

# 九龙江流域上游浅水湖泊富营养化机制

李颖<sup>1</sup>,曹文志<sup>1\*</sup>,张玉珍<sup>2</sup>,李文权<sup>3</sup>,苏彩霞<sup>1</sup>,王飞飞<sup>1</sup>,陈克华<sup>4</sup> (1.厦门大学环境科学研究中心,近海海洋环境科学国家重点实验室,福建 厦门 361005; 2.福建省环境科学研究院,福建 福州 350000; 3.厦门大学海洋学系,福建 厦门 361005; 4.龙岩市环境监测站,福建 龙岩 364000)

**摘要**:基于对九龙江上游龙潭湖富营养化水体和沉积物现状的监测结果,通过与国内富营养化深水湖库和流域下游大型富营养化浅水湖泊进行对比,深入探讨了流域上游浅水湖泊富营养化发生的原因及主导机制.流域上游浅水湖泊具有外源污染物输入较少的特点,较下游大型浅水湖泊更易受温度等气候条件和沉积物氧化还原状态的影响,以及外源输入总磷控制具有较强的滞后效应,因此对流域上游浅水湖泊富营养化的控制必须重视内源营养盐释放,特别是结合态磷的内源释放问题.

**关键词**:富营养化;上游浅水湖泊;沉积物;总磷;内源释放

中图分类号: 文献标识码:A 文章编号:1000-6923(2012)05-0906-06

**A Study on the mechanisms of eutrophication of a shallow upstream lake in the Jiulong River Catchment.** LI Ying<sup>1</sup>, CAO Wen-zhi<sup>1\*</sup>, ZHANG Yu-zhen<sup>2</sup>, LI Wen-quan<sup>3</sup>, SU Cai-xia<sup>1</sup>, WANG Fei-fei<sup>1</sup>, CHEN Ke-hua<sup>4</sup> (1.State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Environmental Science Research Centre, Xiamen 361005, China; 2.Fujian Provincial Institute of Environmental Science, Fuzhou 350000, China; 3.Department of Oceanography, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 4.Longyan Environmental Monitoring Station, Longyan 364000, China). *China Environmental Science*, 2012,32(5):906~911

**Abstract**:Based on site monitoring chemical data of lake water and sediments during an algal bloom in the Longtan Lake, causes and mechanisms of eutrophication in shallow upstream lakes were discussed by comparing the Longtan Lake in upstream of the Jiulong River with deep eutrophic lakes and large shallow downstream eutrophic lakes in China. The shallow upstream lake is characterized as relatively simple nutrient inputs and high susceptibility to climatic variability (such as temperature), redox conditions, and strong lag effects of the external total phosphorus inputs. Therefore, attention must be paid to the sediments nutrient releases, especially, the bound phosphorus of sediments when remediating eutrophication in shallow upstream lakes.

**Key words**: eutrophication; shallow upstream lake; sediment; total phosphorus; internal release

水体富营养化实际是湖泊或河流承纳营养物质后的自然衰变过程.受人类活动影响,这一过程已被极大的加剧<sup>[1]</sup>.人们对此事件的关注始于19世纪50年代美国Washington湖蓝藻事件的暴发<sup>[2]</sup>.2003年2月,美国环境保护署召开了圆桌会议指出多数水华暴发不仅与营养盐浓度的升高相关,更与其组成变化有关.

近50年来,我国湖泊富营养化趋势日趋严重,尤其是长江中下游地区<sup>[3]</sup>.20世纪70年代之后10年,长江中下游和云贵高原地区主要湖泊的富营养化比例已从5.0%升至55.0%<sup>[4]</sup>.浅水湖泊多分布于流域上游,具有结构简单、污染来源少、人

类干扰小的特点.本文对九龙江上游浅水湖泊——龙潭湖的富营养化机制进行了探讨,以期为湖泊富营养化研究提供较好的基础.

## 1 材料与方法

龙潭湖位于福建省龙岩市龙硿洞风景名胜区内,地处武夷山脉南段的喀斯特地貌区,为福建省第二大河——九龙江上游新安溪源头的人工

收稿日期:2011-08-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41175130);教育部新世纪优秀人才支持计划

\* 责任作者,教授, [wzcao@xmu.edu.cn](mailto:wzcao@xmu.edu.cn)

湖(图 1).湖面积约 7500m<sup>2</sup>,容蓄约 0.02km<sup>3</sup>,平均深度约 2.5m.湖水来源于上游山涧小溪,主要污染来源于附近餐饮排放的生活污水.

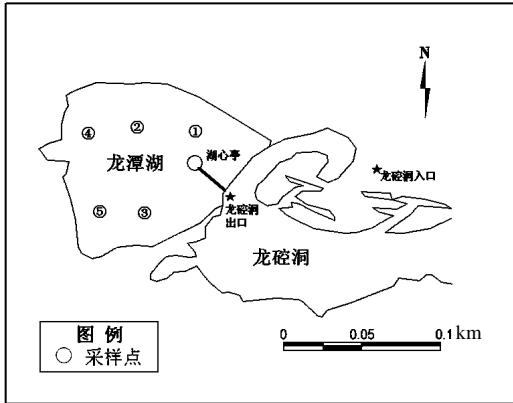


图 1 龙潭湖采样站示意图

Fig.1 Sampling sites in the Longtan Lake

样品采集时间为 2009 年 12 月龙潭湖水华暴发期间,于龙潭湖内均布 5 个点采样(图 1,1 号为山涧水入口,5 号为出口).鉴于水中溶解态磷(P)可能主要受水下 20cm 沉积物的影响,用抓斗式采样器采集湖底表层沉积物(0~20cm)混合样(以下简称沉积物),塑封冰冻保存带回实验室,经风干、磨细和过筛后测定总氮(TN)、总磷(TP)、可交换态硝氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、可交换态铵氮

(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、有机质和可交换态硅(Si).水体营养盐和叶绿素 a(Chl-a)数据由龙岩市环境监测站提供.

一定输入负荷下,湖水 TN 的浓度响应关系采用丹麦湖泊的经验模型<sup>[5]</sup>,TP 浓度响应关系采用 Vollenweider<sup>[6]</sup>和 OECD<sup>[7]</sup>提出的模型,如下:

$$TN = 0.34TN_{in} \cdot t_w^{-0.16} \cdot Z_{mean}^{0.17} \quad (1)$$

$$TP = \frac{TP_{in}}{1 + t_w^{0.5}} \quad (2)$$

式中:TN、TP 为湖水年均 TN、TP 浓度, μg/L; TN<sub>in</sub>、TP<sub>in</sub> 为 TN、TP, μg/L;t<sub>w</sub> 为流量加权水力停留时间, a; Z<sub>mean</sub> 为平均水深, m.

## 2 结果与讨论

### 2.1 流域上游浅水湖泊特点

该类型湖泊因地处流域上游,多为河流发源地或饮用水水源地.受地质构造影响,一般面积较小,水深小于 10m,沉积物与水体接触面积较大,透光层深度与水深比例高,以物理扰动为主<sup>[8]</sup>.受水深影响,湖泊夏季纵向热分层不明显,在无人为扰动情况下,外界营养盐输入易随颗粒物滞留于沉积物中.与流域下游湖泊和城市浅水湖泊不同,由于地处流域上游,污染来源较少且单一,沉积速率一般高于下游浅水湖泊.流域上游浅水湖泊与中下游大型浅水湖泊对比见表 1.

表 1 流域上游浅水湖泊与流域中下游大型浅水湖泊基本特征对比

Table 1 Comparisons of properties between shallow upstream lakes and shallow mid-downstream lakes in watersheds

湖泊类型	面积(km <sup>2</sup> )	水深(m)	污染来源	污染输入量(t/a)		代表性湖泊	来源
				TN	TP		
上游浅水湖泊	<1	<10,多数 2	生活污水	0.56	0.13	福建龙潭湖	本研究
中下游大型浅水湖泊	>100	<20	工业、农业废水,生活污水	>8000	>550	巢湖、太湖、鄱阳湖	文献[8-9]

### 2.2 富营养化期间龙潭湖水水质特征及评价

水华暴发期间龙潭湖主要水质参数见图 2.参照《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》<sup>[10]</sup>,龙潭湖水水质基本达到 Ⅲ类水标准.水华暴发期间,藻类以甲藻为优势种,其中硅藻门占 95%,甲藻门占 4%<sup>[11]</sup>.白天藻类上浮于水面进行光合作用,导致水体溶解氧(DO)浓度接近饱和.藻类在水体

CO<sub>2</sub> 供应不足情况下,利用水体中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>而释放出 OH<sup>-</sup>,水体呈略偏碱性(pH7.9,算术平均值)<sup>[12-14]</sup>.

对于富营养化湖泊水体的判断标准,国内外略有差别.美国 EPA 在水质富营养化研究中所采用的是 Gekstatter 提出的标准值,其富营养状态参数 TP>0.02mg/L,Chl-a>10mg/m<sup>3</sup>.而我国《湖

泊富营养化调查规范(第二版)》<sup>[15]</sup>中提出富营养型湖泊水质标准为  $TN > 0.7 \text{ mg/L}$ ,  $TP > 0.05 \text{ mg/L}$ . 龙潭湖水华暴发中后期水体  $TN$ 、 $TP$  平均浓度分别为  $0.53, 0.048 \text{ mg/L}$ , 依据我国标准, 达中度富营养化(表 2). 而使用修正的卡森指数法进行营养状态评价(表 3)(无水体透明度数值, 故不考虑  $TSIm(SD)$ ), 水体中的  $TSIm(TP)$  大于 50,  $TSIm(Chl-a)$  介于 30~50 间, 综合富营养化状态数为 50.4, 呈现轻度富营养化状态.

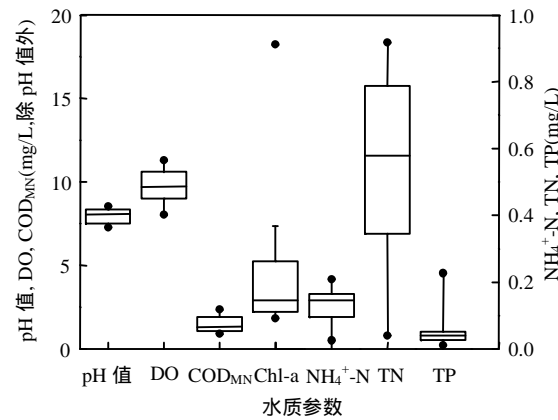


图 2 龙潭湖水华暴发中后期水质状况

Fig.2 Water quality during the medium-late phases of an algal bloom in the Longtan Lake

表 2 龙潭湖营养类型

Table 2 The trophic level of the Longtan Lake

项目	TN (mg N/L)	TP (mg P/L)	COD <sub>Mn</sub> (mg/L)
龙潭湖水体	0.53	0.048	1.427
中营养型(MT)	0.25~0.7	0.02~0.05	1~8

表 3 龙潭湖修正的卡森富营养化状态指标

Table 3 The revised Carson trophic state index in the Longtan Lake

状态指数	$TSIm(Chl-a)$	$TSIm(TP)$	$TSIm$
湖心	42.6	58.1	50.4

### 2.3 富营养化期间龙潭湖沉积物特征

对龙潭湖沉积物营养盐的测定结果显示, 龙潭湖沉积物中可交换态  $NH_4^+-N$  含量约为  $NO_3^- -N$  的 10 倍(图 3). 这是因为沉积物的离子交换易将  $NH_4^+$  与有机颗粒和无机颗粒结合, 吸附于

沉积物表面, 从而减缓了其扩散, 降低了其迁移性. 而  $NO_3^-$  不易通过离子交换吸附在沉积物上, 在水体中的流通性很强. 虽然被固定的  $NH_4^+$  释放的速度很慢, 但其是微生物体吸收 N 的主要形式, 对藻类生长存在重要的影响. 将龙潭湖沉积物中的 TP 含量与其所在的九龙江流域其他土地利用类型对比可见, 龙潭湖沉积物 TP 含量(均值  $0.52 \text{ mg/g}$  干重(下同))明显大于无施肥林地 ( $0.122 \text{ mg/g}$ ), 比施肥的果园 ( $0.496 \text{ mg/g}$ ) 略高. 湖泊沉积物中 TP 的含量明显高于同一区域未受干扰的土壤 TP 含量, 可初步推断湖泊沉积物中大部分 TP 来源于外界输入, 而这些暂时滞留的 TP, 在一定的条件下可通过再悬浮或矿化等向上覆水体释放, 而影响水体水质. 龙潭湖沉积物有机质(OM)含量并不高, 平均值为 3.2%. 受我省原生矿物丰富的影响, 龙潭湖沉积物中 Fe 和 Mn 的含量较高.

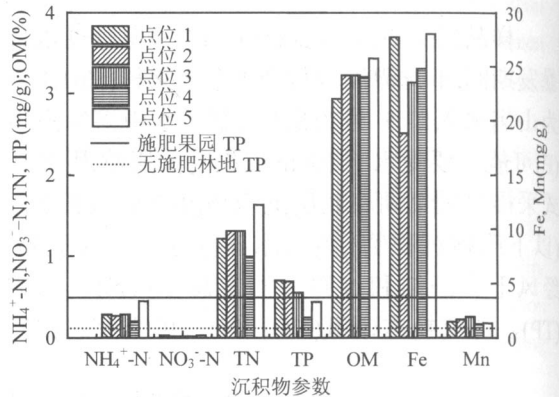


图 3 龙潭湖水华暴发中后期沉积物营养盐状况

Fig.3 Chemical properties of the sediments during medium-late phases of an algal bloom in the Longtan Lake

### 2.4 富营养化机制探讨

2.4.1 与富营养化深水湖库比较 深水湖泊多数蓄水量大(一般  $> 10^8 \text{ m}^3$ ), 换水周期大于 1 年, 营养盐滞留时间长, 滞留量大, 特别是库区, 富营养化水体  $TN$  和  $TP$  浓度远高于浅水湖泊(表 4). 受热分层影响, 存在季节性缺氧. 春季入湖的低温水体下沉, 将底部藻类和营养盐带至上层, 为夏季高温和强辐射条件下的藻类暴发创造了条件<sup>[16-17]</sup>.

龙潭湖作为浅水湖泊因自身的水动力条件

差而易于富集营养盐,营养物质容易在湖泊中人为干扰较强区域及出入口处聚集,导致出口处(点位 1、5)沉积物中 TN 与 TP 含量高于湖心区域,使湖泊的脆弱性增大(图 3)<sup>[18]</sup>.内源 P 释放使 TP 较之 TN 浓度的升高加剧了水体富营养化的暴发.

表 4 国内主要深水湖库特征及水质参数

Table 4 Properties and water qualities of some deep lakes and reservoirs in China

湖泊	面积 (km <sup>2</sup> )	蓄水 (×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	平均水深 (m)	TN (mg/L)	TP (mg/L)
抚仙湖	212	184	155	0.18	0.01
松花湖	550	137	30~40	1.74	0.07
力洋水库	16.1	0.05	14	1.06	0.06
三峡库区	79000	3390	70	2.10	0.20
密云水库	5.1	0.96	<150	0.62	0.14
内湖					

水体 TN/TP 比是影响湖泊藻类活动的重要因素之一.在有机物充足的情况下,水体及沉积物中微生物的活动受 N、P 含量的限制.以 Redfield 提出的浮游植物生长最佳 TN:TP 质量比(7.2)为界.龙潭湖富营养化暴发期间,个别采样点水质 TN:TP 甚至低至 2,远低于深水湖(基本>10).这说明,龙潭湖富营养化可能并非水质浓度升高导致,而是水质结构变化的主要结果<sup>[19]</sup>.同时,由于湖泊深度较浅,水体无热分层,总体温度易受外界气温变化影响.富营养化期间,气温较常年高 5 左右,水温也随之升高,这有助于刺激藻类活性,使其大量繁殖,最终暴发水华<sup>[11]</sup>.

2.4.2 与下游大型富营养化浅水湖泊比较 我国大部分浅水湖泊分布在长江中下游地区,包括洞庭湖-江汉湖群,鄱阳-华阳湖群和太湖-三角洲湖群等,其多数已出现较严重的富营养化现象,水体 TN、TP 浓度均值为 1.81 和 0.10mg/L(2003~2008 年平均值)<sup>[9,18,20]</sup>.根据地理位置至上而下,其水体 TN、TP 浓度逐渐上升.龙潭湖水质较接近于处于相对上游的洞庭湖-江汉湖群(图 4).

流域下游浅水湖泊面积大,污染来源广,纳污量大.其中鄱阳湖仅通过赣江入湖的 TN 量即为 3.4 × 10<sup>4</sup>t/a,TP 5617t/a.太湖直接入湖量为 TN 7955t/a,TP 566t/a,远高于污染物来源较单一的上

游浅水湖泊<sup>[8-9,18,20]</sup>(表 1).大量营养盐随颗粒态物质沉积下来,使长江中下游主要湖泊(区)表层沉积物(0~10cm)TN 含量约在 0.7~7.5mg/g 之间,而龙潭湖为 1.29mg/g,处于较低水平,与湖北大冶市保安湖和安徽安庆市武昌湖相近<sup>[9,18,20]</sup>.龙潭湖沉积物 TP 含量(0.53mg/g)处于长江中下游湖泊表层沉积物(0.25~1.3mg/g)中等水平,与太湖相近.与巢湖相比(TN: 0.67mg/g, TP: 0.55mg/g),龙潭湖沉积物中 TN 含量偏高,TP 含量相近,远远低于 2000 年时处于重富营养化的杭州西湖沉积物的 TN 和 TP 含量<sup>[9,18,20]</sup>.作为外源输入单一的浅水湖泊,如此高的沉积物 TN 和 TP 含量值得重视.

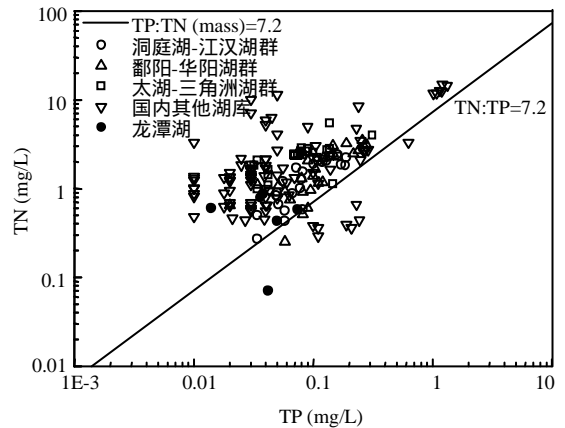


图 4 龙潭湖与国内主要浅水湖库水体 TN 和 TP 浓度比较<sup>[9,18,20]</sup>

Fig.4 Comparisons of TN and TP concentrations between the Longtan Lake and some main lakes in China<sup>[9,18,20]</sup>

研究表明,在湖泊水体的氮磷质量比(N/P)大于 7.2:1 时(氮磷原子数之比大于 16:1),磷是限制性营养元素,同时还影响藻种类的演替.水华暴发期间,龙潭湖水体 TN:TP 均值为 20.0,而沉积物 TN/TP 介于 1.7~4.0,靠近餐饮区一侧比值均小于 2.这说明沉积物中较高的 TP 含量为上覆水提供充足的 P 来源,可能是引发湖泊富营养化的原因之一.

然而,沉积物中 TN、TP 含量的大小只能作为水体 TN/TP 变化的参考.由于不同湖泊的沉积速率存差异很大,甚至同一湖泊的不同湖区也有很大差别,而且还存在沉积物的再悬浮、背景值

等问题,因此沉积物对上覆水及整个湖泊水体营养的贡献还需更进一步研究.

**2.4.3 内源磷释放机制** 龙潭湖沉积物 TN:TP (2.7)远低于水体 TN:TP(20.0)的现象,表明着 P 的内源释放在此次水华暴发过程中起着关键作用.然而流域上游浅水湖泊水动力条件与下游大型浅水湖泊有所不同,导致其内源磷释放机制存在差异.

流域上游浅水湖泊多地处水系发源地的山谷地区,湖面风速小,湖流低,悬浮物主要以颗粒有机物为主,且常年悬浮在水体中,在低扰动情况下颗粒物将逐步沉降,或絮凝成吸附点位更多的聚集体,不利于颗粒物表面磷酸盐释放.而在外源输入较少的情况下,上游浅水湖泊沉积物上覆水 TP 浓度一般较低,静态释放较之下游大型浅水湖泊强.而流域下游大型浅水湖泊,如太湖,湖流大(部分水区东西向湖流为  $-24.2\sim 31.0\text{cm/s}$ ),水-沉积物界面扰动十分频繁<sup>[9]</sup>.由风浪和湖流等水动力扰动引起的水力剪切易引起沉积物再悬浮,打破水-颗粒物边界交换平衡,这种物理扰动导致的磷酸盐释放将在内源磷释放中占主导地位<sup>[9]</sup>.

上游浅水湖泊沉积物磷酸盐的释放受温度和沉积物表面氧化还原条件的影响较大.一般而言,沉积物中的 P 主要以有机磷、铝结合态磷(Al-P)、铁结合态磷(Fe-P)和钙结合态磷(Ca-P)形式存在.Davison<sup>[21]</sup>于 1985 年提出了沉积物-水系统氧化还原边界层的概念.早期成岩过程中,沉积物中的 Fe 主要以沉积态形式存在. $\text{Fe}_3^+$ 易与  $\text{PO}_4^{3-}$  形成难溶的磷酸铁沉淀,而 Fe 形成的胶体对水体中游离性 P 也有较强的吸附能力<sup>[22-24]</sup>.夏季藻类大量繁殖后冬季逐渐消亡,累积的大量有机质降解可促进有机磷的降解释放.同时,有机质降低过程中消耗大量氧气,使水体趋于厌氧,沉积物中的 Fe 作为有机质降解的主要氧化剂从沉积物中被还原释放出来,进而释放出沉积物中的 P,扩散进入上覆湖水<sup>[25-26]</sup>.上游浅水湖泊容蓄小,水温对气温升高响应迅速,更加剧了内源 P 的释放.此外,由于龙潭湖地处喀斯特地貌区,Ca-P 应为沉积物结合态 P 的主要存在形式,而水体较高的 pH 值正好为 Ca-P 的释放提供了较好的外

部条件.

### 3 趋势预测

在山涧水以  $0.35\text{mg/L}$  TN 和  $0.085\text{mg/L}$  TP 浓度输入湖中,水力停留时间约 4d 的稳态情况下<sup>[11]</sup>,湖水的 TP 和 TN 浓度将维持在  $0.077\text{mg/L}$  和  $0.29\text{mg/L}$ (图 3).即 TP 浓度将高于当前值,而 TN 浓度比当前值略低.在内外因兼具情况下,水体可能再次发生富营养化.

将式(1)和(2)变型,求得达贫营养型水体的外源输入限值(表 3).可见,在入流浓度减少的情况下,湖水水质将有所改善,但 Jeppesen 等<sup>[27-28]</sup>和 Søndergaard 等<sup>[29]</sup>通过对全球 35 个湖泊(浅水湖泊约 20 个)长达 30 多年的外源削减研究发现,受内源释放影响,湖水 TP 浓度的降低将滞后 10~15a, TN 滞后  $<5\text{a}$ <sup>[27-29]</sup>.浅水湖泊因水层-底栖耦合作用强,且缺乏热分层,夏季内源释放明显高于深水湖泊,不利于富营养化的控制.

表 3 龙潭湖稳态水质与入流浓度预测

Table 3 The predictions of water quality in Longtan Lake and inflow water

参数	Vollenweider 模型		Danish 模型	
	TP (mg/L)	TP <sub>in</sub> (mg/L)	TN(mg/L)	TN <sub>in</sub> (mg/L)
稳态预测	0.077*	0.085	0.29*	0.35
入流预测	0.020	0.022*	0.25	0.30*

注:\*为预测值(计算值)

### 4 结论

4.1 流域上游浅水湖泊具有污染源少且单一的特点,较之深水湖泊水深浅(一般 $<10\text{m}$ ),难形成热分层,对外界温度变化响应灵敏.外界温度升高有助于刺激藻类活性,引发水华.

4.2 流域上游浅水湖泊中湖流等水动力条件比下游大型浅水湖泊差,不利于磷酸盐释放,营养盐长期滞留于沉积物中,为富营养化暴发埋下隐患.

4.3 流域上游的浅水湖泊内源磷释放主要受沉积物的氧化还原条件和温度影响.同时 TP 外源输入控制存在很强滞后性(TP 浓度的降低可滞后 10~15a),因此必须重视对内源释放的了解,才

## 能有效控制其富营养化的发生.

## 参考文献：

- [1] Daniel T C, Sharpley A N, Lemunyon J L. Agricultural phosphorus and eutrophication: A symposium overview [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998,27(2):251-257.
- [2] Edmondson W T, Anderson G C, Peterson D R. Artificial eutrophication of Lake Washington [J]. *Limnology and Oceanography*, 1956,1(1):47-53.
- [3] 陈宜瑜. 首届中国湖泊论坛(主旨报告) [R]. 2011.
- [4] Jin X, Xu Q, Huang C. Current status and future tendency of lake eutrophication in China [J]. *Science in China Series C: Life Sciences*, 2005,48:948-954.
- [5] Windolf J, Jeppesen E, Jensen J P, et al. Modelling of seasonal variation in nitrogen retention: a four-year mass balance study in 16 shallow lakes [J]. *Biogeochemistry*, 1996,33:25-44.
- [6] Vollenweider R A. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication [J]. *Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia*, 1976,33:53-83.
- [7] OECD. Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessments and Control [M]. Paris:OECD, 1982.
- [8] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探 [J]. *湖泊科学*, 2002,14(003):195-202.
- [9] 范成新, 王春霞. 长江中下游湖泊环境地球化学与富营养化 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [10] GB3838-2002 地表水环境质量标准 [S].
- [11] 边归国, 刘国祥, 陈克华. 福建龙岩市龙潭湖甲藻水华成因的研究 [J]. *中国环境科学*, 2010,30(12):1678-1682.
- [12] 黄滨松. 九龙江北溪甲藻水华期间各水质因子的检测及相关分析 [J]. *福建分析测试*, 2009,18(003):71-75.
- [13] 汤宏波, 胡 圣, 胡征宇, 等. 武汉东湖甲藻水华与环境因子的关系 [J]. *湖泊科学*, 2007,19(006):632-636.
- [14] 王海珍, 刘永定, 沈银武, 等. 云南漫湾水库甲藻水华生态初步研究 [J]. 2007,28(2):213-215.
- [15] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [16] 李荫玺, 刘 红, 陆 娅, 等. 抚仙湖富营养化初探 [J]. 2003, 15(3):285-288.
- [17] 方云英, 杨肖娥, 濮培民, 等. 宁波力洋水库富营养化现状及生态治理对策 [J]. 2004,18(6):183-186.
- [18] 张 敏. 长江中下游浅水湖泊富营养化机制与重金属污染研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院 (水生生物研究所), 2005.
- [19] Heisler J, Glibert P M, Burkholder J Mc. Eutrophication and harmful algal blooms: A scientific consensus [J]. *Harmful Algae*, 2008,8(1):3-13.
- [20] 朱广伟, 秦伯强, 张 路. 长江中下游湖泊沉积物中磷的形态及藻类可利用量 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005,35(S2): 24-32.
- [21] Davison W. Conceptual models for transport at a redox boundary [M]// *Chemical processes in lakes*. John Wiley and Sons, 1985:31-53.
- [22] Jensen H S, Kristensen P, Jeppesen E, et al. Iron: phosphorus ratio in surface sediment as an indicator of phosphate release from aerobic sediments in shallow lakes [J]. *Hydrobiologia*, 1992, 235(1):731-743.
- [23] Jacobsen O S. Sorption of phosphate by Danish lake sediments [J]. *Vatten*, 1977,33(3):290-298.
- [24] Petticrew E L, Arocena J M. Evaluation of iron-phosphate as a source of internal lake phosphorus loadings [J]. *The Science of the Total Environment*, 2001,266(1-3):87-93.
- [25] Davison W. Iron and manganese in lakes [J]. *Earth-Science Reviews*, 1993,34(2):119-163.
- [26] 李 兵, 袁旭音, 邓 旭. 不同 pH 条件下太湖入湖河道沉积物磷的释放 [J]. *生态与农村环境学报*, 2008,24(004):57-62.
- [27] Jeppesen E, Meerhoff M, Jacobsen B, et al. Restoration of shallow lakes by nutrient control and biomanipulation—the successful strategy varies with lake size and climate [J]. *Hydrobiologia*, 2007,581:269-285.
- [28] Jeppesen E, Søndergaard M, Jensen J P, et al. Lake responses to reduced nutrient loading – an analysis of contemporary long term data from 35 case studies [J]. *Freshwater Biology*, 2005, 50:1747-1771.
- [29] Søndergaard M, Jensen J P, Jeppesen E. Seasonal response of nutrients to reduced phosphorus loading in 12 Danish lakes [J]. *Freshwater Biology*, 2005,50:1605-1615.

致谢：实验水质监测数据由龙岩市环境监测站提供, 在此表示感谢.

作者简介：李 颖(1985-), 女, 福建宁德人, 厦门大学博士研究生, 主要从事流域地球化学研究. 发表论文 2 篇.