚仙湖及星云湖的水环境指标的成文调查研究最早见于 1963 年[10]。但是对 2008 年抚仙湖 - 星云湖倒流之后的研究几乎空白, 对两湖的整体研究也较少, 且缺乏电导率的测定[11]。因此, 进一步收集相关湖泊资料数据, 探究水质变化规律变得尤为重要。

抚仙湖、星云湖是云南九大高原湖泊中的一对“姊妹湖”。两湖通过 2 公里长的隔河相连, 水质相互影响。自本世纪初, 由于星云湖水质下降, 2003 年 10 月底, 实施了“星云湖 - 抚仙湖出流改道”工程。2007 年 12 月 23 日竣工。2008 年 5 月 20 日, 江川县隔河开闸放水, 抚仙湖水改变千古流向倒流进星云湖, 从此截断了星云湖每年排向抚仙湖的 4000 多万立方米劣质水, 为保护抚仙湖、有效治理星云湖奠定了坚实基础[12]。本文结合 1957~2009 年的气象数据和两湖水质参数, 分析湖泊对全球气候变化的响应, 同时探究两者联动影响机制及其空间差异, 对星云湖湖泊生态修复与抚仙湖水质保护乃至两个湖泊流域有效的管理具有重要的意义。

2. 研究区概况

抚仙湖(24°21'~24°38'N, 102°49'~102°57'E)位于云南省江川盆地东部, 澄江、江川、华宁 3 县境内, 是半封闭的高原深水湖泊, 呈南北向葫芦状, 为云南省九大高原湖泊中的贫营养型湖泊之一, 水质虽然综合评价为 I 类(见图 1), 但在沿岸旅游景点附近水域, 水质已下降到 II~III 类。抚仙湖是中国目前已知的第二深水湖泊, 面积 211 km², 最大水深 151 m, 平均水深 87 m, 总容积 189.3 亿 m³, 占云南省淡水储量的 60% 以上。年平均降水量 879.1 mm, 盛行南风 and 西南风, 最大风速 28 m/s, 多集中在 2~4 月。年平均水温 17.3℃, 湖水矿化度 238.99 mg/L, 属重碳酸盐类钙组 I 型。湖盆为一左旋拉张断裂控制的地堑式断陷盆地, 在早更新世以前形成[2]。主要功能为农业灌溉、旅游业、水产养殖和周围生活用水。由于附近无大型工业, 城镇人口不多, 主要污染源为农业面源和旅游业污染, 且自净能力强, 所以抚仙湖的水质变化较小, 比较稳定[13]。

星云湖(24°17'~24°23'N, 102°45'~102°48'E)位于云南省江川盆地东部, 属古抚仙湖的一部分, 为高原断陷型浅水湖, 湖面高程 1722 m, 水域面积 34.71 km², 最大水深 11 m, 平均水深 5.3 m, 总容积 1.84 亿 m³, 为南北向不规则椭圆形, 南北长 10.5 km, 东西平均宽度为 3.8 km, 湖岸线长 36.3 km, 主要入湖河流有东西大河、螺蛳铺河、渔村河、大庄河、海浒河等 14 条季节性河流。其水源主要来自雨水聚积, 并纳东河、西河等诸溪水流。周围多温泉。年平均降水量 947 mm, 80% 集中在 5~10 月, 夏季平均水温约 20℃, 冬季平均水温约 10℃, 湖水矿化度 331.83 mg/L [2]。从历史监测资料来看, 1982 年星云湖水质为 I-II 类, 1995 年湖水已严重退化到了国家地面水质标准的 IV 类, 严重地段已接近 V 类, 2000 年湖水已为劣 V 类。

3. 材料与方法

3.1. 数据来源

2012 年 6 月~11 月对抚仙湖和星云湖进行了表层水质监测。用于测量的仪器是美国维赛 YSI 6600V 多参数水质监测仪。采样时先在 Google Earth 上标定采样位置(见图 2), 量出经纬度, 然后使用“麦哲伦”

GPS2000XL 卫星导航仪到实地确定采样点位置,再利用 YSI 进行现场测定其水温、PH、溶解氧、电导率、浊度等参数。采样点的布置既考虑了湖泊的不同部位,也考虑了湖湾、开阔湖滨、河流入口和污水净化湿地带等不同湖泊地理单元,以保证各采样点具有较好的代表性。本研究用到的气象数据资料来源于云南省环科院孔德平博士,其中气象数据包括月均温、月降水量、月最高气温、月最低气温、平均风速、日照时数等气象参数。

3.2. 数据处理与方法

本文数据采用 Excel 和 Grapher 等软件进行统计分析。气象数据的采用过程中,直接用逐月气象数据求算 1957~2009 年研究区附近的逐年平均气温、年平均降水量、年平均风速、年平均日照时数、季节性温度、季节性降水、季节性风速、季节性日照时数。由于考虑到本区处于低纬度高海拔地区,春秋季节不明显,所以本文将该区的气候简单分为冬季和夏季,其中夏季为 5~10 月,冬季为 11 月到次年 4 月。水质数据的采用过程中,去除了最大值和最小值,并将其他数据加权平均,以减小误差。水质评价方法是根据国家《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中功能分类标准,结合评价单元的环境状况和水域保护目标,并将其中水质劣于 V 类的划分为 VI 类,地面水环境质量共分为 6 个级别,各评价项目环境质量级别标准与国家标准相同。标准中的评价方法是单因子评价法(最差的项目赋全权,又称一票否决法),具体评价过程是分别采用单项参数代表值,跟水质评价标准直接对比来判定水类型[14]-[18]。营养级的评价,首先采用相崎守弘湖泊营养程度评分标准对各监测点进行评分(保留两位小数),然后再采用卡森指数法进行分级(见表 1)。

4. 结果与分析

4.1. 气象数据分析

4.1.1. 气温变化

在过去的 52 a 内,所选取的江城气象站点记录的年平均气温、年平均最高气温、年平均最低气温都表现为持续波动上升(见图 3),上升速率分别为 $0.329^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$, $0.237^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$, $0.398^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$,其中年平均最低气温的上升速率约是年平均最高气温上升速率的 1.7 倍。

流域温度季节性变化特征明显(见图 4),夏季温度和冬季温度在过去 52 a 内增幅分别是 $0.317^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 和 $0.34^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$,冬季增温速率是夏季增温速率的 1.07 倍。

因为最低气温出现在冬季,最高气温出现在夏季,所以(a)、(b)两幅图虽然指标不同,但却反应相同的事实。同时也反映出,虽然不同季节增温速率不一样,但都表现为波动上升的增温趋势。

Table 1. Carson index

表 1. 卡森指数法

分数	营养级
0~35 分	贫营养
36~45 分	贫中营养
46~55 分	中营养
56~65 分	中富营养
66~75 分	富营养
76~85 分	重富营养
86~95 分	严重富营养
96~100 分	异常富营养

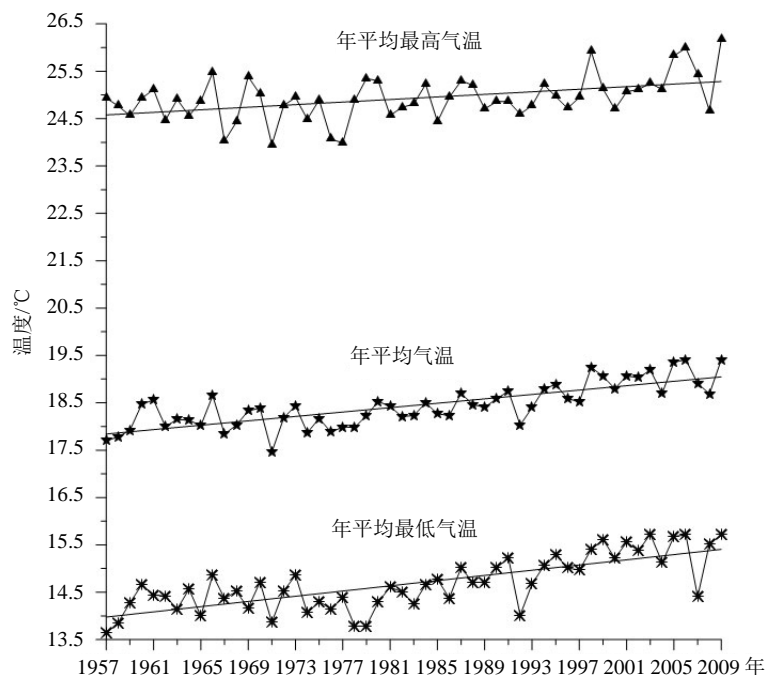


Figure 3. The annual maximum & minimum temp

图 3. 年平均气温和年平均最高、最低气温

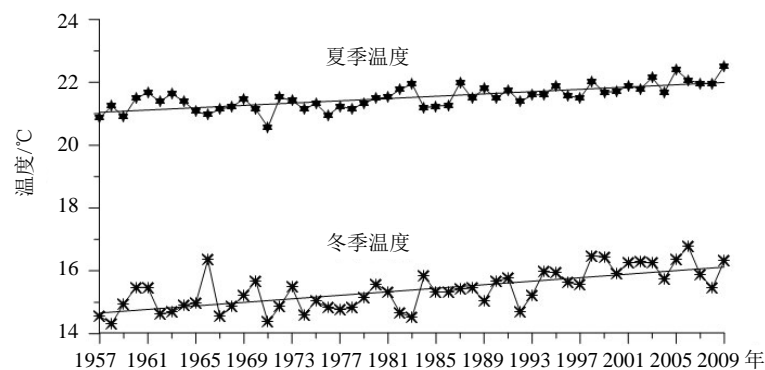


Figure 4. The seasonal temp

图 4. 季节性温度

4.1.2. 降水量变化

在降水(图 5)的分配上,该流域降水量的季节性分异明显,夏季降水量和冬季降水量虽然波动但下降趋势不是很明显,分别以 $1.79 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$, $3.13 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 的速率下降,冬季降水量下降速率是夏季降水量下降速率的 1.75 倍,冬季降水量波动周期约为 3 a,夏季降水量波动周期约为 11 a。

4.1.3. 小结

通过图 3~5 的比较以及从图 6 和图 7 中我们可以发现,在这 52 a 的研究尺度上,温度表现为明显的波动上升,降水量表现为轻微的波动下降趋势,这与全球气候变暖的背景一致。且相比夏季,冬季对全球气候的变化有更敏感的反应。这种气候的变化势必会影响湖泊的生态环境,温度升高,有利于更多的生物生存,蒸散作用也会加强;而降雨量减少则代表着湖泊输入水量减少。总体来看,代表云南高原湖泊的抚仙湖和星云湖正向着不利于湖泊良性循环的方向发展。

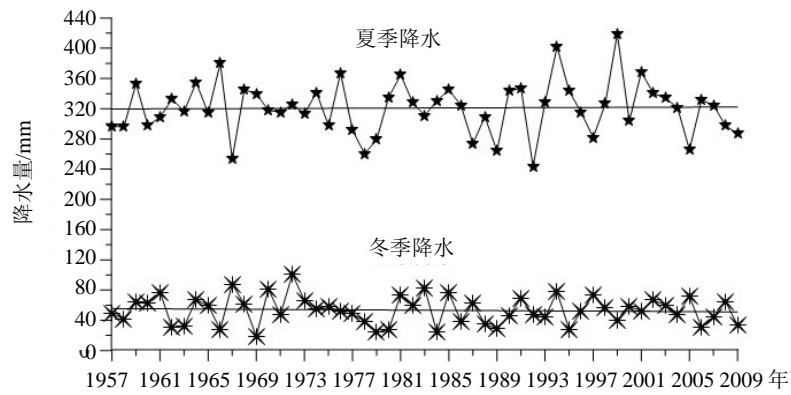


Figure 5. The seasonal rainfall

图 5. 季节性降水

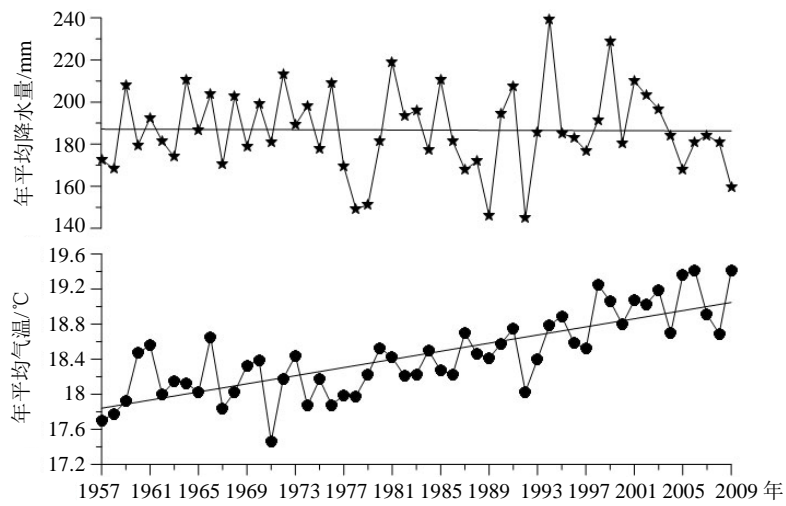


Figure 6. The annual average meteorological data of 1957a-2009a

图 6. 1957~2009 年平均气象数据

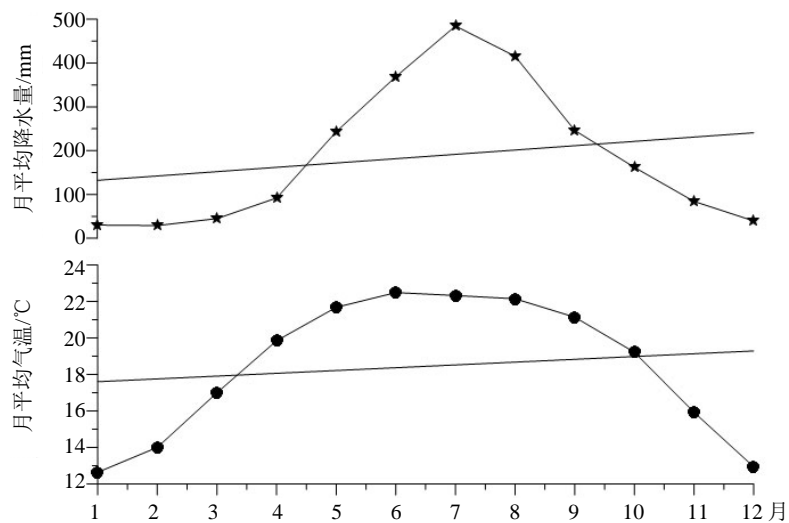


Figure 7. The monthly average meteorological data of 1957a-2009a

图 7. 1957~2009 年月平均气象数据

4.2. 水质数据分析

4.2.1. 溶解氧变化

与其他参数相比,溶解氧更能反映水生生态系统中新陈代谢的情况。溶解氧浓度反映了大气溶解与植物光合作用放氧过程和生物呼吸作用好氧过程之间的暂时平衡。较低的 DO 水平不仅影响鱼类和无脊椎动物的分布与生长,而且还会通过影响氧化还原电位进而影响磷和其他无机营养盐、有毒痕量金属的溶解度。DO 的溶解度随着水体盐度和温度的上升而下降。全球变暖会降低 DO 的溶解度以及增加呼吸效率,从而导致湖泊的下层、湿地和低位河流(接纳了大量来自城镇和湿地的有机物)呈现厌氧状态。厌氧状态也会改变浮游与底栖食物网结构,这一点需要几个月甚至几年才能体现出来,但研究者通常很少关注这一点,也很少考虑其机制[19]。

从图 8(a)和图 9(a)中可以看出,抚仙湖和星云湖各监测点 10 月比 8 月的 DO 高,这可能是由于 8 月

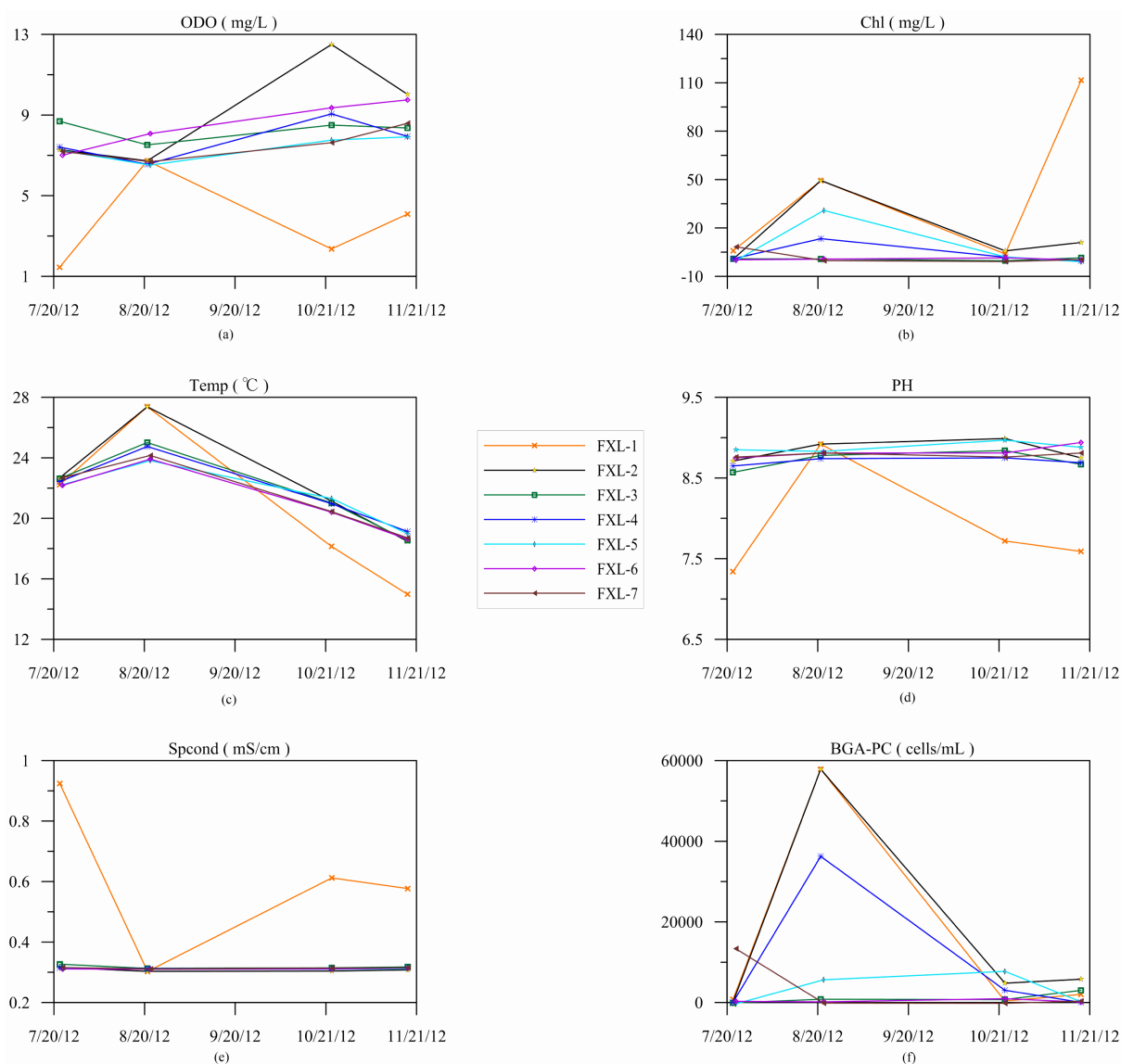


Figure 8. The surface water datum of Lake Fuxian

图 8. 抚仙湖表层水质数据

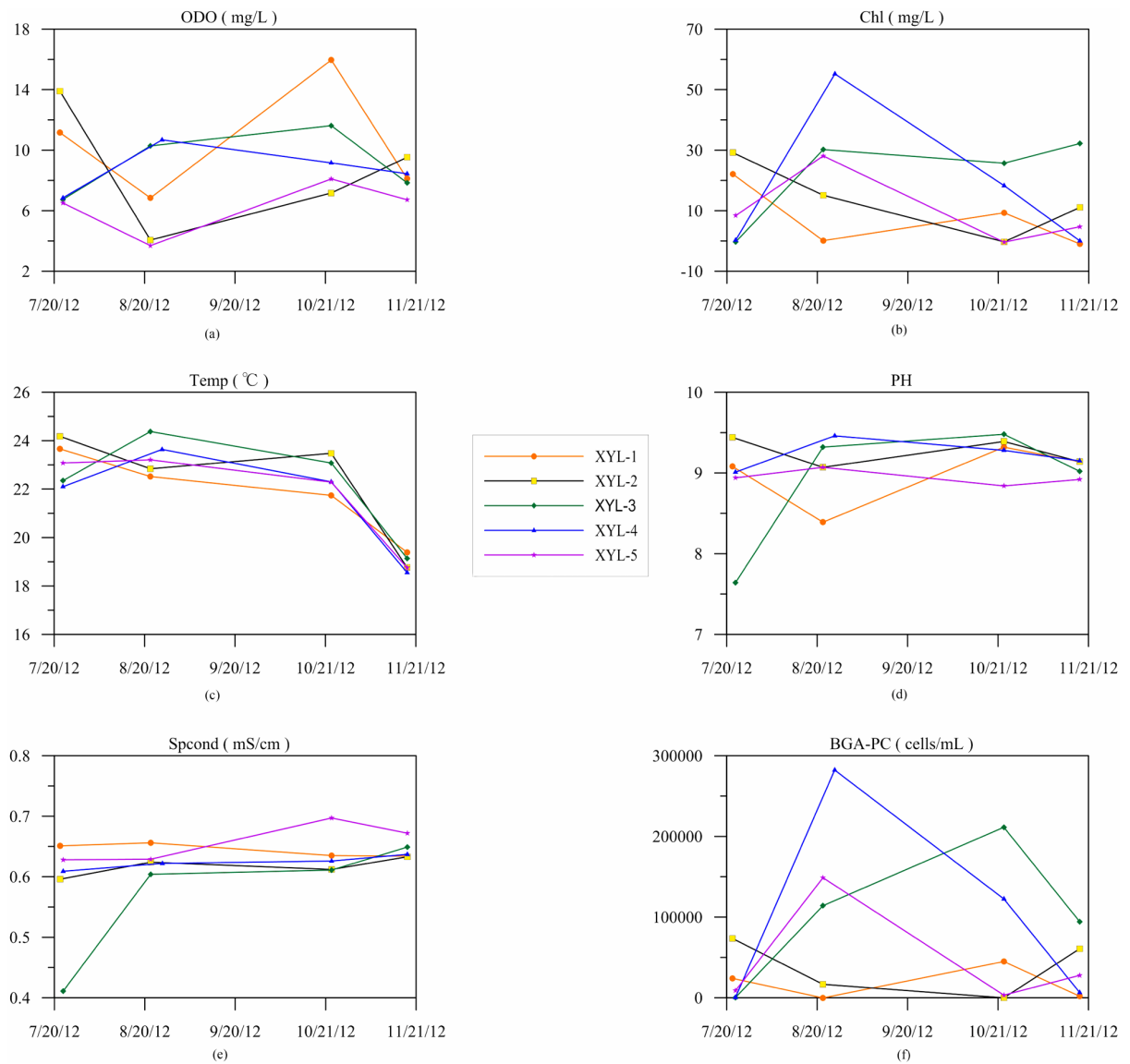


Figure 9. The surface water datum of Lake Xingyun

图 9. 星云湖表层水质数据

温度比 10 月高，温度越高溶解氧越低。除 FXL-1 外，抚仙湖各监测点的 DO 比星云湖各监测点的 DO 稳定，星云湖总体 DO 比抚仙湖的高，这可能是由于星云湖大量藻类的光合作用导致。FXL-1 比其他各监测点的 DO 都低，因为 FXL-1 中有大量亚硝化细菌和硝化细菌，其在反应过程中需要消耗大量溶解氧。因为 FXL-2 采样时是在抚仙湖一个水湾处测得，岸边有水草，底质肥厚，其水量随季节性有无，与抚仙湖为两种不同的生态系统，所以除 FXL-1 外，其 DO 的变化比抚仙湖其他各监测点的 DO 变化大一些。

4.2.2. 叶绿素变化

叶绿素是衡量湖水营养状态等级的指标之一。从图 8(b)和图 9(b)中可以看出，抚仙湖 7 月、10 月和 11 月各监测点的 Chla 含量相差不大，8 月各监测点 Chla 的含量相差比较大。星云湖这四个月中各监测点的 Chla 都有差异，但 8 月尤其明显。这可能是由于 8 月温度较高，有利于植物的生长，在抚仙湖各监测点中，有沉水植物的地方 Chla 的含量就较高；在星云湖各监测点中，有水葫芦和水白菜的地点，其长

势好, 吸收 N、P 等营养元素比较多, 所以此地藻类长势比其他地方弱一些, 其 Chla 含量就比其他地方低。

从抚仙湖纵剖面(图 10)中可以看出, 抚仙湖水中的 Chla 含量随水深的增加而增加, 这可能是因为抚仙湖中表层浮游动物捕食浮游植物的结果, 越往下浮游生物越少, 所以叶绿素越多。但在 5 m~6 m 时出现一个转折, 可能是因为该处浮游生物的因素, 也可能是仪器误差的原因。具体原因尚不清楚, 还有待于进一步的研究。

4.2.3. 水温变化

从抚仙湖(图 8(c))和星云湖(图 9(c))的表层水质数据中可以看出, 抚仙湖和星云湖各监测点的水温随季节的变化比较明显且基本同步, 但存在水平不均匀性。在垂直纵剖面(图 10)上表现出垂直递减的现象, 前一米的水温变化比较大, 约为 $0.47^{\circ}\text{C}/\text{m}$, 后面的水温变化速率基本相同, 约为 $0.04^{\circ}\text{C}/\text{m}$, 一米以浅的水温变化速率约是一米以下水温变化速率的 12 倍, 这可能是因为湖上层水与空气相同, 所以极易发生波动。FXL-1 采样点的水温相比其他地点更敏感些, 可能是因为该地为抚仙湖的污水处理厂的人工湿地, 水比较浅, 所以对季节的变化更为敏感些。

虽然我们只测了四个月的数据, 但不难发现水温对气温的响应非常敏感, 所以气温在增加的时候, 水温必定会受其影响而增加。谷桂华[20]曾以澄江海口水文站 1967~2007 年实测的抚仙湖年、月水温资料为基础, 分析了抚仙湖水温的年内、年际变化特征及变化趋势, 得出抚仙湖水温年内变化特征为最高水温出现在 6~9 月, 且均在 20°C 以上, 最低水温出现在 1~2 月, 为 10°C 左右, 多年平均温差基本保持在 10°C ; 年际变化为: 1967~1993 年, 多数年份水温值在多年平均值(17.6°C)以下变化, 而 1994~2007 年, 所有年份水温值多在平均值以上变化; 年际平均水温最高与最低相差 2°C 。Regier 等[21]对加拿大实验湖泊区的研究虽然只分析了温度对藻类的影响, 而没有分析温度对其他生物的影响, 但研究结果已经显示, 温度升高会导致温带湖泊中一些高温不耐受物种消失。Rahel 等[22]研究也发现, 温度升高对冷水鱼类如鲑亚目和白鱼以及一些适应激流的鱼类不利, 但对湖上层鱼类如河鲈和狼鲈却很有利。环境的变化不一定会导致物种数量上的减少, 但必定会导致物种多样性的减少。全球气候的变化对湖泊的影响不可小觑, 2°C 即可改变世界。

4.2.4. PH 值变化

在淡水湖泊中, PH 值的高低一般与湖水中游离的 CO_2 和 HCO_3^- 的含量多少有关系。从图 8(d)和图 9(d)中可以看出, 抚仙湖和星云湖的 PH 值均超过国家《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中的规定。在抚仙湖中, 除 FXL-1 外, 各监测点中的 PH 值相差不大, 且均呈微碱性; 在星云湖中, 除个别误差外, 其余监测点的 PH 值略有不同, 但均呈碱性或强碱性。这可能是由于星云湖中蓝绿藻较多, 光合作用较强, 因此消耗了水中较多的 CO_2 , 以致其 PH 值比较高。从野外采样的过程中也可以发现, 星云湖各监测点的富营养化程度存在很大差异, 受人类影响也不同, 故各监测点的 PH 值相比于抚仙湖, 差异较明显。

从图 10 中可以看出, 抚仙湖的前 5 m 水深内, PH 值变化较明显, 5 m 以下水中 PH 值几乎不变, 由此可知, 抚仙湖的前 5 m 水深内更容易受到人类活动的影响。

4.2.5. 电导率变化

在自然水体中, 盐、酸和碱的浓度越大, 则电导率就越大。所以, 电导率和盐度成正比, 研究电导率其实就是研究盐度。淡水水体的盐度和组成盐度的离子常常是由流域的土壤或岩石内部发生的反应所决定的。电导率(盐度)一般随径流的增加而下降, 在相同的地质区域, 电导率随流域面积增大而上升, 这可能是因为小流域处在高地或山地的地区居多, 这些地区通常含有较多的火成岩。而较大流域则位于易

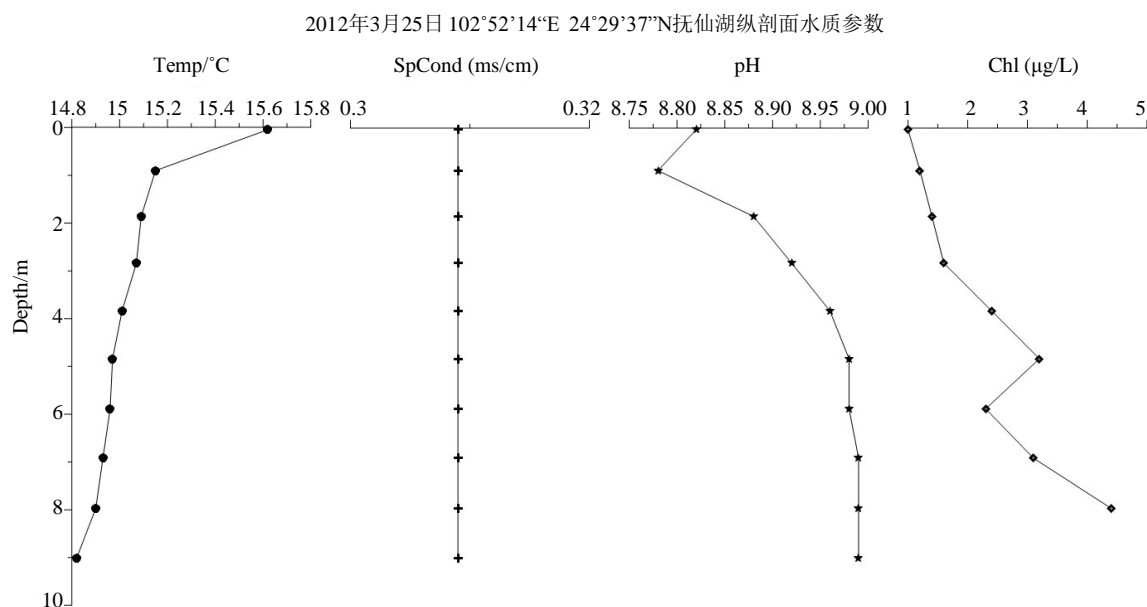


Figure 10. The profile water datum of Lake Fuxian
图 10. 抚仙湖纵剖面水质数据

于风化的沉积岩或冰川沉积物低的地区。第二种解释是较大流域通常较少具有陡峭形态，因此相对的蒸腾、蒸发时间和径流与岩石和土壤的接触时间更长。第三种解释是位于高地的小流域和位于低地的较大流域之间的气候差异影响了土壤形成、土壤侵蚀和盐度。因为不同机理、不同的空间和时间尺度下的过程组合多变，使某一个机理或过程成为主导某种结果的唯一原因是不可可能的。这 3 种机理在决定盐度(电导率)时可能共同起作用，尽管它们的相对重要性有所不同[19]。

从图 8(e)和图 9(e)中可以看出，除 FXL-1 外，抚仙湖其他各监测点的 Spcond 基本比较稳定，没有太大变化。星云湖中，除 XYL-5 外，其他各监测点的 Spcond 也比较稳定，XYL-3 最开始 7 月份的监测数据与其他各监测点的数据相差很大可能是由于当时测量的时候仪器没有调整好所产生的误差。XYL-5 普遍高于其他各监测点，且变幅比较大的原因可能是其所处的位置附近为石头加工厂和菜地，且其石头都是花岗岩和碳酸盐，加工所产生的石头粉末和菜地里的农药随雨水而流入湖中，逐渐沉淀和溶解，所以该区比其他各监测点的电导率高。

从抚仙湖的纵剖面(图 10)中可以看出，抚仙湖中的电导率随深度的增加不变，非常稳定。说明此 10 m 以内的水体离子组成非常稳定。

4.2.6. 藻蓝蛋白分析

从图 8(f)中可以看出，抚仙湖除 FXL-1、FXL-2、FXL-4 之外，其余四个点的藻蓝蛋白都比较稳定，且基本保持在 3000 cells/mL 左右，FXL-2 与 FXL-3 在 8 月份数值异常高可能是测量时的误差所致，所以如果剔除这个误差，则抚仙湖除 FXL-1 外，其余各点的藻蓝蛋白差不多。从图 9(f)中可以看出，星云湖总体藻蓝蛋白都比抚仙湖的高，其基本保持在 62,000 cells/mL 左右，是抚仙湖的 21 倍左右，由此可以看出，星云湖水质污染的严重。

4.3. 各监测点水质评价

4.3.1. 抚仙湖

从水质评价的角度看(见表 2)，根据地面水环境质量标准(GB3838-88)中的功能分类，FXL-3 的水质

Table 2. The water quality evaluation of Lake Fuxian & Lake Xingyun
表 2. 抚仙湖和星云湖水质评价

监测点	纬度	经度	水质评价	评分	营养及评价
FXL-1	24°38'0.528"	102°54'12.82"	VI	64.39	中富
FXL-2	24°32'7.74"	102°56'35.76"	II	54.21	中
FXL-3	24°25'55.62"	102°54'9.72"	I	20.70	贫
FXL-4	24°22'34.74"	102°52'34.32"	II	38.10	贫中
FXL-5	24°24'4.56"	102°49'39.24"	II	46.61	中
FXL-6	24°28'41.16"	102°51'51.48"	II	20.21	贫
FXL-7	24°33'50.4"	102°50'38.6"	II	20.70	贫
XYL-1	24°22'26.22"	102°48'27.84"	II	45.97	中
XYL-2	24°22'57.6"	102°48'25.86"	II	52.36	中
XYL-3	24°22'59.4"	102°46'53.4"	II	57.47	中富
XYL-4	24°20'28.5"	102°45'47.28"	II	55.28	中富
XYL-5	24°20'35.82"	102°48'12.42"	IV	50.13	中

最好，为 I 类，适用于源头水和国家自然保护区；FXL-1 水质最差，为 IV 类，主要适用于一般工业水区及人体非直接接触的娱乐用水区；其余水质均为 III 类，主要适用于集中式生活饮用水水源地二级保护区、一般鱼类保护区及游泳区。

从营养级评价的角度看，FXL-3、FXL-6、FXL-7 水质最好，为贫营养；FXL-4 水质次之，为贫中营养；FXL-2 和 FXL-5 水质能再次些，为中营养；FXL-1 水质最次，为中富营养。

结合采样点的位置来看，FXL-1 为污水净化湿地带，离城市最近，城市所排放出的污水在这里净化，所以水质比其他采样点差些；其水面有很厚的浮萍，水体呈棕褐色，并散发出臭味儿，底质为腐殖质，周围有水葱、芦苇、茭草、香蒲等挺水植物群落。FXL-2 为一天然湖湾处，岸边有杂草，且随季节的变化出现不同的植物群落，水质清澈，底质为细砂砾；湖湾内的水随季节的变化明显，丰水期有小泻湖，泻湖内水草和藻类丰富，与泻湖外的湖水形成两种完全不同的微生态系统。FXL-3 为一路边采样点，水下地势较陡，深度变化快。周围有小树林和大的岩石，水质清澈，沉水植物丰富，自然性较好；但 9 月份采样时，发现其水面上漂浮一死鱼，不知何原因，还有待于进一步探讨。FXL-4 为一路边采样点，在这里经常看见有人抽水，或许这是 5 亿 m^3 湖水流失的原因之一；6 月份采样时，发现岸边有一条很大的死鱼，并散发出臭味儿；岸边也有一小泻湖，但其规模比上一个采样点小很多，同样与其外的湖水构成两种不同的微生态系统；泻湖内水草和藻类丰富，底质为黑色淤泥，并有臭腥味儿；泻湖外水质清澈，底质为砾石。FXL-5 为抚仙湖的西南岸一路边采样点，周围经常有人钓鱼，水草和藻类丰富，鱼类很多，水质清澈，底质为细砂砾石，周围有湿生植被。FXL-6 为抚仙湖执法大队旁，多大石头，底质为砂砾，水体清澈。FXL-7 为禄充风景区，周围有游船，受人类活动影响，藻类几乎没有，但有蚂蟥，底质为人工石质沙滩，沙滩上有很多螺壳。

4.3.2. 星云湖

从水质评价的角度看，除 XYL-5 为 IV 类水质外，其余均为 II 类水质。

从营养级的角度看，除 XYL-3 和 XYL-4 为中富营养状态外，其余均为中营养状态。

结合采样点的位置来看，XYL-1 为海门楼，岸边有很多船只，且人们经常在这里洗菜；水中蓝绿藻

大量繁殖, 水体呈墨绿色, 近岸处漂浮大量水白菜和浮萍, 偶见水葫芦, 底质为砂砾。XYL-2 为星云湖北岸一采样点, 旁边有两个大的排污口, 水体呈墨绿色, 近岸处有大量水草和藻类漂浮, 3 月份采样时发现很多摇蚊漂浮岸边, 偶有几颗水白菜和水葫芦, 底质为砂砾。XYL-3 为星云湖西岸一路边采样点, 周围有高粱玉米地, 近岸处漂浮大量水草, 偶见几颗水白菜和水葫芦, 蓝绿藻大量繁殖, 水体呈墨绿色, 底质为砂砾。XYL-4 为星云湖西岸菜市场里面一采样点, 周围是大片农田, 近岸处漂浮有水草, 蓝绿藻大量繁殖, 水体呈墨绿色, 底质为细砂。XYL-5 为星云湖东岸一石头加工厂, 周围并伴有大片农田和杂草, 浮萍和蓝绿藻大量繁殖, 水体呈墨绿色, 并伴有臭腥味儿, 底质为细砂。

5. 讨论

抚仙湖中 FXL-1 因为是污水净化湿地带, 离城市比较近, 受人类活动影响较大, 所含离子比较多, 所以在各项指标中其波动比较大。抚仙湖和星云湖表层 12 个采样点的各参数偶有波动很大, 可能是由于仪器测量的误差。抚仙湖纵坡面图中 PH 在前 1 m 处表现出随深度增加而下降这个趋势, 可能是因为受人类活动的影响。Chla 是藻类生物量的代名词, 一般随着水体深度的增加而降低, 但在抚仙湖纵坡面中, 其 Chla 表现为随深度的增加而增加, 这可能是抚仙湖表层浮游动物捕食的原因, 且在 5~6 m 处出现一个转折, 这可能与该处浮游动物有关。星云湖东岸水质好于西岸水质, 可能是由于西岸有牲畜饲养和农村生活污水直接排放的影响。全球气候变暖, 降水量减少, 势必会影响湖水的各种理化性质, 从而影响湖泊生物的物种组成和丰度, 改变湖泊的微生态系统。水质评价时, 由于指标较少, 所以评价有些局限性, 不能全面或定量描述评价湖泊营养状态。金文刚[23]曾研究过河流改道工程之后的星云湖, 发现星云湖主要污染物 TP、TN 等不降反升, 由于我们现在还无法测量 TP 和 TN, 故这些还有待于进一步研究。星云湖的污染是长期积累由量变到质变所产生的, 湖泊的治理更是一个漫长的过程, 河流改道工程对星云湖的影响是积极有效的, 但可能短期内不会产生明显效果。

6. 结论

1) 从 1957~2009 a 的气象数据中可以看出, 在这 52 a 的研究尺度上, 温度表现为明显的波动上升, 降水量表现为轻微的波动下降趋势, 这与全球气候变暖的背景一致。这种气候的变化势必会影响湖泊的生态环境, 温度升高, 有利于更多的生物生存, 蒸散作用也会加强; 而降雨量减少则代表着湖泊输入水量减少。当然不能忽略人为因素。相比夏季, 冬季对全球气候的变化有更敏感的反应。总体来看, 代表云南高原湖泊的抚仙湖和星云湖正向着不利于湖泊良性循环的方向发展。

2) 从 4 个月的水质监测数据中可以看出, 抚仙湖和星云湖均存在时空异质性, 且受人类活动比较小的地区, 水质较好, 反之, 则较差。

3) 在各项指标中, 星云湖几乎均高于抚仙湖, 其中, 星云湖的 Spcond 约是抚仙湖的 2 倍, 星云湖的藻蓝蛋白约是抚仙湖的 21 倍。

4) 星云湖东岸水质好于西岸水质。抚仙湖和星云湖的 PH 值均偏高。水温对气候有非常敏感的反应。

致 谢

云南省环科院孔德平博士提供的气象数据资料, 以及云南师范大学高原湖泊生态与全球变化重点实验室和高原地理过程与环境云南省重点实验室的各位老师和同学的帮助, 在此表示感谢。

基金项目

国家自然科学基金项目(批准号: 41102117)、云南省高端人才引进项目(批准号: 2010CI111)和湖泊沉积与环境变化云南省创新团队项目(批准号: 2010CI)共同资助。

参考文献 (References)

- [1] 郭慧光, 闫自申 (1999) 滇池富营养化及面源控制问题思考. *环境科学研究*, **5**, 43-44.
- [2] 王苏民, 窦鸿身 (1998) 中国湖泊志. 科学出版社, 北京, 41-42, 374-377, 383-384.
- [3] 于洋, 张民, 钱善勤, 等 (2010) 云贵高原湖泊水质现状及演变. *湖泊科学*, **6**, 820-828.
- [4] Jorgensen, S.E and Vollenweider, R. (1989) Principles of lake management. International Lake Environment Committees and United Nations Environment Program, 251-266.
- [5] Vollenweider, R. (1986) The scientific basis of lake and stream eutrophication with particular reference to phosphorus and nitrogen as eutrophication factors. Technical Report DAS/DSI/68, Organization for Economic Cooperation and Development, No. 27: 1-182.
- [6] Wetzel, R.G. (1983) Limnology. College Publishing, Glen Allen, VA, 6-24.
- [7] 成小英, 李庆杰, 濮培民 (2006) 城市富营养化湖泊生态恢复——南京莫愁湖物理生态工程试验. *湖泊科学*, **3**, 218-224.
- [8] 张世涛, 冯明刚, 李荫玺 (2007) 近现代星云湖的环境变化与生态对策. 地质出版社, 北京, 85-87.
- [9] 史正涛, 明庆忠, 张虎才 (2005) 云南高原典型湖泊现代过程及环境演变研究进展. *云南地理环境研究*, **1**, 24-26.
- [10] 黎尚豪, 俞敏娟, 李光正, 等 (1963) 云南高原湖泊调查. *海洋与湖沼*, **2**, 87-144.
- [11] 杨加林, 李杰, 李经纬, 李敏, 张亚玲 (2012) 抚仙湖-星云湖水生生物与水环境研究综述. *云南地理环境研究*, **2**, 98-102.
- [12] 昆明日报 (2010) 星云湖:“倒流”之后走向三类水质. 2010.2.25:TO4.
- [13] 师莉莉, 杨晓红 (2007) 滇中三大湖泊氮、磷水质变化趋势研究. *环境科学导刊*, **S1**, 67-69.
- [14] 王娟, 高原 (2007) 水环境质量评价 3 种方法的应用对比. *工业安全与环保*, **2**, 16-17.
- [15] 牛红义, 吴群河 (2005) 水污染检测技术发展动向初探. *环境科学动态*, **2**, 60-62.
- [16] 王玉华, 赵学民, 周怀东 (2004) 水质自动监测技术及其应用分析. *水文*, **3**, 54-55.
- [17] 张惠昌, 武秀珍 (1993) 水环境质量评价的综合评判法. *兰州大学学报*, **2**, 135-141.
- [18] 蒋树军, 王净 (2003) 官厅水库水质污染状况及趋势分析. *北京水利*, **2**, 31-32.
- [19] 卡尔夫(加), 著 (2011) 古滨河, 等, 译. 湖沼学: 内陆水生态系统. 高等教育出版社, 北京, 206-253.
- [20] 谷桂华 (2008) 抚仙湖水温特征及趋势分析. *人民珠江*, **5**, 38-39, 57.
- [21] Regier, H.A., Holmes, J.A. and Pauly, D. (1990) Influence of temperature changes on aquatic ecosystems: An interpretation of empirical data. *Transactions of the American Fisheries Society*, **119**, 373-389. [http://dx.doi.org/10.1577/1548-8659\(1990\)119<0374:IOTCOA>2.3.CO;2](http://dx.doi.org/10.1577/1548-8659(1990)119<0374:IOTCOA>2.3.CO;2)
- [22] Rahel, F.J., Keleher, C.J. and Anderson, J.L. (1996) Potential habitat loss and population fragmentation for cold water fish in the North Platte River drainage of the Rocky Mountains: Response to climate warming. *Limnology and Oceanography*, **41**, 1116-1123. <http://dx.doi.org/10.4319/lo.1996.41.5.1116>
- [23] 金文刚 (2010) 星云湖、抚仙湖出流改道工程对星云湖的影响研究. *中国环境科学学会学术年会论文集*, **3**, 2502-2504.