

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2020030401

刘绍俊, 施艳峰, 翟竞余, 等. 星云湖微囊藻密度周年变化及其与水质指标的关系[J]. 环境化学, 2021, 40(7): 2064-2072.

LIU Shaojun, SHI Yanfeng, ZHAI Jingyu, et al. Annual variations of *Microcystis* density and their relationships with water quality indices in Xingyun Lake[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40 (7): 2064-2072.

星云湖微囊藻密度周年变化及其与水质指标的关系

刘绍俊* 施艳峰 翟竞余 周书祥 吉正元

(云南省生态环境厅驻玉溪市生态环境监测站, 玉溪, 653100)

摘要 为探究星云湖微囊藻密度周年变化及其与水质指标的关系. 基于2017年12月至2018年11月星云湖浮游藻类密度和部分水质理化指标的监测数据, 分析了微囊藻密度和优势度周年变化特征, 通过Pearson相关分析和多元逐步回归分析探讨了星云湖微囊藻密度周年变化与水质指标间的相互关系. 结果表明, 微囊藻是星云湖浮游藻类群落组成的绝对优势属, 周年内优势度高达0.821—0.995. 微囊藻密度月度变化明显, 变化范围 4.97×10^7 — 7.79×10^8 cells·L⁻¹, 年均 2.94×10^8 cells·L⁻¹, 最大值出现在2018年6月, 最小值出现在2018年3月. 从季节上看, 夏秋季密度相对较高, 分别达 4.55×10^8 cells·L⁻¹和 3.90×10^8 cells·L⁻¹; 春季次之, 为 2.09×10^8 cells·L⁻¹; 冬季最低, 为 1.21×10^8 cells·L⁻¹. Pearson相关性分析和多元逐步回归分析结果表明, WT、TP、BOD₅和N/P是与星云湖微囊藻密度周年变化密切相关的主要水质指标.

关键词 星云湖, 微囊藻, 水质指标, 多元逐步回归分析.

Annual variations of *Microcystis* density and their relationships with water quality indices in Xingyun Lake

LIU Shaojun* SHI Yanfeng ZHAI Jingyu ZHOU Shuxiang JI Zhengyuan

(The Ecological and Environmental Monitoring Station of Department of Ecology and Environment of Yunnan Province in Yuxi, Yuxi, 653100, China)

Abstract This study aims to explore the relationships between annual variations of *Microcystis* density and water quality indices in Xingyun Lake. Based on the monthly monitoring data of planktonic algae density and some physicochemical indices of water quality in Xingyun Lake from December 2017 to November 2018. The characteristics of annual variations of *Microcystis* density and dominance were analyzed, and then the relationships between annual variations of *Microcystis* density and water quality indices were studied by Pearson correlation analysis and multiple stepwise regression analysis. The results showed that, *Microcystis* was the absolute dominant genera in Xingyun Lake, with its annual dominance of 0.821—0.995. The *Microcystis* density in different months changed significantly, ranging from 4.97×10^7 cells·L⁻¹ to 7.79×10^8 cells·L⁻¹ (average in 2.94×10^8 cells·L⁻¹), the highest density appeared in June 2018, and the lowest density appeared in March 2018. The *Microcystis* density changed seasonally, with its relatively high density in summer (4.55×10^8 cells·L⁻¹) and autumn (3.90×10^8 cells·L⁻¹), and then, followed by spring (2.09×10^8 cells·L⁻¹), the lowest density appeared in winter (1.21×10^8 cells·L⁻¹). Pearson correlation analysis and multiple stepwise regression analysis showed that, the main water quality indices that closely

2020年3月4日收稿(Received: March 4, 2020).

* 通讯联系人 Corresponding author, Tel: 18087714959, E-mail: liushaojun998@126.com

related with the annual variations of *Microcystis* density in Xingyun Lake were WT, TP, BOD₅ and N/P, respectively.

Keywords Xingyun Lake, *Microcystis*, water quality indices, multiple stepwise regression analysis.

蓝藻水华暴发是湖泊富营养化的典型特征^[1]. 蓝藻水华的暴发不仅影响水体自然景观和城市供水,而且有毒蓝藻产生的微囊藻毒素(microcystin, MC)严重危害着水生态系统的安全^[2]. 能够形成蓝藻水华的藻类包括微囊藻(*Microcystis*)、鱼腥藻(*Anabaena*)、颤藻(*Oscillatoria*)和束丝藻(*Aphanizomenon*)等,有时直链硅藻(*Melosira*)也伴随蓝藻大量滋生^[3],但微囊藻水华是被公认为发生最多、影响范围最广的蓝藻水华^[4]. 我国众多湖库均有微囊藻水华暴发的报道^[4-7].

藻类密度是湖库水质和营养型评价中最基本的藻类生物学指标之一^[8]. 藻类密度是直接反映水体中藻类聚集程度的指标,而浮游藻类的生长受到多种环境因子的制约^[9]. 特定的水体中,环境因子对藻类的影响作用各不相同. 近年来,学者们对不同水体微囊藻密度时空分布及其影响因素开展了大量研究^[10-12],但这些研究主要集中在微囊藻水华期间进行,对于微囊藻密度在较长时间尺度下的变化及其与水质因子的关系研究较为少见.

星云湖(24°17'—24°24'N, 102°45'—102°49'E)是云南省九大高原湖泊之一,属于珠江流域南盘江水系源头湖泊,水域面积 34.7 km²,平均水深 7 m^[13]. 随着流域内社会经济的快速发展,入湖污染负荷总量不断增加,星云湖水体富营养化程度不断加剧. 根据玉溪市环境监测站资料,自 2002 年以来,星云湖以微囊藻为绝对优势类群的蓝藻水华频繁发生,湖泊生态系统日益恶化. 因此,有必要对星云湖微囊藻种群数量变化及其机制进行研究. 目前,已有学者^[14-15]对星云湖浮游藻类群落结构进行了调查,并对微囊藻密度及优势度进行了分析,但以上调查只是针对部分月份进行,并不能全面表征星云湖微囊藻种群数量的动态变化;同时,星云湖微囊藻密度变化与水质指标的相关性研究也尚未见报道.

本研究基于 2017 年 12 月至 2018 年 11 月星云湖藻类密度及部分水质理化指标监测数据,分析了星云湖微囊藻密度及优势度周年变化特征,同时筛选出了与微囊藻密度变化密切相关的水质指标,旨在为星云湖微囊藻水华的防控及治理提供基础资料.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 数据来源

本研究用于分析的数据来源于玉溪市环境监测站 2017 年 12 月至 2018 年 11 月例行监测数据,具体包括微囊藻密度、藻类总密度、水温(WT)、pH 值、电导率(Cond)、氨氮(NH₃-N)、总氮(TN)、总磷(TP)、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、五日生化需氧量(BOD₅)、化学需氧量(COD_{Cr})和氮磷比(N/P)等 13 项生物、理化指标.

全湖共设置 3 个例行监测点位(图 1),其中 S1 位于湖泊南部(省控点),S2 位于湖泊中心(国控点),S3 位于湖泊北部(省控点). 于每月上旬对各点位浮游藻类及理化指标进行表层(水面下 0.5 m)和深层(水面下 6 m)采样分析. 其中,浮游藻类定量样品为表层和深层混合样(各 0.5 L),样品处理参考《水和废水监测分析方法(第四版)》^[16]进行,浮游藻类鉴定参考《中国淡水藻类—系统、分类及生态》^[17]等资料进行,样品鉴定到属水平. 理化指标样品不进行表深层混合,同一点位表深层样品分别测定后取算术平均值代表该点位值. WT 采用现场温度计法测定; pH 采用玻璃电极法测定; Cond 采用实验室电导率仪法测定; NH₃-N 采用纳氏试剂分光光度法测定; TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定; TP 采用钼酸铵分光光度法测定; DO 采用碘量法测定; COD_{Mn} 采用酸性高锰酸钾法测定; BOD₅ 采用稀释与接种法测定; COD_{Cr} 采用重铬酸盐法测定.

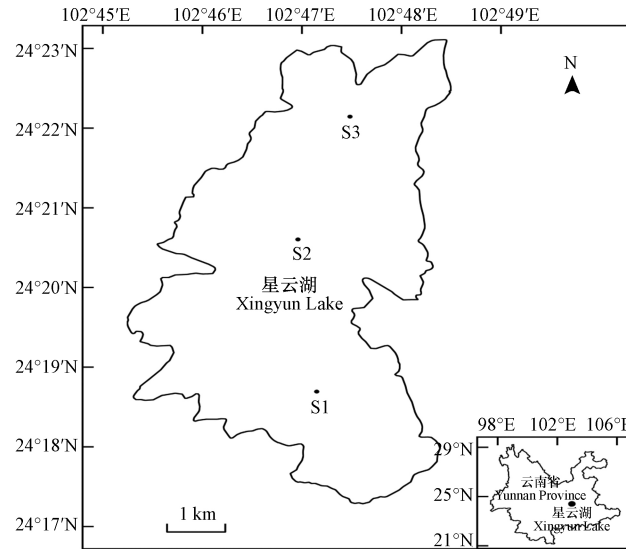


图1 采样点位分布

Fig.1 Distribution of sampling sites

1.2 数据处理及分析

根据微囊藻密度占比及出现率计算其优势度(Y), 公式为: $Y=N_i/N \times f_i$, 式中, N_i 为微囊藻密度, N 为藻类总密度, f_i 为微囊藻的出现率.

微囊藻密度、优势度及水质理化指标取月均值(3个点位算术平均值)进行周年变化分析. 将所有数据在 Excel2003 中建立基础数据库, 采用 SPSS13.0 对微囊藻密度和 11 项水质指标进行 Pearson 相关性分析和多元逐步回归分析, 筛选出与星云湖微囊藻密度周年变化密切相关的水质指标. 相关分析前, 经 K-S 方法检验, 所有变量均满足正态分布.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 水质指标周年变化

星云湖水水质理化指标周年变化情况如表 1 和图 2 所示. 其中, WT 波动范围为 10.5—23.6 °C, 年均 18.8 °C, 最低出现在 2 月, 最高出现在 7 月. pH 值变化范围 8.89—9.40, 年均 9.16, 显示了星云湖水体呈弱碱性, 最低出现在 3 月, 最高出现在 11 月. $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度变化范围为 0.118—0.546 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 年均 0.246 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 最低出现在 11 月, 最高出现在 3 月.

表 1 星云湖水水质理化指标周年变化($n=12$)

Table 1 Annual variations of physico-chemical indices of water quality in Xingyun Lake

水质指标 Water quality indices	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准偏差 Standard deviation
WT/°C	10.5	23.6	18.8	4.3
Cond/($\text{ms}\cdot\text{m}^{-1}$)	37.2	55.1	48.0	4.9
pH	8.89	9.40	9.16	0.17
$\text{NH}_3\text{-N}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.118	0.546	0.246	0.121
TN/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.96	1.79	1.24	0.25
TP/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.10	0.36	0.23	0.10
DO/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	5.83	9.20	7.89	1.03
$\text{COD}_{\text{Mn}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	4.9	7.8	6.1	0.8
$\text{BOD}_5/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	1.1	7.1	3.0	1.7
$\text{COD}_{\text{Cr}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	28	37	33	3
N/P	3.4	12.9	6.5	3.2

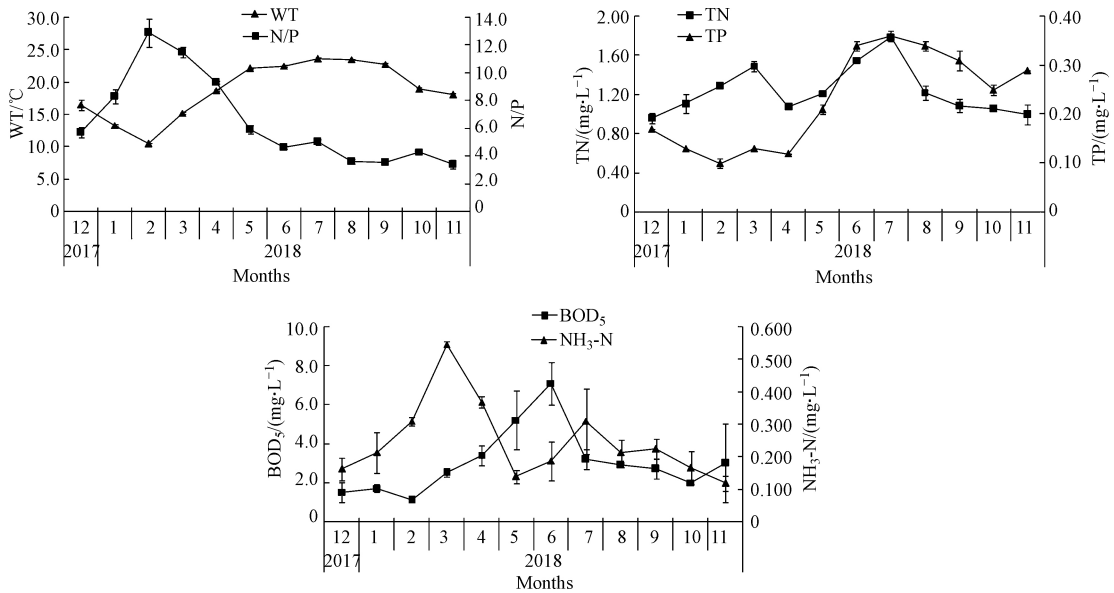


图2 星云湖部分理化指标周年变化

Fig.2 Annual variations of some physico-chemical indices of water quality in Xingyun Lake

TN 浓度在 $0.96\text{--}1.79\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 间变化, 年均 $1.24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 最低为 12 月, 最高为 7 月. TP 浓度在 $0.10\text{--}0.36\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 间变化, 年均 $0.23\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 2 月最低, 7 月最高. N/P 变化范围 $3.4\text{--}12.9$, 年均 6.5 , 11 月最低, 2 月最高. BOD₅ 变化范围 $1.1\text{--}7.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 年均 $3.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 最低出现在 2 月, 最高出现在 6 月.

2.2 微囊藻密度及优势度周年变化

星云湖微囊藻密度周年变化见图 3a. 结果显示, 周年内星云湖微囊藻密度存在明显的月际变化特征, 变化范围 $4.97\times 10^7\text{--}7.79\times 10^8\text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$, 年均 $2.94\times 10^8\text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$. 12 月、1 月微囊藻密度水平基本一致, 2 月、3 月明显降低, 3 月为全年最低值, 4 月后密度呈指数增长, 6 月达最高, 7 月密度虽有所降低, 但仍处于较高值, 7—11 月间波动不大. 孙千千等^[18]对太湖梅梁湾和贡湖湾微囊藻周年(2010 年 7 月至 2011 年 6 月)变化研究发现, 两湾微囊藻平均密度在 7 月达最高, 7—10 月间, 微囊藻密度虽起伏变化, 但总体维持在较高水平, 11 月后密度大幅降低, 次年 1—4 月水体微囊藻较少, 5—6 月密度开始逐渐增大. 李原等^[5]对滇池微囊藻密度年变化(2001 年 9 月至 2002 年 7 月)的研究表明, 滇池微囊藻密度从 9 月份开始呈下降趋势, 1 月份降至最低, 而后又逐渐升高, 7 月份达到最高值. 以上表明星云湖与太湖梅梁湾和贡湖湾、滇池水体中微囊藻密度周年变化特征有所相似. 从季节上看, 夏季(6—8 月)和秋季(9—11 月)微囊藻密度平均值相对较高, 分别达 $4.55\times 10^8\text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3.90\times 10^8\text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$; 春季(3—5 月)次之, 为 $2.09\times 10^8\text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$; 冬季(12—2 月)最低, 为 $1.21\times 10^8\text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$. 表明星云湖微囊藻密度具有明显的季节性变化特征, 这种变化趋势与微囊藻水华发生规律较为吻合, 夏秋季为星云湖微囊藻水华暴发期, 细胞密度较高, 而冬春季水华发生频次和规模相对较小, 因此微囊藻密度水平也相对较低; 星云湖微囊藻水华一年四季均有出现, 相同的情况在滇池^[5]和太湖^[19]也有发生.

周年内星云湖微囊藻密度占藻类总密度比例极高, 其优势度高达 $0.821\text{--}0.995$ (图 3b). 微囊藻属是星云湖各月份浮游藻类组成的绝对优势类群, 其密度水平决定了星云湖浮游藻类密度的总水平. 星云湖浮游藻类优势种群无季节演替, 这与 Sommer 等^[20]提出的 PEG 模型中, 浮游藻类冬春季以硅藻和隐藻占优, 夏季以绿藻占优, 夏末秋初则以蓝藻占优, 秋季硅藻再次占优的季节演替规律完全不符, 分析认为这可能与湖泊营养状态有关. 同时, 对比前人研究还发现, 星云湖微囊藻密度及优势度水平远高于太湖^[21]和滇池^[5, 22]等富营养型湖泊. 根据况琪军等^[8]湖泊营养类型评价中藻类密度指标标准, 仅从微囊藻密度加以评价, 周年内星云湖除 2 月、3 月水体营养状态为中富营养型外, 其余 10 个月份均为极富营养型, 表明星云湖水体受污染程度尤为严重.

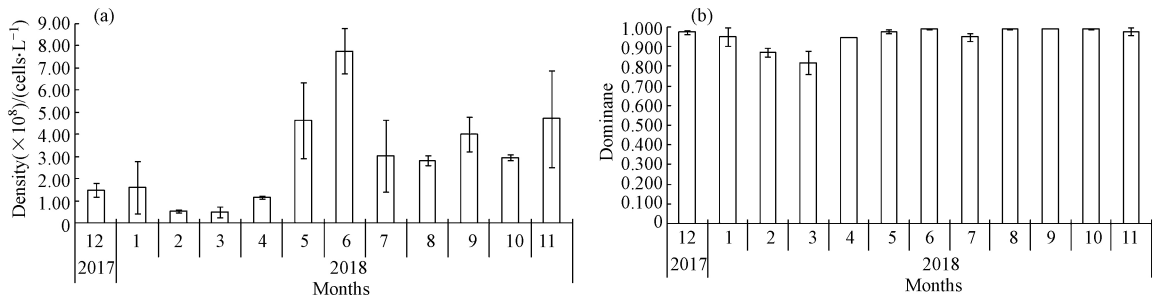


图3 星云湖微囊藻密度(a)和优势度(b)周年变化

Fig.3 Annual variations of *Microcystis* density and dominance in Xingyun Lake

本研究中,周年内星云湖微囊藻密度及优势度水平均处于较高值,分析认为引起这种现象的原因可能是多方面的:一是湖泊内外源污染严重,湖滨带生态功能退化.罗玉等^[23]研究表明,近20年来,星云湖水体中N、P污染指标呈明显上升趋势,这与流域内面源污染负荷的产生量和入湖量显著增加相关,“十五”、“十一五”和“十二五”期间,星云湖流域TP污染负荷年均产生量分别为382.20、589.87、346.80 t, TN污染负荷年均产生量分别为2694.90、3292.44、1827.11 t.自2000年至今,星云湖湿地建设工作虽持续开展,但湖滨带的建设总体较为分散零星,且缺乏后续的管护资金投入,导致已建成的河口湿地物种组成单一,生物多样性受损,湖滨带生态功能退化^[24],失去了应有的缓冲、拦截作用.同时,出流改道后星云湖自西南角出水,微囊藻吸收了水体中营养盐后随常年盛行的西南风逆吞吐水流移动,不利于营养盐随水流输出,导致营养盐在湖体中形成富集机制^[15],又一次为微囊藻的生长提供了营养物质.二是沉水植物退化消亡严重.沉水植物是维护水生生态系统多样性的基础,能够消耗水中大量的氮、磷等物质,对有毒藻类的生长具有明显的抑制作用^[25].研究表明,星云湖沉水植物分布面积和分布深度分别由1984年的7.85 km²和4.2 m以内缩减至2000年的0.72 km²和2.5 m以内^[26];而2008年星云湖沉水植物分布面积约为0.6 km²,盖度约1.8%^[14].三是大型浮游动物种群数量减少.施海彬等^[27]研究表明,在太湖新银鱼捕食压力增强的背景下,星云湖桡足类与枝角类等浮游动物的生物量受到了捕食压力的抑制作用,但桡足类下降更为明显;2005年以来,星云湖象鼻溞(*Bosmina*)个体大小出现明显波动并呈总体下降趋势,同时象鼻溞与*Daphnia longispina* group生物量总体下降.由此,来自浮游动物对微囊藻的捕食压力也随之减小.四是微囊藻自身生存特点.群体微囊藻对营养盐、温度和DO等具有较广的适应范围^[28].微囊藻细胞聚集成较大群体后,可以有效抵御浮游动物的捕食,在一定程度上促使小型单细胞绿藻、硅藻等生物量的降低,使得大型或群体的藻类占优势^[21].同时,微囊藻在自然界中具有很多竞争优势,如可以通过伪空胞调节自身浮力,以接受更多的光照;通过他感作用影响其他藻类的生长;其数量较大并趋向于水面分布时,还可以通过遮光效应导致其他种类的减少^[29].综合以上分析认为,星云湖多年的污染加剧及治理不善,使水体营养盐等赋存量保持在较高水平,为藻类的生长繁殖提供了丰厚的物质基础,随着沉水植物及大型浮游动物的不断减少,加之微囊藻自身所具备的生存优势等一系列原因,导致了微囊藻成为周年内星云湖浮游藻类的绝对优势类群,并具有较高的密度水平.星云湖由草型湖泊转变为典型的藻型湖泊,标志着星云湖水生态系统功能的严重退化.

2.3 微囊藻密度周年变化与水质指标的关系

2.3.1 相关性分析

对星云湖各月份微囊藻密度与11项理化指标进行了Pearson相关分析(表2).由于微囊藻具伪空胞,易自由漂浮,加之其易受风浪和湖流等影响而发生迁移,因此微囊藻密度的空间分布可能受自身生理特性以及采样期间风向风速、水体流场、水体营养状态等多种因素的共同影响.

表2 微囊藻密度与水质指标之间的Pearson相关系数($n=12$)

Table 2 Pearson's correlation coefficient between *Microcystis* density and water quality indices($n=12$)

	WT	Cond	pH	TN	TP	NH ₃ -N	DO	COD _{Mn}	COD _{Cr}	BOD ₅	N/P
微囊藻密度	0.656*	0.610*	0.521	0.179	0.732**	-0.584*	0.133	0.400	0.447	0.827**	-0.695*

注: *表示在0.05水平(双侧)上显著相关; **表示在0.01水平(双侧)上极显著相关.

Note: *Correlation is significant at $P<0.05$ (two-tailed); **Correlation is significant at $P<0.01$ (two-tailed).

本研究旨在时间尺度下分析星云湖微囊藻密度变化特征及其与水质指标的关系, 为避免其它因素对分析结果带来干扰, 故微囊藻密度及水质指标取月均值进行分析. 分析数据显示, 微囊藻密度与 TP 和 BOD₅ 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 WT 和 Cond 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与 NH₃-N 和 N/P 呈显著负相关 ($P < 0.05$).

2.3.2 多元逐步回归分析

根据相关性分析结果, 以 TP、BOD₅、WT、Cond、NH₃-N 和 N/P 等 6 项与微囊藻密度具有显著相关的水质指标为自变量, 微囊藻密度为因变量, 通过多元逐步回归分析进一步筛选与星云湖微囊藻密度周年变化关系最为密切的水质指标, 建立最优的多元线性回归方程, 并对其进行显著性检验 (表 3). 由表 3 可知, 入选星云湖微囊藻密度回归方程的水质指标有 TP、BOD₅、N/P 和 WT, R 值、 F 值和 P 值分别为 0.981、45.428 和 0.000, 显示了回归方程极显著, 表明分析结果可靠. 因此, TP、BOD₅、N/P 和 WT 为与星云湖微囊藻密度周年变化密切相关的水质指标.

表 3 微囊藻密度与水质指标多元逐步回归方程

Table 3 Stepwise multiple regression equation between *Microcystis* density and water quality indices

多元逐步回归方程 Stepwise multiple regression equation	R	F	P
$Y = 8.648X_{TP} + 1.085X_{BOD5} - 0.375X_{N/P} + 0.326X_{WT} + 6.240$	0.981	45.428	0.000

WT 是影响藻类生长的关键物理因子^[30]. WT 能够促进藻类生命活性, 使氮、磷等营养盐在水体中的迁移转化过程加快, 利于藻细胞对营养物质的吸收, 藻类生理活性升高和生物量高峰值增加, 从而使藻类细胞完成自身成长增殖^[31]. WT 的增加能促进微囊藻的生长速率^[32]. 太湖梅梁湾微囊藻生物量与 WT 密切相关, 随着太湖 WT 的增加, 微囊藻生物量显著增加, 但并非简单的线性相关^[33]. 本研究中, 星云湖微囊藻密度周年变化与 WT 呈显著正相关, 冬春转换期 (2、3 月) 星云湖 WT 较低, 微囊藻细胞新陈代谢较慢, 增殖较慢, 密度为全年最低; 而春末 (5 月) 后随着 WT 上升, 微囊藻细胞代谢活动不断增强, 生长繁殖较快, 密度也处于相对较高水平. 表明 WT 是星云湖微囊藻密度变化的原因之一.

磷是影响微囊藻生长的主要营养元素之一^[34]. 微囊藻具有较高的磷摄取速率和较强的磷储存能力, 对氮磷等营养盐的结合能力也比其它藻类强, 这些特点使其可以更有效地利用磷^[35]. 大量研究表明, TP 对微囊藻生长影响较大, 微囊藻丰度或生物量与 TP 浓度呈显著正相关^[10, 36-37], 但过高的磷浓度也不利于微囊藻生长^[38]. 同时, 微囊藻的大量繁殖可使水体 pH 增高, 降低下层或底层水体 DO 水平, 释放促发颗粒态磷转化释放的磷酸酶等作用机制, 从而促进底泥中内源性磷的释放, 增加水相颗粒磷库^[39]. BOD₅ 与水体有机污染状况有关, 常作为衡量湖库水体有机物含量的重要指标, 指数越大, 表明水体受有机污染越严重. 水体中有机物会促进藻类的生长繁殖, 同时藻类自身会通过光合作用产生大量的有机物, 使水体中有机物升高^[40]. 沙湖浮游藻类密度与 BOD₅ 呈显著正相关^[41]. 本研究中, 星云湖微囊藻密度周年变化与 TP 和 BOD₅ 呈极显著正相关. 一方面, 星云湖 TP 和有机物的入湖污染途径主要是入湖河流, 而星云湖主要的入湖河流多为季节性河流, 冬春季 (12—3 月) 为流域内相对农闲及枯水期, 入湖的 TP 和有机物相对较少, 微囊藻密度也相对较低; 春末后 (5—11 月) 随着当地大春栽种、农田泄水、雨季来临、小春栽种等一系列原因, 入湖污染负荷不断增大, 水体中 TP 和 BOD₅ 浓度呈增加趋势, 加之 WT 的升高对营养盐及有机物的转化加快, 利于微囊藻细胞对营养物质的吸收利用, 微囊藻密度较冬春季节明显增加, 水体 TP 和有机物浓度成为了星云湖微囊藻大量生长的原因. 另一方面, 周年内星云湖较高的微囊藻密度, 使其水体 pH 也维持在相对较高水平 (8.89—9.40), 内源性磷的释放导致水体 TP 浓度也较高; 同时, 微囊藻在生长代谢和消亡过程中释放大量的有机物, 使水体 BOD₅ 浓度也随之增加, 由此, 水体 TP 及 BOD₅ 浓度的增加又成为了微囊藻大量生长繁殖的结果. 因此, 星云湖微囊藻密度与 TP 和 BOD₅ 浓度变化是互为因果的.

Rhee 等^[42] 发现 N/P 低于 10 时有利于微囊藻成为优势种. 我国绝大部分湖泊暴发的水华都是蓝藻水华, 原因是我国绝大部分湖泊中 N/P 都较低, 使得没有固氮能力的微囊藻成为优势种^[3]. 代龚圆等^[43] 研究认为, 较低的 N/P 有利于滇池微囊藻生物量的增加. Liu 等^[44] 研究发现, 太湖微囊藻生物量与 N/P 呈负相关. 在较高的 N/P 情况下, 水体中也会形成蓝藻水华, 较低的 N/P 并不是蓝藻水华形成的条

件,而是蓝藻水华产生的结果^[45].夏季太湖梅梁湾蓝藻水华比湖心区更为严重,导致无机氮浓度降低,无机磷浓度升高,进而使 N/P 降低,低 N/P 是蓝藻水华发生的结果^[46].本研究中,星云湖水体周年 N/P 变化范围 3.4—12.9,全年均以微囊藻为绝对优势类群,微囊藻密度变化与 N/P 呈极显著负相关.这一方面符合 Smith^[47]提出的低 N/P 学说;但从另一方面看,星云湖绝对优势类群微囊藻自身并无固氮能力,其大量繁殖必定要消耗水体中大量的氮,同时又促进底泥中内源性磷的释放,最终导致 N/P 降低.因此,星云湖微囊藻密度与 N/P 变化的因果关系还有待进一步研究来解释.

3 结论(Conclusion)

(1)微囊藻是星云湖浮游藻类组成的绝对优势类群,周年内优势度高达 0.821—0.995.星云湖微囊藻密度月变化明显,变化范围 4.97×10^7 — 7.79×10^8 cells·L⁻¹,年均 2.94×10^8 cells·L⁻¹,最大值出现在 2018 年 6 月,最小值出现在 2018 年 3 月.微囊藻密度夏秋季相对较高,春季次之,冬季最低.

(2)Pearson 相关性分析和多元逐步回归分析认为,WT、TP、BOD₅ 和 N/P 是与星云湖微囊藻密度周年变化密切相关的 4 项水质指标.

(3)周年内星云湖微囊藻密度及优势度均维持在较高水平,微囊藻水华全年均可暴发.相关部门应高度重视,积极采取外源与内源治理并举的措施,最大程度削减湖泊及入湖营养盐输入,尤其是磷输入,逐步减少水华现象的发生,实现湖泊资源的可持续发展和利用.

参考文献 (References)

- [1] 许海,秦伯强,朱广伟.太湖不同湖区夏季蓝藻生长的营养盐限制研究[J].中国环境科学,2012,32(12):2230-2236.
XU H, QIN B Q, ZHU G W. Nutrient limitation of cyanobacterial growth in different regions of Lake Taihu in summer [J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(12): 2230-2236(in Chinese).
- [2] 潘晓洁,常锋武,沈银武,等.滇池水体中微囊藻毒素含量变化与环境因子的相关性研究[J].湖泊科学,2006,18(6):572-578.
PAN X J, CHANG F Y, SHEN Y W, et al. The correlation between the variation of microcystin content and environment factors in Dianchi Lake [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, 18(6): 572-578(in Chinese).
- [3] 秦伯强,王小冬,汤祥明,等.太湖富营养化与蓝藻水华引起的饮用水危机—原因与对策[J].地球科学进展,2007,22(9):896-906.
QIN B Q, WANG X D, TANG X M, et al. Drinking water crisis caused by eutrophication and cyanobacterial bloom in Lake Taihu: cause and measurement [J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(9): 896-906(in Chinese).
- [4] 汪恩,侯泽英,储昭升,等.藻华高风险期微囊藻在洱海中的垂直分布特征及其影响因素[J].环境科学研究,2018,31(7):1250-1257.
WANG C, HOU Z Y, CHU Z S, et al. Vertical distribution of *Microcystis* and its influence factors in Lake Erhai during high risk period for algal bloom [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(7): 1250-1257(in Chinese).
- [5] 李原,张梅,王若南.滇池的水华蓝藻的时空变化[J].云南大学学报(自然科学版),2005,27(3):272-276.
LI Y, ZHANG M, WANG R N. The temporal and spation variation of the cyanobacteria which caused the water bloom in the Dianchi Lake, Kunming, China [J]. *Journal of Yunnan University(Natural Sciences Edition)*, 2005, 27(3): 272-276(in Chinese).
- [6] 尹澄清,兰智文.富营养化水体中藻类生长限制因素的确定及其应用[J].环境化学,1993,12(5):380-386.
YIN C Q, LAN Z W. Determination of algal growth limiting factors in Chaohu Lake and its application [J]. *Environmental Chemistry*, 1993, 12(5): 380-386(in Chinese).
- [7] 姚玲爱,许振成,赵学敏,等.高州水库水华优势种铜绿微囊藻生长特性研究[J].中国环境科学,2013,33(S1):191-197.
YAO L A, XU Z C, ZHAO X M, et al. Growth characteristics of a dominate species in cyanobacterial bloom of Gaozhou Reservoir, *Mycrocystis aeruginosa* [J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(S1): 191-197(in Chinese).
- [8] 况琪军,马沛明,胡征宇,等.湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展[J].安全与环境学报,2005,5(2):87-91.
KUANG Q J, MA P M, HU Z Y, et al. Study on the evaluation and treatment of lake eutrophication by means of algae biology [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2005, 5(2): 87-91(in Chinese).
- [9] 王亚超,徐恒省,王国祥,等.氮、磷等环境因子对太湖微囊藻与水华鱼腥藻生长的影响[J].环境监控与预警,2013,5(1):7-10.
WANG Y C, XU H S, WANG G X, et al. The impact of nitrogen, phosphorus and other environmental factors on *Microcystis* and *Anabaena* growth in Taihu Lake [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2013, 5(1): 7-10(in Chinese).
- [10] 朱孔贤,毕永红,胡建林,等.三峡水库神农溪2008年夏季铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)水华暴发特性[J].湖泊科学,2012,24(2):220-226.
ZHU K X, BI Y H, HU J L, et al. Characteristics of *Microcystis aeruginosa* bloom in summer 2008 in Shengnong River of Three Gorges

- Reservoir [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(2): 220-226(in Chinese).
- [11] 袁玉洁, 朱梦玲, 万成炎, 等. 三峡水库小江回水区水华期间环境因子对微囊藻丰度的影响 [J]. *水生态学杂志*, 2018, 39(6): 16-22.
YUAN Y J, ZHU M L, WAN C Y, et al. Impact of environmental factors on *Microcystis* abundance during algae blooms in the Xiaojiang backwater of Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Hydroecology*, 2018, 39(6): 16-22(in Chinese).
- [12] 李芸, 吴祥云, 储昭升, 等. 洋河水库微囊藻空间分布特征及其影响因素分析 [J]. *环境科学研究*, 2012, 25(5): 501-505.
LI Y, WU X Y, CHU Z S, et al. Spatial distribution characteristics of *Microcystis* and influencing factors in Yanghe Reservoir [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(5): 501-505(in Chinese).
- [13] 陈雪梅, 黄小忠, 唐领余, 等. 云南星云湖现代盘星藻与湖泊水深关系及其化石记录的探讨 [J]. *科学通报*, 2016, 61(21): 2395-2408.
CHEN X M, HUANG X Z, TANG L Y, et al. A preliminary investigation of relationship between modern *Pediastrum* and the level of Xingyun Lake, central Yunnan, and its implications for the interpretation of the fossil record [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(21): 2395-2408(in Chinese).
- [14] 王英才, 汪志聪, 吴卫菊, 等. 星云湖浮游植物及沉水植被的调查与分析[C]//. 健康湖泊与美丽中国—第三届中国湖泊论坛暨第七届湖北科技论坛论文集. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2013: 473-482.
WANG Y C, WANG Z C, WU W J, et al. Investigating and analyzing plankton and macrophytes in Xingyun Lake[C]//. The conference proceedings of healthy lake and wild China—The third lake forum of China and the seventh science and technology forum of Hubei Province. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2013: 473-482(in Chinese).
- [15] 刘绍俊, 吉正元, 普发贵, 等. 星云湖浮游植物群落结构及水体营养状态生物评价 [J]. *安全与环境学报*, 2019, 19(4): 1439-1447.
LIU S J, JI Z Y, PU F G, et al. On phytoplankton community composition structure and biological assessment of water trophic state in Xingyun Lake [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2019, 19(4): 1439-1447(in Chinese).
- [16] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法(第四版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State environmental protection administration, the monitor and analysis methods of water and wastewater editorial committee. The 4th edition of monitor and analysis methods of water and wastewater[M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2002(in Chinese).
- [17] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类—系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
HU H J, WEI Y X. The freshwater algae of China systematics, taxonomy and ecology[M]. Beijing: Science Press, 2006(in Chinese).
- [18] 孙千千, 朱伟, 李明. 太湖贡湖湾和梅梁湾微囊藻群落的时空分布及其驱动因子 [J]. *湖泊科学*, 2015, 27(5): 865-872.
SUN Q Q, ZHU W, LI M. Spatial and temporal variations of *Microcystis* colonies and their influencing factors in Gonghu Bay and Meiliang Bay of Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(5): 865-872(in Chinese).
- [19] MA J R, QIN B Q, PAERL H W, et al. The persistence of cyanobacterial(*Microcystis* spp.)blooms throughout winter in Lake Taihu, China [J]. *Limnology and Oceanography*, 2016, 61: 711-722.
- [20] SOMMER U, GLIWICZ Z M, LAMPERT W, et al. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters [J]. *Archiv für Hydrobiologie*, 1986, 106: 433-471.
- [21] 李娣, 李旭文, 牛志春, 等. 太湖浮游植物群落结构及其与水质指标间的关系 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(11): 1814-1820.
LI D, LI X W, NIU Z C, et al. Structure of phytoplankton community and relationship between phytoplankton community and water quality in Taihu Lake [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(11): 1814-1820(in Chinese).
- [22] 王华, 杨树平, 房晟忠, 等. 滇池浮游植物群落特征及与环境因子的典范对应分析 [J]. *中国环境科学*, 2016, 36(2): 544-552.
WANG H, YANG S P, FANG S Z, et al. Canonical correspondence analysis of relationship between characteristics of phytoplankton community and environmental factors in Dianchi Lake [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(2): 544-552(in Chinese).
- [23] 罗玉, 肖尧, 张晓旭, 等. 抚仙湖—星云湖流域氮、磷污染防治对策研究——以2000—2015年数据为例 [J]. *环境保护科学*, 2020, 46(1): 106-112.
LUO Y, XIAO Y, ZHANG X X, et al. The countermeasures of nitrogen and phosphorus pollution prevention and control in the watershed of Fuxian Lake and Xingyun Lake—based on the data from 2000 to 2015 [J]. *Environmental Protection Science*, 2020, 46(1): 106-112(in Chinese).
- [24] 张春敏, 金竹静, 赵祥华, 等. 星云湖湖滨带改造方案生态系统健康评价初探 [J]. *环境科学导刊*, 2018, 37(3): 52-57.
ZHANG C M, JIN Z J, ZHAO X H, et al. Preliminary studies on ecosystem health assessment of modification scheme for lakeside area in Xingyun Lake [J]. *Environmental Science Survey*, 2018, 37(3): 52-57(in Chinese).
- [25] 邓仁昌, 黄月华, 姜波. 沉水植物在浅水富营养湖泊中的生态修复作用 [J]. *水资源保护*, 2008, 24(S1): 56-59.
DENG R C, HUANG Y H, JIANG B. Ecological restoration of submerged plants in shallow eutrophic lakes [J]. *Water Resources Protection*, 2008, 24(S1): 56-59(in Chinese).
- [26] 侯长定, 李文明, 胡耀辉, 等. 星云湖湖滨带生态建设与水生植被恢复研究 [J]. *生态经济*, 2002, 11: 60-62.
HOU C D, LI W M, HU Y H, et al. A study on ecological construction and restoration of aquatic vegetation in the coastal zones of the Xingyun Lake [J]. *Ecological Economy*, 2002, 11: 60-62(in Chinese).
- [27] 施海彬, 陈光杰, 刘园园, 等. 星云湖枝角类群落变化的长期特征与驱动因素 [J]. *生态学杂志*, 2015, 34(9): 2464-2473.
SHI H B, CHEN G J, LIU Y Y, et al. Long-term pattern and driving factors of cladoceran community changes in Lake Xingyun, Yunnan [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(9): 2464-2473(in Chinese).

- [28] 张佳, 张蔚珍, 王欢, 等. 微囊藻与水体细菌相互关系的研究进展 [J]. *水生生物学报*, 2019, 43(2): 448-456.
ZHANG J, ZHANG W Z, WANG H, et al. Progress in the relationships between *Microcystis* and aquatic bacteria [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, 43(2): 448-456 (in Chinese).
- [29] 孔繁翔, 宋立荣. 蓝藻水华形成过程及其环境特征研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
KONG F X, SONG L R. Study on the formation process and environmental characteristics of cyanobacteria bloom [M]. Beijing: Science Press, 2011 (in Chinese).
- [30] 赵巧华, 孙国栋, 王健健, 等. 水温、光能对春季太湖藻类生长的耦合影响 [J]. *湖泊科学*, 2018, 30(2): 385-393.
ZHAO Q H, SUN G D, WANG J J, et al. Coupling effect of water temperature and light energy on the algal growth in Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(2): 385-393 (in Chinese).
- [31] 王海云, 程胜高, 黄磊. 三峡水库“藻类水华”成因条件研究 [J]. *人民长江*, 2007, 38(2): 16-18.
WANG H Y, CHENG S G, HUANG L. Investigation on alga bloom cause of Three Gorges Reservoir [J]. *Yangtze River*, 2007, 38(2): 16-18 (in Chinese).
- [32] 晁建颖, 颜润润, 张毅敏. 不同温度下铜绿微囊藻和斜生栅藻的最佳生长率及竞争作用 [J]. *生态与农村环境学报*, 2011, 27(2): 53-57.
CHAO J Y, YAN R R, ZHANG Y M. Optimal growth of and competition between *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus* related to temperature [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, 27(2): 53-57 (in Chinese).
- [33] 刘霞. 太湖蓝藻水华中长期动态及其与相关环境因子的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
LIU X. Long-term dynamics of cyanobacteria related to environment factors in Lake Taihu [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012 (in Chinese).
- [34] 许慧萍, 杨桂军, 周健, 等. 氮、磷浓度对太湖水华微囊藻 (*Microcystis flos-aquae*) 群体生长的影响 [J]. *湖泊科学*, 2014, 26(2): 213-220.
XU H P, YANG G J, ZHOU J, et al. Effect of nitrogen and phosphorus concentration on colony growth of *Microcystis flos-aquae* in Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(2): 213-220 (in Chinese).
- [35] 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 [J]. *生态学报*, 2005, 25(3): 589-595.
KONG F X, GAO G. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 589-595 (in Chinese).
- [36] JOUNG S H, OH H M, KO S R, et al. Correlations between environmental factors and toxic and non-toxic *Microcystis* dynamics during bloom in Daechung Reservoir, Korea [J]. *Harmful Algae*, 2011, 10: 188-193.
- [37] 周涛, 李正魁. 太湖浮游植物与营养盐相互关系 [J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(2): 327-332.
ZHOU T, LI Z K. The relationship between phytoplankton and nutrients of Lake Taihu, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(2): 327-332 (in Chinese).
- [38] 张玮, 林一群, 郭定芳, 等. 不同氮、磷浓度对铜绿微囊藻生长、光合及产毒的影响 [J]. *水生生物学报*, 2006, 30(3): 318-322.
ZHANG W, LIN Y Q, GUO D F, et al. Influence of different nitrogen and phosphorus concentrations on growth, photosynthesis and microcystin production of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, 30(3): 318-322 (in Chinese).
- [39] 朱广伟, 邹伟, 国超旋, 等. 太湖水体磷浓度与赋存量长期变化(2005—2018年)及其对未来磷控制目标管理的启示 [J]. *湖泊科学*, 2020, 32(1): 21-35.
ZHU G W, ZOU W, GUO C X, et al. Long-term variations of phosphorus concentration and capacity in Lake Taihu, 2005—2018: implications for future phosphorus reduction target management [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(1): 21-35 (in Chinese).
- [40] 刘洋, 吕俊平, 刘琪, 等. 太原汾河蓄水浮游植物细胞密度及其与营养元素的关系 [J]. *生态学报*, 2018, 38(3): 991-1002.
LIU Y, LV J P, LIU Q, et al. Relationship between the growth of phytoplankton and the distribution of nutrients in the Fenhe water storage area of Taiyuan [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 991-1002 (in Chinese).
- [41] 邱小琼, 赵红雪, 孙晓雪. 宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究 [J]. *环境科学*, 2012, 33(7): 2265-2271.
QIU X C, ZHAO H X, SUN X X. Studies on relationship of phytoplankton and water environmental factors in Shahu Lake [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(7): 2265-2271 (in Chinese).
- [42] RHEE G Y, GOTHAM I J. Optimum N: P ratios and co-existence of planktonic algae [J]. *Journal of Phycology*, 1980, 16: 486-489.
- [43] 代龚圆, 李杰, 李林, 等. 滇池北部湖区浮游植物时空格局及相关环境因子 [J]. *水生生物学报*, 2012, 36(5): 946-956.
DAI G Y, LI J, LI L, et al. The spatio-temporal pattern of phytoplankton in the north basin of Lake Dianchi and related environmental factors [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2012, 36(5): 946-956 (in Chinese).
- [44] LIU X, LU X H, CHEN Y W. The effects of temperature and nutrient ratios on *Microcystis* blooms in Lake Taihu, China: An 11-year investigation [J]. *Harmful Algae*, 2011, 10: 337-343.
- [45] XIE L Q, XIE P, LI S X, et al. The low TN: TP ratio, a cause or a result of *Microcystis* blooms? [J]. *Water Research*, 2003, 37: 2073-2080.
- [46] 许海, 朱广伟, 秦伯强, 等. 氮磷比对水华蓝藻优势形成的影响 [J]. *中国环境科学*, 2011, 31(10): 1676-1683.
XU H, ZHU G W, QIN B Q, et al. Influence of nitrogen-phosphorus ratio on dominance of bloom-forming cyanobacteria (*Microcystis aeruginosa*) [J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(10): 1676-1683 (in Chinese).
- [47] SMITH V H. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton [J]. *Science*, 1983, 221: 669-671.