

# The Seasonal Variations of the Water Quality of Erhai during 2015-2016

Mengshu Zhu, Hucai Zhang\*, Fengqin Chang, Huayong Li, Lizeng Duan, Hongwei Meng, Rongxin Bi, Zhiming Lu

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: jane0091@outlook.com, \*zhanghc@niglas.ac.cn

Received: Jul. 12<sup>th</sup>, 2017; accepted: Jul. 29<sup>th</sup>, 2017; published: Aug. 1<sup>st</sup>, 2017

---

## Abstract

Along with the regional economic development and urban expansion in the Erhai drainage area, the water quality of Lake Erhai has been impacted strongly. To understand the water quality status and its change processes, we have monitored the lake water recently. The analyses results of the monitoring data show that the mixedness of lake water, which is affected by the strong wind and waves in the Lake Erhai, is the highest in the south of lake where with a shallow water depth, and is the lowest in central part of lake, while it shows a moderate situation in the north of the lake. As one of the typical plateau-type shallow lakes, there is no temperature stratification observed in Lake Erhai, but a weak mixing phenomenon between thermocline and epilimnion exist in the central and north part of the lake in July. The seasonal water temperature changes affect the distribution and content of chlorophyll-a, which is also affected by human activity induced nutrient inputs, especially in the shallow area in south of the Lake Erhai, where is more sensitive to natural factors, such as wind velocity, direction and lake current. The dissolved oxygen (DO) content is not only influenced by the algae in lake water, but also the discharge of rivers into the lake. Our monitoring data reveal a seasonal variation of the DO contents, and show a highest value in January high and a lowest value in July. At the same time, the pH value shows a distinguishable seasonal variation with a lowest value in January. As pH is very sensitive to the photosynthesis and respiration of aquatic animals and plants in the lake water, it varies from one area to another abruptly in July. It has been noticed that a strong correlation exist between the chlorophyll-a content, DO and pH values in October. The seasonal change of turbidity is sensitive to water depth and zooplankton and phytoplankton amounts. The total contents of both Nitrogen (TN) and Phosphorous (TP) reveal that Lake Erhai is approaching to the middle to middle-high eutrophication situation, and strong measurements to prevent the lake from further eutrophication is necessary.

## Keywords

Erhai, Water Quality Parameters, Temperature, Wind-Wave Disturbance, Spatial Heterogeneity

---

\*通讯作者。

# 2015~2016年洱海水质参数季节性变化

朱梦姝, 张虎才\*, 常凤琴, 李华勇, 段立曾, 蒙红卫, 毕荣鑫, 路志明

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: jane0091@outlook.com, \*zhanghc@niglas.ac.cn

收稿日期: 2017年7月12日; 录用日期: 2017年7月29日; 发布日期: 2017年8月1日

## 摘要

随着洱海流域建设和生产、生活规模的快速扩展, 对洱海水质的影响也日益增强。为了解和认识其水质现状和变化过程, 我们对洱海进行了定位水质监测。通过对监测数据分析结果表明: 洱海的湖水受到风浪的强烈影响, 较浅的南部湖区混合度>北部湖区>中部湖区。作为高原浅水湖泊, 洱海不存在温度分层现象, 但是7月份在中部湖区与北部湖区出现温跃层和湖上层的混合现象; 水温的季节变化影响叶绿素 $a$ 的变化, 较浅的南部湖区更易受到人类活动与自然因素(如风力、吹程、湖流)等多重影响; 洱海水体的溶解氧含量存在季节性变化, 表现为1月份高而7月低; 洱海的pH值季节性差异较明显, 就监测月份而言, 1月份的pH最低, pH值易受水生动植物的光合作用和呼吸作用的影响, 7月在湖泊水体中波动较大; 洱海水体10月份的叶绿素 $a$ 浓度、溶解氧浓度和pH值之间均存在显著的相关性; 洱海水体中的浊度在季节性变化中受水体深度以及浮游动植物量的影响较大。洱海不同湖区水体的温度(Temp)、叶绿素- $a$ (Chl- $a$ )、溶解氧(DO)、pH以及浊度(Turbid+)的季节性(1月、4月、7月和10月)变化特征显著, 并存在明显的空间异质性, 结合总氮和总磷数据进行营养化评估, 结果显示洱海处于中营养化阶段。

## 关键词

洱海, 水质参数, 气温, 风浪扰动, 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

湖泊现代过程研究有助于了解湖泊在自然和人类活动影响下生态环境变化历程[1]。高原湖泊水体理化参数的季节性垂直分布特征研究对于深入理解不同指标的环境指示意义、探讨高原湖泊生态系统的变化十分重要, 因此有必要开展长期连续的高原湖泊现代过程监测与研究。

湖水的热量分配会影响湖水的分层与混合, 进而影响到湖水中的其他溶解性物质及其理化参数变化[1][2]。通过对水温的测定表明, 湖泊温度具有很强的季节性变化, 分层也呈现出季节性格局, 因此根据水温就能对湖泊进行识别和分类。湖泊水温不仅决定了湖泊的分类和理化状况, 还决定了生物群落的结构和水生生态系统的生产力[2]。在深水型湖库中, 存在季节性分层现象, 并且水温分层温差很大, 如天山天池夏季出现明显水温分层, 并且影响水体溶解氧浓度、电导率、pH值、叶绿素- $a$ 浓度和蓝绿藻细胞密度在水体中的分布[3]。这说明季节性温度成层现象会影响紊流的上下混合运动, 从而影响到湖泊的生

态模型变动。与深水湖库相比,高原浅水湖泊一般并不形成水体分层,由于监测数据缺乏也不系统,研究程度有待提高。

近年来,高原湖泊现代基本理化特征研究与综合考察对湖沼学的发展起到巨大推动作用[4][5]。就青藏高原地区而言,王君波[5]等对西藏纳木错水深分布及现代湖沼学特征进行分析,研究表明:纳木错湖水的湖沼学参数垂向变化趋势分明,表层变温层、中部温跃层与底部均温层的理化性质差异明显;黄磊[6]等针对纳木错水温变化及热力学分层进行深入研究,发现纳木错为典型双季对流、完全混合型湖泊,不同湖盆形状及水深分布是造成其中部与东部两个湖盆热力学特征差异的主要原因。然而在云贵高原地区对于长期监测湖泊基本理化特征的研究并不多见也不系统,赵雪枫[7]、文新宇等[8]对泸沽湖温度分层季节变化及其环境效应的研究,其结果揭示了泸沽湖季节变化的过程,及其对溶解氧、pH、叶绿素-*a*和总磷的时空分布影响。

以往对于洱海的研究多集中在营养化的评估、水质及沉积物微体分析等领域[9][10][11][12][13],本文通过对洱海水体2015年1月~2016年4月的监测数据的分析,探讨近年洱海水体理化参数的垂直分布特征与空间分布特征和季节性变化过程,为洱海富营养化和污染治理提供科学依据。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 研究区概况

洱海位于云南大理白族自治州中部(100°05'E~100°17'E, 25°36'N~25°58'N),为一构造断陷形成的高原浅水湖(图1)。洱海属澜沧江流域,发源于洱源县的茈碧湖,源头出自罢谷山,北有弥直河注入,东南收波罗江水,西纳苍山18溪水,西出洱河,湖水依赖地表径流和湖面降水补给,年入湖水量 $13.78 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,湖面面积 $256.5 \text{ km}^2$ ,蓄水量30亿立方米,平均水深约10.5 m,最深可达20.9 m,湖水停留时间约2.75年。洱海属亚热带高原季风气候,四季温和,平均温度较低,日较差较大,光照充足,干湿季节分明,据1951~1980年气象资料,年平均年降水量约为1078.9 mm;5~10月雨季降水量占全年降水量的85%~96% [14](图2)。

### 2.2. 数据采集与研究方法

为较全面、系统的了解洱海水质现状与季节性变化,在洱海从北到南共设置3个点进行定点监测,分别位于洱海的北部湖区、中部湖区与南部湖区。在采样现场以1 m为间隔,运用YSI(预先校准,测量结果可靠性及对比分析另有专文讨论)测定水样的叶绿素 *a*(Chl*a*)、温度(Tem)、溶解氧(DO)、pH、浊度(Turbid+),并于2016年5月19日采集柱状水样,低温封装带回,进行总磷(TP)、总氮(TN)实验测试。水质评价主要采用相崎守弘的湖泊营养程度评分标准对各采样点进行评分(保留两位小数),然后用卡森指数法(见表1)对各监测点进行分级[15]。

## 3. 结果分析与讨论

### 3.1. 湖水基本理化特征

#### 3.1.1. 水体中叶绿素垂直分布特征

叶绿素 *a* 是表征浮游植物现存量的主要参数,也是湖泊水质的重要指标之一[16],叶绿素 *a* 浓度的高低变化可以反映水体的营养状况。以前的研究结果认为,洱海的叶绿素 *a* 呈现明显的季节变化,即4月整体含量开始逐渐上升,7月大幅增大,并在10月达到峰值,在次年1月骤降[16]。但我们的监测数据显示出以下几个特点:1)2015年1月的叶绿素在中部和南部水域表层呈现明显的高值,但在水深0~7 m之间迅速递减,其叶绿素 *a* 浓度从 $36.3 \mu\text{g/L}$ 递减到 $3.7 \mu\text{g/L}$ ,随着水深增加稳定在 $3 \mu\text{g/L}$ 左右。2)随

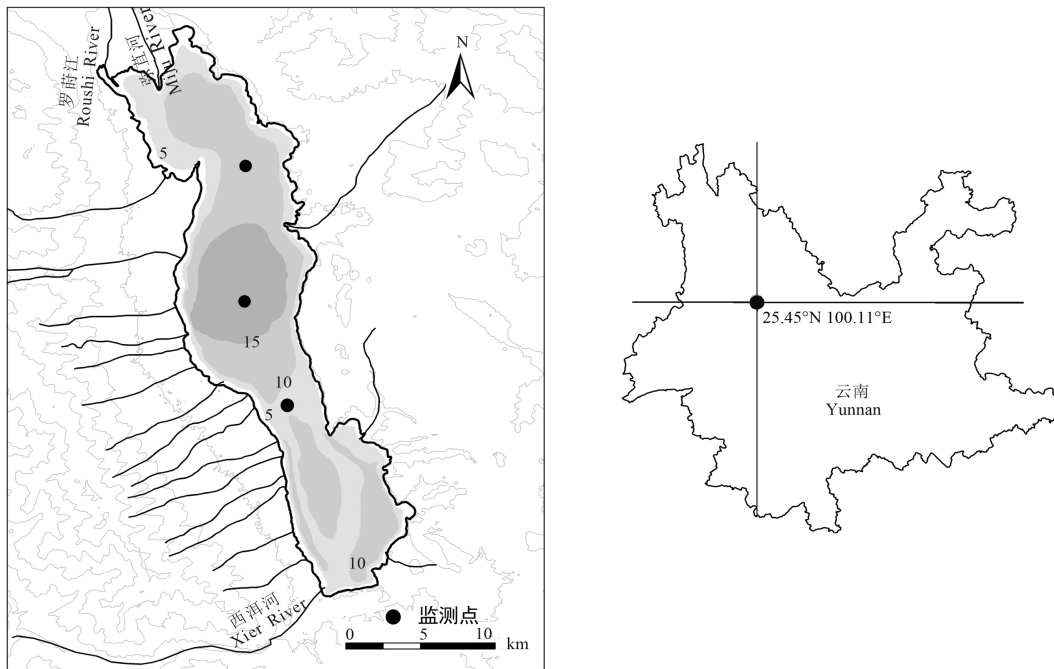


Figure 1. Location and selected monitoring stations in Erhai Lake

图 1. 洱海地理位置与选取的监测点

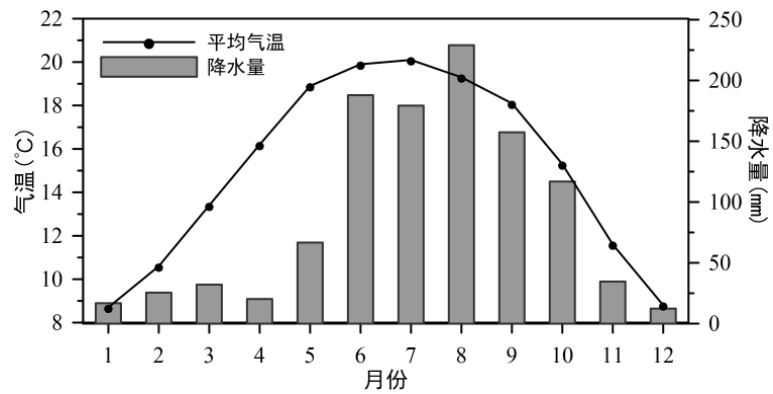


Figure 2. Average monthly temperature and precipitation in 1951-1980 in Dali

图 2. 大理 1951~1980 年月均气温与降水量

Table 1. Grading and classification standard

表 1. 评分与分级标准

评分值	营养程度
0~35	贫营养
36~45	贫中营养
46~55	中营养
56~65	中富营养
66~75	富营养
76~85	重富营养
86~95	严重富营养
96~100	异常富营养

着季节变化, 叶绿素 *a* 的浓度在 4 月稍有增长但整个湖泊从南到北十分均一, 为 3.5~5.6  $\mu\text{g/L}$ , 10 月增长为 8.8~17.7  $\mu\text{g/L}$ , 在 2016 年 1 月又下降为 0.6~5.5  $\mu\text{g/L}$ , 在 2016 年 4 月又增长为 2.1~6.6  $\mu\text{g/L}$  (图 3)。

从空间分布来看, 2015 年 1 月洱海中部和南部湖区的叶绿素浓度在表层均呈现由表层高值大幅递减的分布趋势, 而北部湖区则呈现稳定的低值, 这与中部和南部人口密度大、湖泊较浅, 特别是南部湖泊中间水位反而较浅的特征相关(可能与湖流和湖底地形有关)。在 2015 年的 10 月份明显表现出较浅的南部湖区叶绿素 *a* 浓度整体偏高, 北部湖区次之, 中部湖区的叶绿素 *a* 浓度相对较低的特点。其他季节三个测区除表层有所差异, 湖水较深处叶绿素 *a* 浓度变化不明显。

### 3.1.2. 水温分布

就我们目前监测的水温季节性变化而言, 洱海 1 月平均水温最低(图 4), 稳定在 11 $^{\circ}\text{C}$  左右, 但在 2015 年 1 月表层水温达 12.5 $^{\circ}\text{C}$ 。4 月水温上升至 16 $^{\circ}\text{C}$ ~17 $^{\circ}\text{C}$  之间, 7 月洱海平均水温最高, 且表面水温相对较高, 随湖泊水体的深度增加迅速降温稳定在 23 $^{\circ}\text{C}$ ~24 $^{\circ}\text{C}$ , 时至 10 月, 水体温度下降至 20 $^{\circ}\text{C}$  左右。整体来讲, 洱海水温在垂直断面上十分一致, 不同部位之间差异很小, 这可能与水体温度传输均匀且稳定、并主要受环境大气温度影响有关。另外, 从 2015 年 7 月不同湖区水温差异可以看出, 南部湖区从水温从表层到下部维持在 23 $^{\circ}\text{C}$  左右, 而北部与中部湖区尽管下层水温维持在 23 $^{\circ}\text{C}$  左右, 但表层水温则达 26 $^{\circ}\text{C}$ ~27 $^{\circ}\text{C}$ , 可能与南部湖区风力扰动作用所致[17]。

图 5 展示了洱海在 2015 年 1 月到 2016 年 4 月的周降水量与周平均气温, 结合全湖各监测点的表层水平均温度, 可以发现表层水温、周平均气温与周降水的季节变化显著, 水温与周气温变化存在很好的同步协调变化特征, 并且表层水温总是略高于周平均气温。

### 3.1.3. 溶解氧垂直分布特征

溶解氧是指溶解在水中的分解态氧, 是维持水体生态环境动态平衡的重要因子和维持水生生物生存的必要条件, 同时溶解氧还参与部分物质转化[18]。有关研究表明, 较清洁的湖泊溶解氧一般在 7.5  $\text{mg/L}$  以上, 当湖水溶解氧含量低于 5  $\text{mg/L}$  以下时, 浮游生物则无法生存[19]。实测数据显示, 洱海的溶解氧季节变化分明, 1 月整体浓度最高稳定在 8~9  $\text{mg/L}$ , 7 月整体最低但变化幅度较大, 从 4~8.6  $\text{mg/L}$ , 4 月

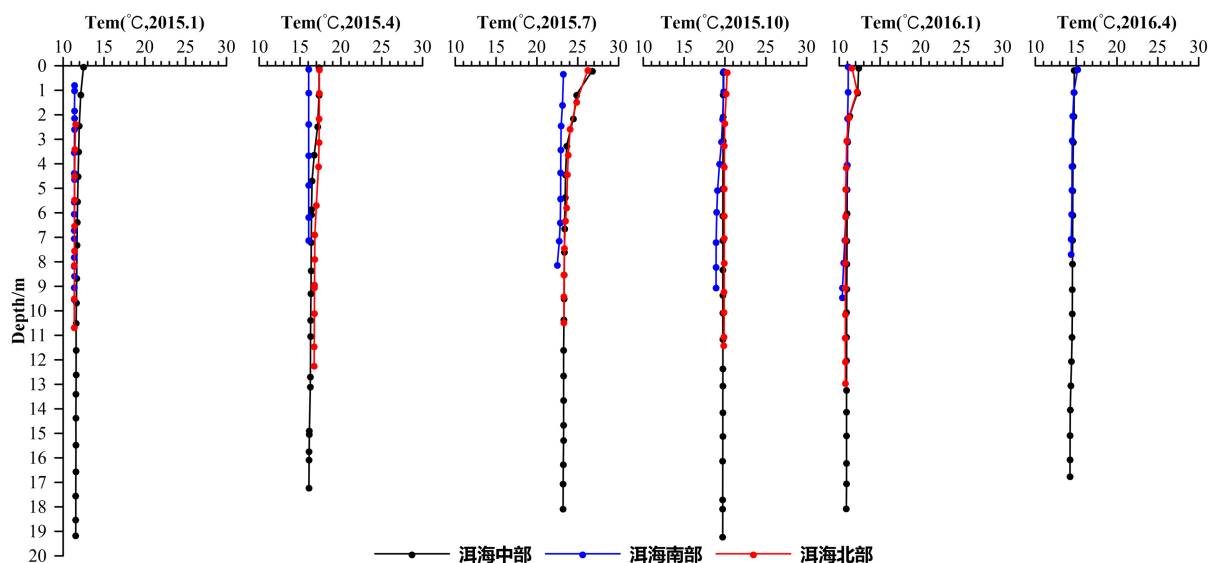


Figure 3. From January 2015-April 2016 water temperature changes in Erhai Lake

图 3. 洱海 2015 年 1 月~2016 年 4 月水温变化

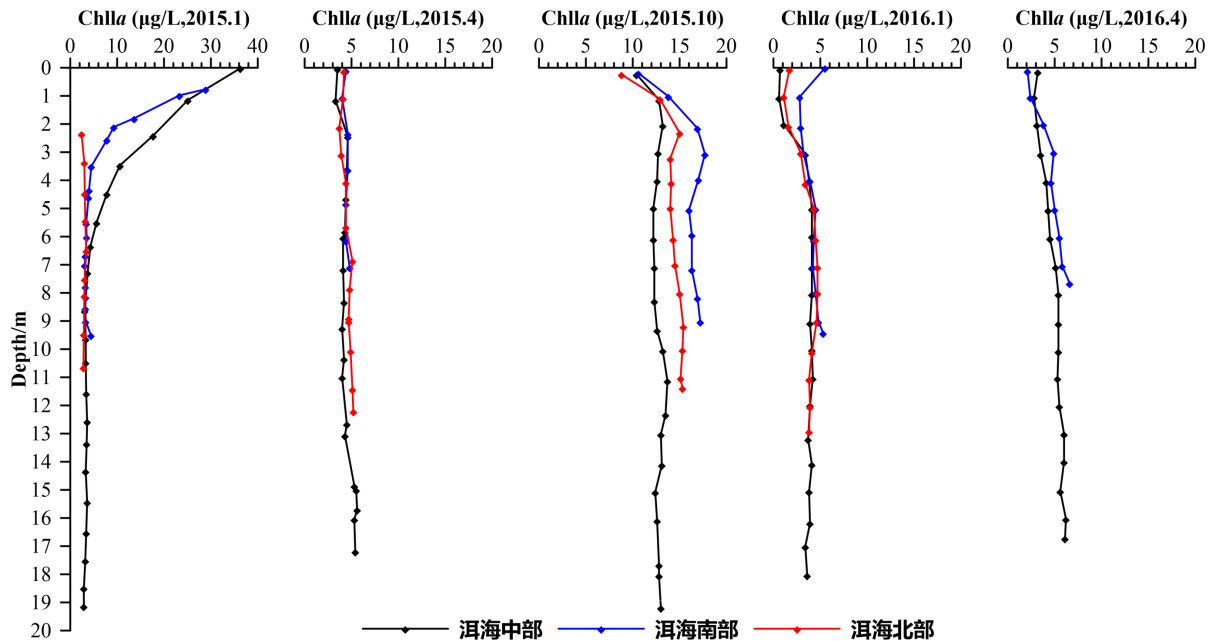


Figure 4. From January 2015-April 2016 vertical distribution of chlorophyll-a in Erhai Lake  
图 4. 洱海 2015 年 1 月~2016 年 4 月叶绿素垂直分布

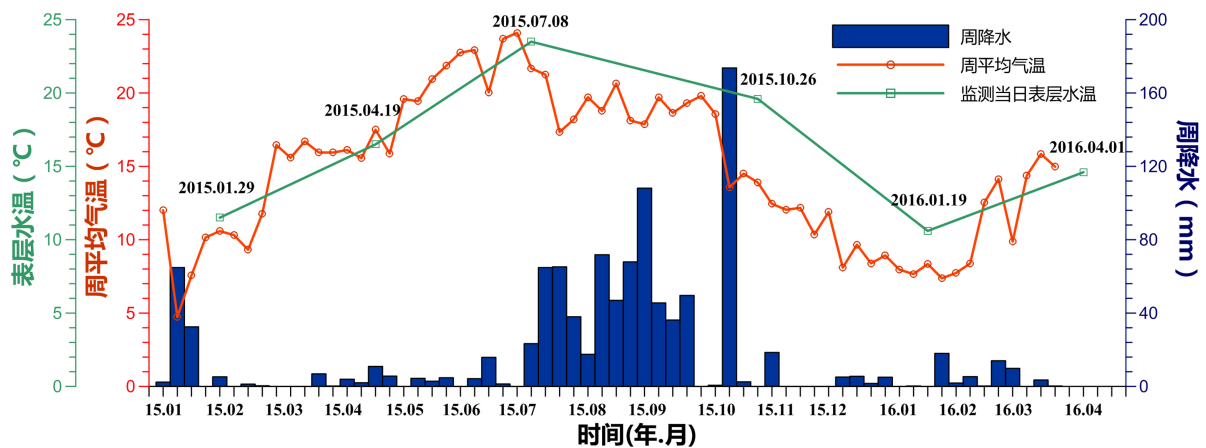


Figure 5. Erhai lake surface water temperature and weeks precipitation, weeks average temperature  
图 5. 洱海表层水温与周降水、周平均气温图

和 10 月则处于转换过渡时期(图 6)。

湖区不同部位水体 DO 在 1 月和 4 月差异不大, 但在 7 月和 10 月出现明显分异。7 月的溶解氧含量北部湖区的波动 > 中部湖区 > 南部湖区, 而 10 月则表现为南部湖区溶解氧含量 > 北部湖区 > 中部湖区。

### 3.1.4. pH 垂直分布特征

洱海湖水的 pH 值表现为以弱碱性为特征(图 7), 整体来看 4 月和 10 月各湖区的 pH 值高于 7 月和 1 月, 其中 4 月 pH 值在 8.7 左右变化, 且深层湖水的 pH 相比于表层小且稳定。7 月和 10 月不同湖区的 pH 差异比较明显, 且以 7 月北部湖区表层 pH 值最高, 随后随水深增加迅速降低; 南部湖区次之, 底层略高于表层; 其中中部湖区的 pH 值最低, 并且中部湖区在水深 2~9 m 处出现 pH 值突然降低然后又升高的过程; 10 月 3 个湖区的水体剖面 pH 值虽然垂向变化不大, 却呈现明显空间异质性, 出现南部湖区 pH

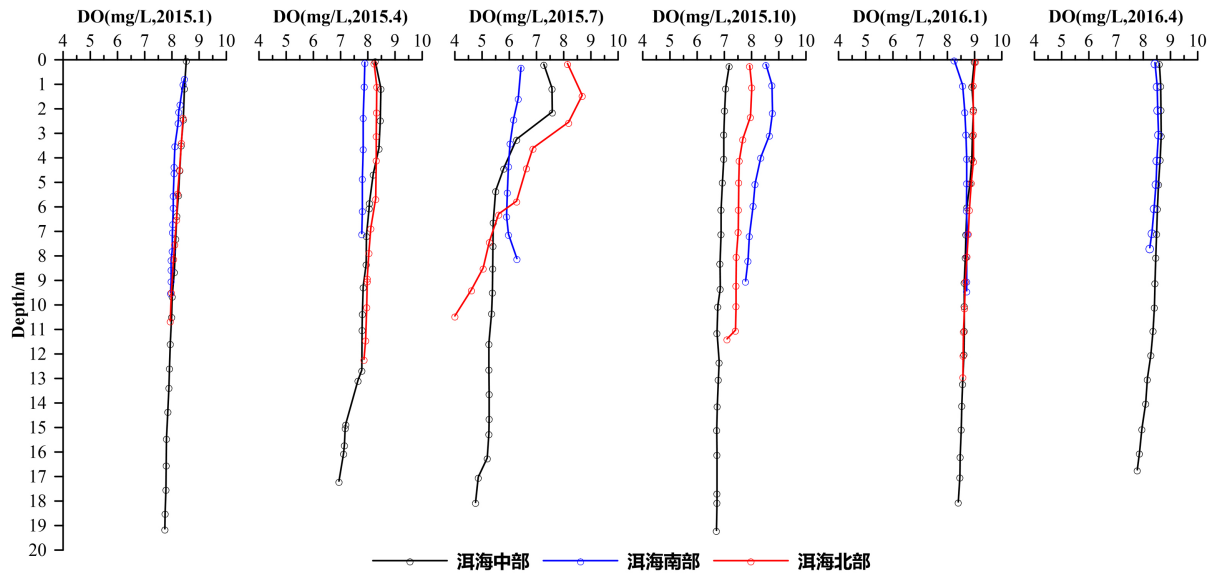


Figure 6. From January 2015-April 2016 dissolved oxygen (DO) vertical distribution in Erhai Lake  
图 6. 洱海 2015 年 1 月~2016 年 4 月溶解氧(DO)垂直分布

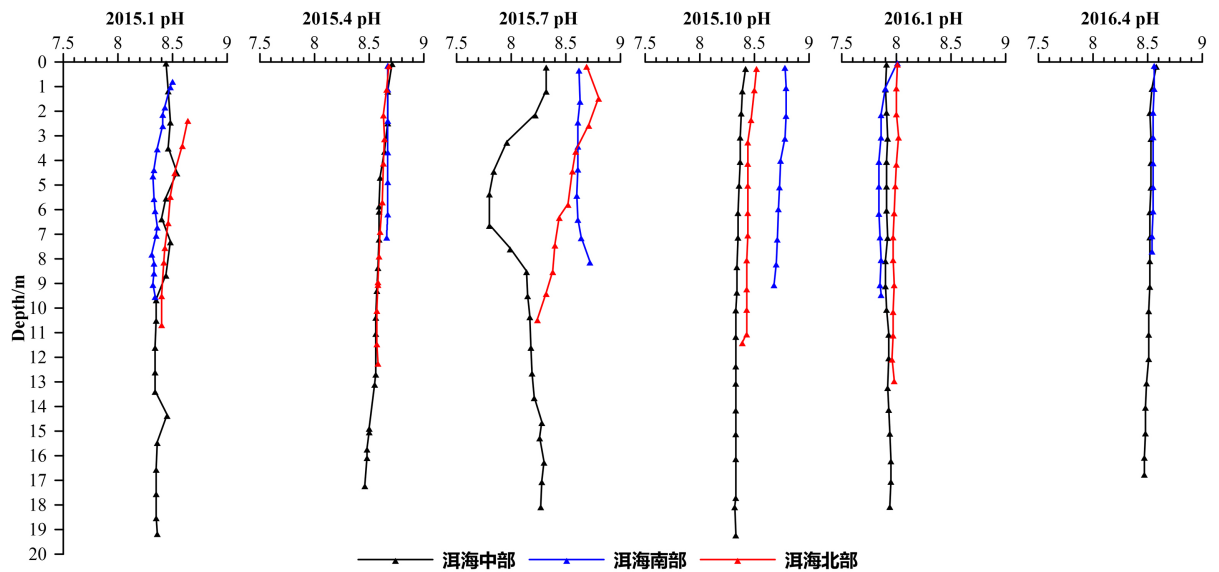


Figure 7. From January 2015-April 2016 pH vertical distribution in Erhai Lake  
图 7. 洱海 2015 年 1 月~2016 年 4 月 pH 垂直分布

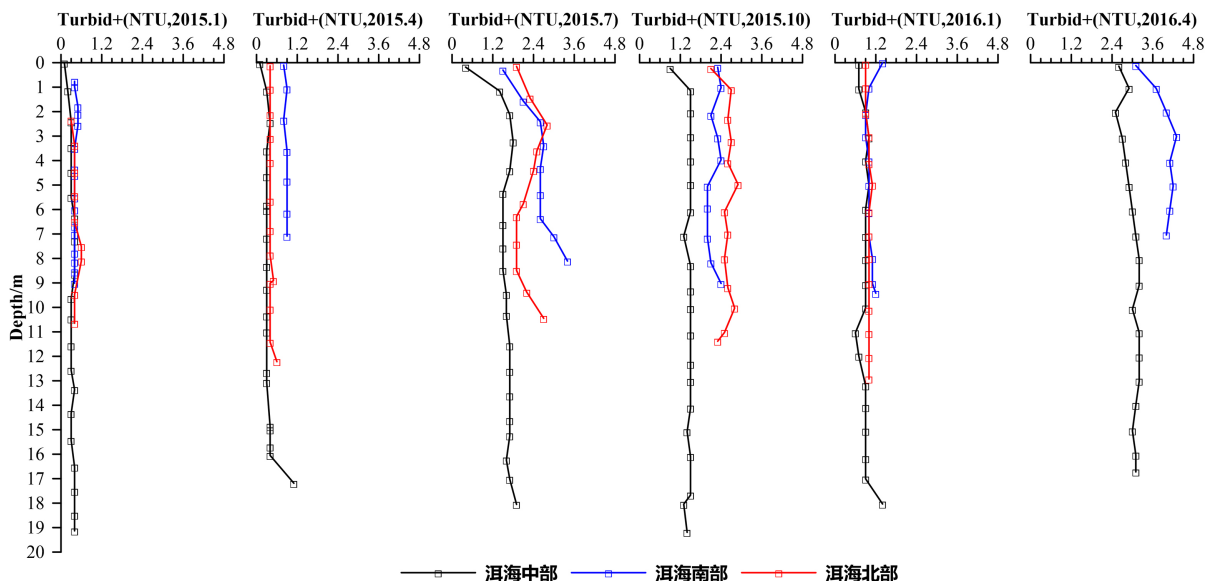
值 > 北部湖区 > 中部湖区, 相对而言, 最高值的南部湖区与最低值的中部湖区 pH 值相差 0.4 左右。

### 3.1.5. 浊度垂直分布特征

洱海水体浊度的季节差异较大(图 8), 7 月和 10 月的浊度及其波动均大于 1 月。其中 1 月份的浊度在 1 NTU 左右波动, 7 月份的浊度在 0.3~3.6 NTU 之间波动, 10 月在 1~3 NTU 之间波动。南部湖区浊度在 4 月和 7 月高于北部湖区和中部湖区, 10 月北部湖区的浊度高于南部湖区和中部湖区。

### 3.1.6. 总磷(TP)总氮(TN)含量与水质评价

评价水体富营养化的方法主要有: 营养状态指数法、营养度指数法和评分法。营养状态指数法中根



**Figure 8.** From January 2015-April 2016 turbidity vertical distribution in Erhai Lake

**图 8.** 洱海 2015 年 1 月~2016 年 4 月浊度垂直分布

据水体透明度制定的卡森指数法是最常用的评价水体富营养化的方法之一。后来，日本的相崎守弘等人提出了修正的营养状态指数(TSIM)，即以叶绿素 *a* 浓度为基准的营养状态指数[20]。其中总氮(TN)通过碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法，总磷(TP)通过钼酸铵分光光度法测得，样品的取样、保存及分析监测方法均依照《水和废水监测分析方法》进行[21]，并结合洱海水体中不同深度的叶绿素结果，经过计算分析得到表 2。

从表 2 中可以看出洱海 3 个湖区的营养级均为中营养，整体而言，较深的中部湖区和北部湖区相比于南部湖区评分较低。总氮相对总磷而言对营养级评价的贡献率更高，但相差不大，且都在各湖区底部出现高值。

### 3.2. 讨论

王立前[22]等人在 1999~2003 年对云南省主要湖库水的叶绿素 *a* ( $\mu\text{g/L}$ )浓度进行了调查，统计结果显示洱海的叶绿素 *a* 浓度范围为 0.5~6.0  $\mu\text{g/L}$ ，显然如今洱海的叶绿素 *a* 浓度相比之前的统计结果有很大的增加。从 2015 年 4 月~2016 年 4 月监测数据分析可以看出，可能由于洱海夏季大量藻类的爆发，而秋季大量浮游植物死亡，10 月出现了较高的叶绿素 *a* 浓度，这与洱海浮游植物数量的季节变化[23]是一致的。但在 2015 年 1 月，中部湖区表层水中叶绿素 *a* 浓度异常偏高，但随深度增加迅速下降，在水深 7 米处形成稳定低值，在南部湖区也呈现相似的特点，只有北部湖区没有体现。吴艳龙等[24]曾对滇池水华束丝藻-微囊藻演替过程及其机制进行研究，发现水温是驱动两者复苏、生长和演替的重要环境因子。水华束丝藻休眠孢子在 3 月份(水温 14 $^{\circ}\text{C}$ 左右)开始复苏，在无竞争压力下持续生长。从洱海 2015 年 1 月份的水温数据可以推断，很可能由于较暖的气温以及人类活动在南部和中部湖区注入大量的营养物质，短期内催生出大量浮游植物有关，但受冬季太阳辐射强度影响，水体热量停留在表层，随深度增加迅速降低，这在 2015 年的水温中可以看出水深 0~2 m 比下层水温高出 1 $^{\circ}\text{C}$ ~2 $^{\circ}\text{C}$ ，这些浮游植物也受热量影响停留在表层，但在较远的北部湖区尚未受到影响。这种情况给我们一个警示，虽然洱海目前保存为中营养水平，但即使再气温最低的 1 月份，突然的气温升高同样会导致藻类的暂时爆发，形成生态危机，2017 年初的情况就是这种情况的演示。另一方面，从全年来看，南部湖区叶绿素 *a* 浓度普遍高于北部与中部湖区，



**Table 2.** Water quality evaluation in Erhai Lake  
**表 2.** 洱海水质评价表

EH-1	Depth(m)	Chlorophyll (ug/L)	TN(mg/L)	TP(ug/L)	评分 1	评分 2	评分 3	平均分	营养级
	0.266	3.5	0.25	39.11	36.55	46	55.97	46.17	中营养
	2.067	5.2	0.42	32.85	41.86	53.24	53.65	49.58	中营养
	4.045	5.7	0.49	31.67	42.71	55.29	53.21	50.41	中营养
	6.047	5.3	0.66	34.61	42.03	61.82	54.30	52.72	中营养
	8.03	5.1	0.65	32.85	40.70	60	53.65	51.45	中营养
	10.088	5.4	0.52	32.07	42.20	56.18	53.36	50.58	中营养
	12.062	5	0.69	29.33	41.53	60.73	52.34	51.53	中营养
	14.043	3.8	0.98	33.04	37.59	66	53.72	52.43	中营养
EH-2									
	0.192	1.9	0.62	40.67	31.03	59.12	56.54	48.90	中营养
	2.017	3.8	0.79	32.26	37.59	62.55	53.43	51.19	中营养
	4.031	4.6	0.73	36.17	40.85	61.45	54.88	52.39	中营养
	6.059	4.6	0.53	33.83	40.85	56.47	53.77	50.36	中营养
	8.05	4.9	0.46	30.70	41.36	54.41	52.85	49.54	中营养
	10.039	4.8	0.49	29.52	41.19	55.29	52.41	49.63	中营养
	12.006	4.5	0.54	31.87	40.68	56.76	53.29	50.24	中营养
	14.081	4.3	0.47	31.28	40.34	54.71	53.07	49.37	中营养
	16.078	4.5	0.63	36.96	40.68	59.41	55.17	51.75	中营养
	18.083	5.5	0.60	44.59	42.37	58.53	58.00	52.97	中营养
	19.006	6.3	0.57	44.98	43.73	57.65	58.14	53.17	中营养
EH-3									
	0.145	5.4	0.60	42.04	44.48	58.53	57.05	53.35	中营养
	2.051	6.3	0.67	36.96	47.59	60.36	55.17	54.37	中营养
	4.07	6.6	0.59	37.93	48.62	58.24	55.53	54.13	中营养
	6.065	6.5	0.57	40.09	48.28	57.65	56.33	54.08	中营养
	8.021	5.8	0.67	35.00	45.86	60.36	54.44	53.56	中营养
	10.099	4.7	0.69	34.80	42.07	60.73	54.37	52.39	中营养

注：叶绿素 a 评价见评分 1，TN 评价见评分 2，TP 评价见评分 3，EH-1 表示洱海北部采样点，EH-2 代表洱海中部采样点，EH-3 代表洱海南部采样点。

这可能是因为湖水较浅，混合程度相对较好，光照充足，且南部湖区风速较大[16]，风力强烈扰动的水团带动着湖水充分搅动，使水温、藻类与营养物质垂向混合均匀，整个湖区垂向分布的浮游植物在相似条件下繁殖更快有关。

水温是叶绿素 a 浓度变化的重要影响因素，也是浮游植物生长的关键因子[25] [26] [27]。与湖面附近气温相似，湖泊的水温也存在明显的季节性变化，相应的也出现不同的分层格局。气温可以直接影响到湖水的表层水温，但洱海作为大型浅水湖泊，往往比热容较大，因而出现了表层水温略高于周平均气温

的现象。从不同的时间序列来看整个洱海水温垂向剖面,从表层到底层都受到气温变化的强烈影响,这与湖下层水温常年稳定的深水湖库[7]截然不同。就空间分布而言,洱海的主风向为西南风,杨威[16]等人通过监测发现,洱海的风速在空间上存在明显差异,南部湖区 > 中部湖区 > 北部湖区,况且南部湖区最浅,风力扰动强度大,可以从图 2 中展示的水温变化明显看出,南部湖区从表层到底层的水温完全受到季节性气温变化的影响,水体垂直剖面温度保持一致,这表明南部湖区在风力影响下的湖水混合彻底,不存在水温垂向变化。而北部湖区与中部湖区由于风速较低且水深大于南部湖区,因此在 7 月出现了暂时性的分层现象,但由于洱海风力很强,风生流使得冷却的上部水体密度差异变小,抗拒风力的能力下降,温跃层的厚度就会发生变化;研究表明[28],水色重且较为浑浊的湖泊表层水获取的太阳能更多,表层水和深层水的温差增加,因此往往温跃层较浅;此时表层冷却的温度与温跃层温度相同,在 7 月温跃层很容易与湖上层融合,而形成洱海北部湖区与中部湖区在 7 月的分层模式。

洱海的溶解氧显示了鲜明的季节变化,形成整个 1 月值最高、7 月最低的势态,这可能是因为 1 月洱海受到冬季低温、大风和较弱太阳辐射,使水体从表层到底层垂向充分接触大气,实现氧气交换,复氧过程频繁。而 7 月温度高、降水量较大,藻类死亡分解作用消耗大量氧气,加上混合层以下水中微生物分解水中有机物作用的加强,三个湖区的平均溶解氧浓度都有显著降低。10 月南部湖区的溶解氧高于北部和中部除了受到湖区深度和风力作用的影响,与叶绿素 *a* 也有关系(10 月的叶绿素 *a* 同样有此趋势),通过 SPSS 相关性分析,洱海 10 月的三个湖区溶解氧浓度与叶绿素浓度显著相关( $r = 0.6, p < 0.01$ )。当湖水中的叶绿素 *a* 的浓度偏高时,藻类的生物量也相对较高,产生的光合作用大量消耗  $\text{CO}_2$ ,并释放  $\text{O}_2$ ,使得溶解氧含量升高,呈现出南部 > 北部 > 中部的势态。由此推测,在洱海的 7 月可能由于大量浮游植物生存于水深 2m 左右,因此 7 月的北部湖区和中部湖区都出现在水深 3 m 以上溶解氧含量偏高,而在水深 3 m 后由于缺少光照,浮游植物难以产生光合作用,加上微生物分解耗氧及水生生物呼吸耗氧出现了大幅度下降。而南部湖区则由于风速较大藻类不易汇聚成层,并且风力带动了湖水的垂向充分混合,溶解氧很低且垂向分布较为均匀。

以湖泊整体来看, pH 的季节性变化主要是由于水生植物光合作用消耗大量  $\text{CO}_2$ ,从而使 pH 值在 1 月很低,从 4 月开始增大,7 月垂向波动较大且空间分异开始出现,10 月由于气温开始逐渐降低,因缺乏生物作用消耗而使 pH 值有所下降,并且有明显空间分异。7 月份在水深 2~9 m 处达到 pH 最低值,之后又缓慢增加。这与西藏纳木错[5]以及三峡水库大宁河库湾[29]的研究结果中显示的变化趋势相似。出现这样的现象可能与 7 月份在水深 1~3 m 层位大量出现的浮游植物有关,因夏季湖泊表层藻类的大量爆发给湖中的大量生物提供了丰富的食物来源,但是正因为表层藻类的覆盖 3 m 以下的浮游动植物、微生物受到光照的影响较小,反而这些生物的呼吸作用释放的大量  $\text{CO}_2$  使得 pH 有所降低。因位于湖泊中部,水深约 20 m,湖泊底层的生物量远低于表层与中层,因此湖泊下层 pH 未出现显著变化。10 月份 3 个湖区 pH 值空间分异明显,结合叶绿素 *a* 浓度数据与溶解氧浓度数据,可以明显看出藻类活动对于湖水 pH 值变化影响很大,进而可能影响到湖泊中其他生物生存。

浊度是湖泊水环境特征之一,其季节性变化可能与水中的生物量有关。经过相关性分析发现,湖水浊度只在中部湖区与叶绿素 *a* 浓度显著相关( $p < 0.01$ ),说明湖泊水深是影响浊度受到湖泊内部生物量驱动的关键性因子。深水环境下,湖水的流动性较差,水流不易混合,较多的生物量(如藻类)在水体内垂向分布不均匀,会显著体现在水体浊度数据中。浮游植物春季开始逐渐增加,夏季大量产生,秋季消亡,使得湖水中的浊度也随之发生变化。

目前洱海虽然仍处于中营养化阶段,但是通过评分可以看出已经存在向中富营养化发展的趋势。从总磷、总氮的空间分布上分析,洱海底部氮磷的增加,可能是由于底泥和沉积物中氮和磷的释放。并且受人类活动强烈影响下,氮和磷的双重驱动很可能加速湖泊的富营养化进程。

## 4. 结论

湖泊调查是湖泊学研究的基本工作, 基于对洱海跨时一年多的监测数据, 对其现代湖沼学参数进行了初步的分析, 并得到了对洱海的一些基本认识, 获得以下结论:

洱海作为高原浅水湖泊, 不存在典型的湖泊温度分层, 仅在 7 月份在中部湖区与北部湖区出现温跃层和湖上层的混合现象。洱海较浅的南部湖区混合度 > 北部湖区 > 中部湖区。水温的季节变化会影响叶绿素 *a* 的变化, 但人类活动排放的营养物质同样会在叶绿素 *a* 的增长中起重要作用; 较浅的南部湖区更易受到人类活动与自然因素(如风力、吹程、湖流)等多重影响。

洱海 10 月的数据在叶绿素 *a* 浓度、溶解氧浓度和 pH 值之间均表现出显著的相关性。洱海水体的溶解氧含量存在季节变化, 在 10 月的空间分布显著; 溶解氧不仅受到湖泊中藻类的影响也受到入湖河流的影响。洱海的 pH 值季节性差异明显, 10 月同样出现明显空间差异; pH 值易受水生动植物的光合作用和呼吸作用的影响, 7 月在湖泊水体中波动较大。洱海水体中的浊度在季节性变化中深水湖区受浮游动植物量的影响很大。

## 致 谢

赵帅营老师、张云鹰、文新宇、廖君、王教元、卢同平同学在野外监测和室内数据分析处理过程中给予了帮助, 在此一并表示感谢。

## 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] 王明达, 候居峙, 类延斌. 青藏高原不同类型湖泊温度季节性变化及其分类[J]. 科学通报, 2014, 59(31): 3095-3103.
- [2] Kalfs, J. (2001) *Limnology: Inland Water Ecosystems*. Prentice Hall, Upper Saddle River, 154-179.
- [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): 1197-2104.
- [4] 王君波, 彭萍, 马庆峰, 朱立平. 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.
- [5] 王君波, 朱立平, Gerhard Daut, 鞠建廷, 林晓, 汪勇, 甄晓林. 西藏纳木错水深分布及现代湖沼学特征初步分析[J]. 湖泊科学, 2009, 21(1): 128-134.
- [6] 黄磊, 王君波, 朱立平, 鞠建廷, 汪勇, 马庆峰. 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.
- [7] 赵雪枫. 泸沽湖温度分层季节变化及其环境效应[D]: [硕士学位论文]. 广州: 暨南大学, 2014.
- [8] 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.
- [9] 杨晓雪. 洱海总磷、总氮污染现状分析[J]. 云南环境科学, 2006, 25: 113-115.
- [10] 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.
- [11] 李原, 李任伟, 尚榆民, 李宁波, 卢家烂. 云南洱海的环境沉积学研究——表层沉积物营养盐与粒度分布[J]. 沉积学报, 1999, 17: 769-774.
- [12] 卢慧斌, 陈光杰, 蔡燕凤, 王教元, 陈小林, 段立曾, 张虎才. 近百年来枝角类群落响应洱海营养水平、外来鱼类引入以及水生植被变化的特征[J]. 湖泊科学, 2016, 28(1): 132-140.
- [13] 蔡燕凤. 近百年来洱海富营养化历史与硅藻群落变化的时空特征研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南师范大学, 2013.
- [14] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 371-372.
- [15] 刘载文, 王小艺. 水环境监测评价与水华智能化预测方法及应急[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.

- [16] 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, 4(1): 11-20.
- [17] 杨威, 邓道贵, 张赛, 谢平, 过龙根, 王圣瑞. 洱海叶绿素 *a* 浓度的季节动态和空间分布[J]. 湖泊科学, 2012, 24(6): 858-864.
- [18] 赵海超, 王圣瑞, 赵明, 焦立新, 刘滨, 金相灿. 洱海水体溶解氧及其与环境因子的关系[J]. 环境科学, 2011, 32(7): 1952-1959.
- [19] Chen, C.C., Gong, G.C. and Shiah, F.K. (2007) Hypoxia in the East China Sea: One of the Largest Coastal Low-Oxygen Areas in the World. *Marine Environmental Research*, **64**, 399-408.
- [20] 金相灿. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1987.
- [21] 国家环保局“水和废水监测分析方法”编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [22] 王立前, 张榆霞. 云南省重点湖库水体透明度和叶绿素 *a* 建议控制指标的探讨[J]. 湖泊科学, 2006, 18(1): 86-90.
- [23] 陈建良, 胡明明, 周怀东, 王雨春, 王英才, 李艳辉, 刘永定, 高继军, 洪宇宁. 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.
- [24] 吴艳龙, 李林, 代龚园, 闪锬, 吴华东, 宋立荣. 滇池水华束丝藻-微囊藻演替过程及其机制[C]//中国海洋湖沼学会藻类学分会. 中国藻类学会第八次会员代表大会暨第十六次学术讨论会论文摘要集. 2011: 315.
- [25] 阮晓红, 石晓丹, 赵振华, 倪利晓, 吴芸, 焦涛. 苏州平原河网区浅水湖泊叶绿素 *a* 与环境因子的相关关系[J]. 湖泊科学, 2008, 20(5): 556-562.
- [26] 吴阿娜, 朱梦杰, 汤琳, 朱刚, 汪琴, 张锦平. 淀山湖蓝藻水华高发期叶绿素 *a* 动态及相关环境因子分析[J]. 湖泊科学, 2011, 23(1): 67-72.
- [27] 缪灿, 李堃, 余冠军. 巢湖夏、秋季浮游植物叶绿素 *a* 及蓝藻水华影响因素分析[J]. 生物学杂志, 2011, 28(2): 54-57.
- [28] Jones, R.I. (1992) The Influence of Humic Substances on Lacustrine Planktonic Food Chains. *Hydrobiologia*, **229**, 73-91. <https://doi.org/10.1007/BF00006992>
- [29] 张述太, 薛俊增, 姚建良, 吴慧仙. 三峡水库大宁河库湾水环境的时空变化特征[J]. 水生态学杂志, 2010, 3(2): 1-8.

**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: [aep@hanspub.org](mailto:aep@hanspub.org)