

南湖富营养化与气象影响因子的关系研究

覃鸿¹ 刘学² 黄菊梅¹ 王波³

(1 湖南省岳阳市气象局 414000; 2 湖南省华容县气象局 414200; 3 湖南省岳阳市生态环境局 414000)

摘要: 基于2004—2018年南湖的水质监测数据, 利用湖泊综合营养状态指数 ($TLI(\Sigma)$) 对南湖水质营养状况进行综合评价, 然后对南湖的 $TLI(\Sigma)$ 与各气象因子的关系进行研究。结果表明: 2004—2008年南湖水质富营养化程度呈明显的上升趋势, 2008年达到峰值, 呈中度富营养状态, 并且首次暴发蓝藻水华; 自2010年开始, 两监测点总体呈下降趋势。两监测点夏季 $TLI(\Sigma)$ 最高, 春季为次高, 冬季最低, 均呈明显的季节性波动。两监测点月 $TLI(\Sigma)$ 峰值均出现在7月, 谷值出现在10月。南湖水体富营养化程度麦子港比湖心高, 其可能原因是麦子港的人类活动影响更强。南湖 $TLI(\Sigma)$ 与气温、日照时数、风速呈现显著的正相关关系, 与气压呈现显著的负相关关系。春夏季, 气温与日照为形成南湖富营养化的主导因子。

关键词: 南湖, 水质评价, 富营养化, 气象因子

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.019

Study on the Relationship Between Eutrophication and Meteorological Impact Factors of the Nanhu Lake

Qin Hong¹, Liu Xue², Huang Jumei¹, Wang Bo³

(1 Yueyang Meteorological Bureau, Yueyang 414000 2 Huarong Meteorological Bureau, Huarong 414200

3 Yueyang Ecological Environment Bureau, Yueyang 414000)

Abstract: Based on the method of Lakes comprehensive nutrition state index $TLI(\Sigma)$, water quality monitoring data of Nanhu Lake from 2004 to 2018 was used to evaluate water quality of nutritional status in Nanhu Lake and then analyze its relationship with meteorological factors. It was shown that $TLI(\Sigma)$ in Nanhu Lake had an increase trend during the years of 2004 to 2008, and the $TLI(\Sigma)$ reached the maximum in 2008 when an outbreak of algae blooms first occurred, then there was a decrease trend after 2010. The $TLI(\Sigma)$ showed obvious seasonal fluctuations with the maximum in summer and the minimum in winter. For the monthly $TLI(\Sigma)$, it reached the maximum in July and the minimum in October. Compared with the Huxin station in the center of Nanhu Lake, the Maizigang station had higher $TLI(\Sigma)$. It should be related with stronger human activities. $TLI(\Sigma)$ and air temperature, sunshine time, wind speed had significantly positive correlation, but the air pressure was significantly negatively correlated with the $TLI(\Sigma)$. In spring and summer, temperature and sunshine were the dominant factors for causing the eutrophication of Nanhu Lake.

Keywords: Nanhu Lake, water quality evaluation, eutrophication, meteorological factor

0 引言

南湖位于岳阳市中心城区南侧, 西临东洞庭湖, 是岳阳城区最大的天然湖泊。20世纪80年代南湖清可见底, 主要受纳集雨区域内的地表水径流和部分经二至三级天然氧化塘处理后的生活废水, 并用作饮用水源。但自20世纪90年代以来, 由于岳阳城市化进程加快, 沿湖特别是北岸人口剧增, 以及度假区开发建设, 并在开发建设中填埋了90%以上的天然氧化塘, 导致大量城市污水未经处理直接排入南湖, 南湖水质迅速恶化^[1-2]。南湖已由20世纪70年代初的草型湖转变

为藻型湖, 水生态系统严重退化^[3]。

湖泊水体中氮、磷逐渐富集, 致使浮游藻类异常增殖, 水生生物多样性和生态系统稳定性降低, 进而使水体透明度下降, 水质恶化^[4-5]。国际经济发展合作组织(OECD)将“水体中由于营养盐的增加而导致藻类和水生植物生产力的增加、水质下降等一系列的变化, 从而使水的用途受到影响”的现象定义为湖泊的富营养化。水华是富营养化过程最为明显的表征。地理、水文和气象特征为水华暴发提供了合适的温度和水动力条件, 是水华暴发的外因, 草型湖向藻型湖的转变以及氮、磷营养盐的高负荷输入更利于蓝藻生长^[6]。大量研究表明, 气象因素对流域内水质变化存在显著影响, 水文气象因子对湖泊富营养化和蓝藻水

收稿日期: 2019年6月29日; 修回日期: 2019年12月16日

第一作者: 覃鸿(1974—), Email: qh0126@163.com

华暴发具有很重要的驱动作用^[7-13]。近些年南湖水质恶化,自2008年首次出现蓝藻水华后,至今南湖每年都会出现蓝藻水华现象,而目前对南湖水质作进一步研究的很少。因此,本文基于最新监测数据对近年来南湖水体富营养化趋势进行分析,并且对南湖水体富营养化与气象因子的相关关系进行研究,以期对南湖水环境保护协调发展提供科学的参考依据。

1 数据与研究方法

1.1 区域概况

南湖是洞庭湖东岸的一个大湖湾,原与洞庭湖相通,后因修筑大堤,与洞庭湖相分隔,仅出口处建有一个与洞庭湖相通的控制性闸口,成为了一个几近封闭的湖泊,湖水补给依赖湖面降水、集雨区径流水。南湖现有水面面积为11.83 km²,沿湖岸线50 km,平均水深3 m,最大水深9 m,最高控制水位27.68 m,正常蓄水量为3549万 m³,集雨面积约为150 km²,是岳阳抗御城市内涝、容纳城区集水的重要水体。

1.2 数据

水质数据为岳阳市环境监测中心提供的2004—2018年原始水质监测数据,监测点分别为位于南湖北岸的麦子港(29°35'N, 113°11'E)以及南湖湖心(29°33'N, 113°11'E)(图1)。每月在两个监测点同时取样1次,监测频率为每年12次,采样监测一般在当月上旬进行。气象数据来源于岳阳气象观测站。选取了月平均气温、月平均降雨量、月平均日照、月平均气压、月平均风速等气象数据,监测时段和频率与水质数据一致。若某次的某一水质观测数据为观测缺失值,则该日的气象指标值也不计入分析中。常年气候值采用30年平均值(1981—2010年),湖泊综合营养状态指数(TLI(Σ))常年值采用15年平均值(2004—2018年)。冬季为上年12月—当年2月,春季为3—5月,夏季为6—8月,秋季为9—11月。



图1 研究区域概况和监测点位置
Fig. 1 Study area and location of monitoring points

1.3 研究方法

采用SPSS 20.0软件进行数据分析。对监测站点水质按照综合营养状态指数法进行富营养化综合评价。选择Pearson算法对富营养化综合评价指数与气象因子进行相关性分析,探讨气象因子与南湖水体富营养化间的内在联系。富营养化综合评价的年、季、月变化趋势分别选取年度、季度、月度算术平均值进行统计。

1.4 评价方法

根据中国环境监测总站制定的《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》^[14],选取叶绿素a(Chla)、总磷(TP)、总氮(TN)、透明度(SD)和高锰酸盐指数(COD_{Mn})等为参数,采用综合营养状态指数法,对南湖水体营养状况进行评价。

综合营养状态指数计算公式为:

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m w_j \cdot TLI(j), \quad (1)$$

式中: w_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重, $TLI(j)$ 代表第 j 种参数的营养状态指数。以 $Chla$ 作为基准参数, w_j 的计算公式为:

$$w_j = r_{ij}^2 / \sum_{j=1}^m r_{ij}^2, \quad (2)$$

式中: r_{ij}^2 表示 $Chla$ 与其他参数之间的相关关系, 其值见表1^[14]。

表1 中国湖泊(水库)部分参数与Chla的相关关系^[14]
Table 1 Correlation between some parameters of Chinese lakes (reservoirs) and Chla^[14]

参数	Chla	TP	TN	SD	COD _{Mn}
r_{ij}^2	1	0.71	0.67	0.69	0.69

各参数的营养状态指数计算公式为:

$$TLI(Chla) = 10(2.5 + 1.086 \ln(Chla)), \quad (3)$$

$$TLI(TP) = 10(9.436 + 1.624 \ln(TP)), \quad (4)$$

$$TLI(TN) = 10(5.453 + 1.694 \ln(TN)), \quad (5)$$

$$TLI(SD) = 10(5.118 - 1.94 \ln(SD)), \quad (6)$$

$$TLI(COD_{Mn}) = 10(0.109 + 2.661 \ln(COD_{Mn})), \quad (7)$$

式中: $Chla$ 单位为 mg/m^3 , SD 单位为 m , 其他指标单位均为 mg/L 。

湖泊(水库)营养状态分级见表2,采用0~100的一系列连续数字对湖泊营养状态进行分级。在同一营养状态下,指数值越高,其营养程度越重。

2 结果与分析

2.1 南湖水体富营养状态的变化特征

根据2004—2018年南湖逐月水质监测数据,由叶

表2 湖泊(水库)营养状态分级^[14]

Table 2 Nutrient status classification of lakes (reservoirs) ^[14]

级别	范围
贫营养	$TLI(\Sigma) < 30$
中营养	$30 \leq TLI(\Sigma) \leq 50$
轻度富营养	$50 < TLI(\Sigma) \leq 60$
中度富营养	$60 < TLI(\Sigma) \leq 70$
重度富营养	$TLI(\Sigma) > 70$

绿素a (*Chla*)、总磷 (*TP*)、总氮 (*TN*)、透明度 (*SD*) 和高锰酸盐指数 (*COD_{Mn}*) 共5项指标分别计算湖心与麦子港的 *TLI*(Σ) 的逐年平均值 (图2)。两个监测点水体均长期稳定处于轻度富营养水平, 两监测点均在2008年呈现峰值, 2018年为近年来最低。两监测点多年季节平均 *TLI*(Σ) 均为夏季最高, 春季次高, 冬季最低, 呈明显的季节性波动。

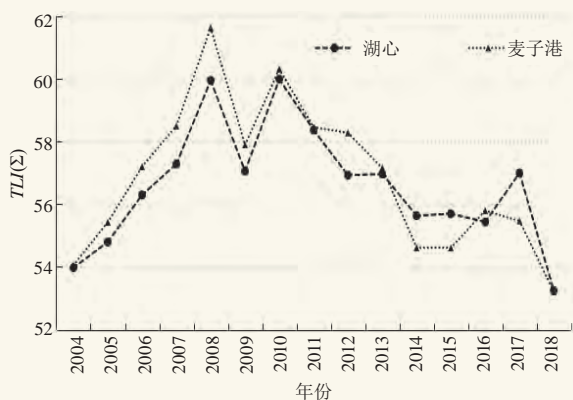


图2 2004—2018年南湖各测点 *TLI*(Σ) 逐年平均值

Fig. 2 The yearly *TLI*(Σ) average value at each monitoring point in Nanhu Lake from 2004 to 2018

2.2 南湖 *TLI*(Σ) 与气象因子的关系

利用2004—2018年水质监测数据, 将多项气象因子分别与湖心和麦子港 *TLI*(Σ) 进行相关分析 (表3) 可知, 两监测点 *TLI*(Σ) 与月平均气温、月均最高气温、月均最低气温、月日照时数、月平均风速均呈显著的正相关 ($P < 0.01$), 与月平均气压、月均最高气压、月均最低气压呈显著的负相关 ($P < 0.01$)。湖心 *TLI*(Σ) 与月降水量、月日降水量 ≥ 50 mm 日数有相关性 ($P < 0.05$), 而麦子港 *TLI*(Σ) 与月降水量、月日降水量 ≥ 50 mm 日数相关性不明显 ($P > 0.05$)。 *TLI*(Σ) 和日照、风速的相关系数麦子港比湖心的大, 与其他气象因子的相关系数湖心比麦子港的大。

2.3 影响气象因子分析

选取月平均气温、月平均日照时数、月平均风速、月平均气压作为气象影响因子进行分析。两监测点 *TLI*(Σ) 多年月平均值变化与月平均气温、月平均日照、月平均风速的变化趋势基本吻合, 与月平均气压

的反向变化趋势基本吻合 (图3)。

蓝藻的生长与水华的形成可以分为休眠、复苏、生长、上浮及聚集等4个阶段。蓝藻的生长速率和光合作用速率在25 °C以上显著增加^[15-16]。岳阳属亚热带季风湿润气候类型, 气温四季变化分明, 具有夏季酷热、隆冬寒冷的特征。每年10月—次年4月岳阳的月平均气温为5.1~19.4 °C; 5—9月月平均气温为22.9~29.5 °C, 其中7月为最热月 (图3a)。春季气温的升高使水中蓝藻逐步复苏及生长。进入夏季, 气温的急剧升高使得蓝藻水华形成所需的积温时间缩短, 有利于蓝藻的生长。同时降水的减少使水体中的污染物和营养盐浓度升高, 富营养化程度加大, 更有利于蓝藻的生长, 水质进一步恶化。

在水中, 蓝藻大量繁殖时需要较多的光照。岳阳日照充足, 各月平均日照时数为74.0~229.8 h, 为藻类生长提供了良好的光照条件。岳阳的日照时数以7月日照最长 (图3b)。

沉积物中积累了大量营养盐的情况下, 强烈的风浪扰动使得沉积物与水体的营养盐交换频繁, 能够快速补充水华暴发期间的营养盐需求, 同时风力作用使上浮蓝藻水华聚集在下风处, 发生“淘洗作用”而对水华发生较为有利。风速的下降使得对水体的搅动减小, 有利于蓝藻生长发育和向某一区域漂移聚积, 气压偏低, 利于蓝藻颗粒上浮到水体表面, 对蓝藻的暴发较为有利^[15-17]。岳阳各月平均风速为2.3~3.2 m/s, 其中6月风速为2.3 m/s, 7月为3.2 m/s (图3c)。岳阳的各月平均气压为997.9~1021.2 hPa, 7月气压最低, 12月最高 (图3d)。

随着春季温度的升高与日照的增多, 两监测点 *TLI*(Σ) 显示南湖水体富营养程度增大明显。6月的风速比5月的小, 同时气压偏低, 有利于蓝藻生长发育, 并且由湖心向麦子港方面漂移聚积; 7月风力增大, 利于蓝藻颗粒上浮到水体表面, 有利于蓝藻上浮聚集。两监测点夏季 *TLI*(Σ) 最大, 是南湖暴发蓝藻水华的高发时段。10月开始, 随着气温的降低, 至次年2月水中蓝藻处于休眠期, 南湖水体富营养化程度随之减小。因此, 春夏季气温与日照为形成南湖富营养化的主导因子, 风速与气压为次要因子。

3 典型气候条件对水质富营养化影响的分析

3.1 2007—2008年南湖 *TLI*(Σ) 实况

南湖两监测点2007年春季 *TLI*(Σ) 较常年偏低, 从5月开始呈上升趋势。进入夏季后 *TLI*(Σ) 迅速升高, 8月达到最高, 湖心和麦子港分别为69.53、67.41, 为湖心和麦子港历年最高值。直至2008年3月两监测点

表3 南湖各测点TLI(Σ)与气象因子的相关性分析

Table 3 The correlation analysis between TLI(Σ) and meteorological factors at each monitoring point in Nanhu Lake

TLI(Σ)	气象因子											
	月平均气温	月均最高气温	月均最低气温	月降水量	月日降水量 ≥ 0.1 mm日数	月日降水量 ≥ 50 mm日数	月日照时数	月平均气压	月均最高气温	月均最低气温	月平均风速	
麦子港	相关系数	0.233**	0.236**	0.230**	0.086	0.053	0.118	0.270**	-0.285**	-0.280**	-0.294**	0.316**
	显著性	0.002	0.002	0.002	0.256	0.482	0.118	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
湖心	相关系数	0.262**	0.260**	0.263**	0.154*	0.102	0.150*	0.239**	-0.324**	-0.319**	-0.333**	0.271**
	显著性	0.000	0.000	0.000	0.04	0.177	0.046	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000

注: **表示在0.01水平(双侧)上显著相关, *表示在0.05水平(双侧)上显著相关。

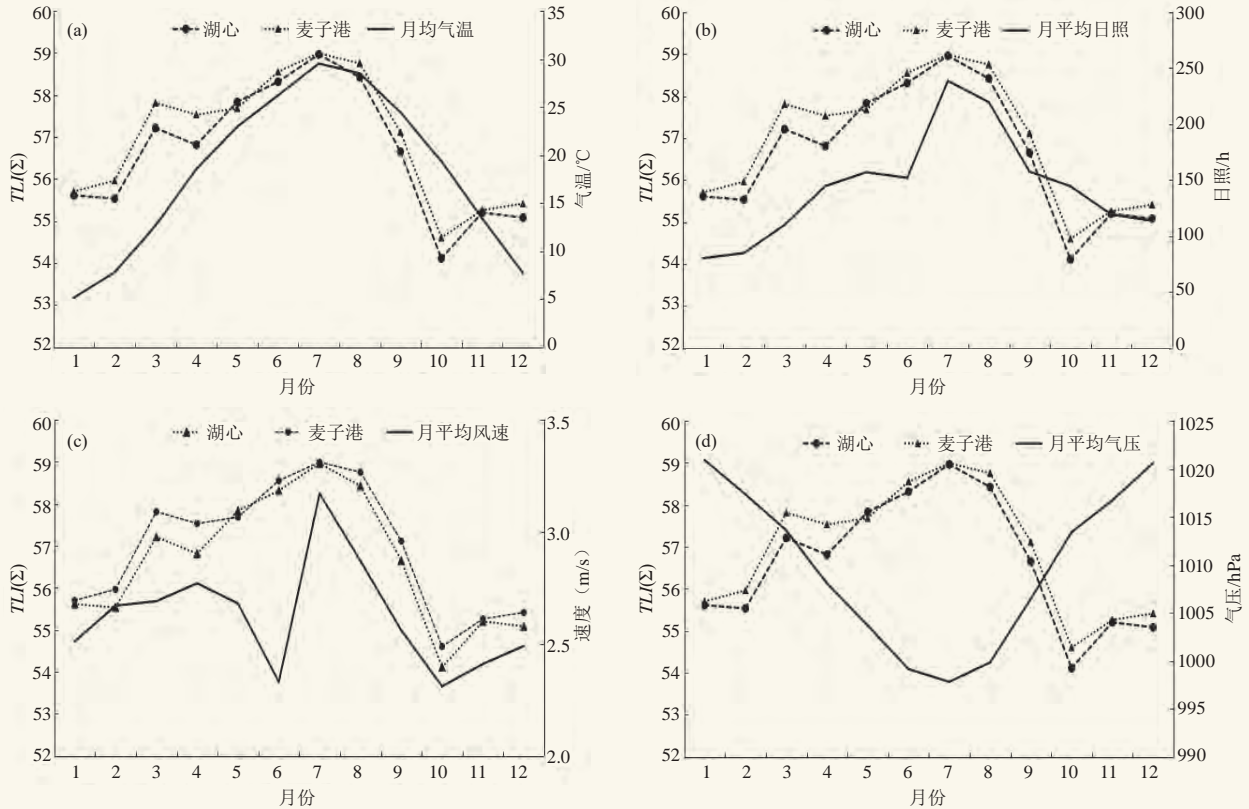


图3 2004—2018年南湖各测点月平均TLI(Σ)与月平均气温(a)、月平均日照(b)、月平均风速(c)、月平均气压(d)时间变化特征

Fig. 3 Monthly average TLI(Σ) and monthly average temperature (a), monthly average sunshine (b), monthly average air pressure (c), monthly mean wind speed (d) at each measuring point of South Lake from 2004 to 2018

TLI(Σ)均较常年偏高(图4)。

3.2 2007—2008年气候实况

2007年岳阳四季气温都较历史同期偏高,冬季为暖冬,入春、入夏均较常年早,夏季延长,并且2月和5月月平均气温均为当地自1952年以来的最高值。3月末出现连续多日日最高气温 ≥ 30.0 °C、5月下旬初出现了 ≥ 35.0 °C的高温天气。2007年岳阳日照时数除夏季较常年偏少外,其余各季较常年均偏多。春、夏季风速较常年偏高。平均气压冬、春、夏季均较常年偏高。岳阳2008年年初出现了1954年以来最具规模的低温雨雪冰冻天气,但2008年春季气温打破了当地56

年来最高记录,夏秋气温继续偏高。日照偏多,月平均风速全年持续偏大。

3.3 南湖水体富营养化气候条件影响的分析

2007年,岳阳春季气温的急剧升高与强光照有利于蓝藻生长,使得蓝藻水华形成所需的积温时间提前。风浪所产生扰动作用使湖体内源负荷明显增强。因此,2007年夏季以来南湖水体富营养化程度持续较高。蓝藻水华的出现,从表现现象上看确实是瞬时的“暴发”,但是其本质却有一个逐渐发展与形成过程,是藻类生物量水体中的逐渐增加的一个缓慢的过程^[18]。2008年冬季岳阳遭遇当地自1954年以来最具规

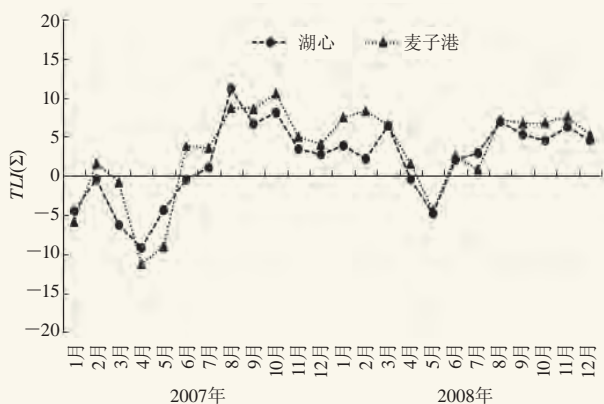


图4 2007—2008年南湖两监测点逐月 $TLI(\Sigma)$ 距平的变化
Fig. 4 Monthly $TLI(\Sigma)$ anomaly changes at two monitoring points in Nanhu Lake from 2007 to 2008

模的低温雨雪冰冻天气，虽然气温偏低，但蓝藻正处于休眠期，对其生长并无大影响，而春、夏季气温持续偏高，有利于蓝藻的生长。2008年年平均风速较常年偏高，气压偏低，说明南湖湖面受到大风的瞬时扰动增多。在强烈风扰动下，表层沉积物受水体的冲击较大，利于蓝藻颗粒上浮到水体表面，使悬浮的量增多，对蓝藻的暴发较为有利。因此受2007年夏季以来水体蓝藻基数较高、上游截污管网不到位等因素影响，2008年南湖暴发了首次蓝藻水华。

由此可见，气温异常偏高、日照偏多、风速偏大等多种气象要素的综合作用是造成2007年南湖水体富营养程度高以及2008年南湖首次暴发蓝藻水华现象的气象因素。

4 小结

气象因素是形成南湖富营养化的重要条件之一。春、夏季气温与日照为形成南湖水体富营养化的主导因子。南湖水体长期稳定处于轻度富营养水平，且富营养程度偏高，这与全球气候变暖使水体春季升温提前，秋季温度下降时间延迟，延长了蓝藻生长的时间有关。南湖水域主要功能包括风景名胜、水上娱乐、水产养殖、防洪蓄水及纳污自净。麦子港位于南湖北面的湖汊，富营养程度高于湖心，最主要的原因是岳阳市南湖周边大量生产生活的污染物进入水体，增加了总磷和总氮浓度，使水体富营养化居高不下。由于南湖水体目前长期稳定处于轻度富营养水平，岳阳的气候条件决定了南湖的蓝藻水华现象在短期内不会完

全解决。

水流流量对水华有限制作用，因修筑大堤，南湖人为地成为了一个几近封闭的湖泊，这也是造成南湖水质富营养化状态居高不下的原因之一。南湖已于2018年下半年与洞庭湖重新连通，水流交换有助于南湖水体的富营养状态的进一步缓解。对于水流流量对南湖水质富营养化的影响，可在将来的工作做进一步分析。

自2010年开始，南湖富营养化程度总体呈下降趋势，2018年 $TLI(\Sigma)$ 为近年来最低，这应该与当地政府按照“截污、禁养、清淤、活水、严管”治理方针治理南湖有关，使入湖氮、磷负荷得到有效削减，减缓了南湖水体富营养化进程。

参考文献

- [1] 葛大兵, 廖柏寒, 程育芝, 等. 岳阳南湖水环境现状评价及对策. 湖南农业大学学报, 2001, 27(2): 128-129.
- [2] 葛大兵, 廖柏寒, 程育芝, 等. 岳阳南湖水环境容量研究. 湖南农业大学学报, 2001, 27(4): 321-323.
- [3] 简永兴, 王建波, 何国庆, 等. 洞庭湖区三个湖泊水生植物多样性的比较研究. 水生生物学报, 2006, 30(2): 160-167.
- [4] Reynold CS. The Ecology of Freshwater Phytoplankton (Cambridge Studies in Ecology). Cambridge: Cambridge University Press, 1984.
- [5] 杜桂森. 浮游植物与淡水湖泊的富营养化. 生物学通报, 1990, (5): 25, 43.
- [6] 杨柳燕, 杨欣妍, 任丽曼, 等. 太湖蓝藻水华暴发机制与控制对策. 湖泊科学, 2019, 31(1): 18-27.
- [7] 林素梅, 王圣瑞, 金相灿, 等. 湖泊表层沉积物可溶性有机氮含量及分布特性. 湖泊科学, 2009, 21(5): 623-630.
- [8] 任健, 蒋名淑, 商兆堂, 等. 太湖蓝藻暴发的气象条件研究. 气象科学, 2008, 28(2): 221-226.
- [9] 王成林, 张咏, 张宇红, 等. 太湖藻源性“湖泛”形成机制的气象因素分析. 环境科学, 2011, 32(2): 401-408.
- [10] 吕兴娜, 尚佰晓. 降雨径流对柴河水库总磷、总氮的水质影响分析. 中国环境管理干部学院学报, 2011, 21(2): 64-66.
- [11] 刘乐, 蔡敏, 陈非洲, 等. 模拟酸雨对不同营养水平湖泊pH值的影响. 生态与农村环境学报, 2018, 34(10): 917-923.
- [12] 王丽, 唐纪伟. 螺旋藻生长的气象条件分析. 山东气象, 1998, 18(4): 43-45.
- [13] 王成林, 潘维玉, 韩月琪, 等. 全球气候变化对太湖蓝藻水华发展演变的影响. 中国环境科学, 2010, 30(6): 822-828.
- [14] 金相灿, 刘树坤, 章宗涉, 等. 中国湖泊环境. 北京: 海洋出版社, 1995.
- [15] 范成新, 张路, 秦伯强, 等. 风浪作用下太湖悬浮态颗粒物中磷的动态释放估算. 中国科学 (D辑), 2003, 33(8): 760-768.
- [16] 孔繁翔, 马荣华, 高俊峰等. 太湖蓝藻水华的预防、预测和预警的理论与实践. 湖泊科学, 2009, 21(3): 314-328.
- [17] Wu T F, Qin B Q, Brookes J, et al. The influence of changes in wind patterns on the areal extension of surface cyanobacterial blooms in a large shallow lake in China. Science of the Total Environment, 2015, 518: 24-30.
- [18] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考. 生态学报, 2005, 25(3): 589-595.