

DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2018.03.011

徐雅倩, 马骏, 杨正健. 基于实验室培养的一株铜绿微囊藻生长动力参数率定及生长数值模拟[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(3): 267–275.
XU Ya-qian, MA Jun, YANG Zheng-jian. Calibration of Kinetic Parameters and Numerical Simulation of Growth of *Microcystis aeruginosa* Cultured in Laboratory[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(3): 267–275.

基于实验室培养的一株铜绿微囊藻生长动力参数率定及生长数值模拟

徐雅倩, 马骏^①, 杨正健 (湖北工业大学土木建筑与环境学院/ 河湖生态修复与藻类利用湖北省重点实验室, 湖北武汉 430068)

摘要: 铜绿微囊藻水华是目前湖库中主要的有害蓝藻水华, 其预测预报方法研究对缓解水华危害具有重要意义。在 CE-QUAL-W2 模型的基础上, 利用 PIKAIA 遗传算法模拟一种蓝藻水华典型优势种铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 的室内生长过程, 分析不同生长动力学参数对其生长的敏感性, 并确定敏感性参数的阈值。结果表明, CE-QUAL-W2 模型能较好地模拟铜绿微囊藻的室内生长过程, 最大生长率 (AG)、沉降速率 (AS)、最适光强 (ASAT)、藻细胞氮含量 (ALGN)、藻细胞磷含量 (ALGP) 和单位藻干重叶绿素 a (Chl-a) 含量 (ACHLA) 是影响铜绿微囊藻生长的敏感性参数。其中, 与 Chl-a 峰值呈正相关的参数有 AG 和 ACHLA, 呈负相关的参数有 AS、ASAT、ALGP 和 ALGN。与 Chl-a 峰现时间呈正相关的参数有 AS 和 ASAT, 呈负相关的参数有 AG、ALGP 和 ALGN。ACHLA 的变化只会使 Chl-a 同倍比放大或缩小, 不改变峰现时间。这 6 个参数的较优取值如下: AG 为 $7.526\ 8\ d^{-1}$, AS 为 $0.002\ 2\ m \cdot d^{-1}$, ASAT 为 $102.774\ 4\ W \cdot m^{-2}$, ALGP 为 $0.000\ 5$, ALGN 为 $0.041\ 3$, ACHLA 为 $0.125\ 8\ mg \cdot \mu g^{-1}$ 。

关键词: 铜绿微囊藻; 生长动力学模型; 数值模拟; 敏感性参数

中图分类号: X524; X17 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2018)03-0267-09

Calibration of Kinetic Parameters and Numerical Simulation of Growth of *Microcystis aeruginosa* Cultured in Laboratory. XU Ya-qian, MA Jun, YANG Zheng-jian (School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology/ Hubei Key Laboratory of Ecological Restoration of River-Lakes and Algal Utilization, Wuhan 430068, China)

Abstract: *Microcystis aeruginosa* bloom is a major harmful Cyanobacteria bloom in lakes and reservoirs. Researches on methods for prediction and forecasting of algal blooms are of important significance to mitigating harm of the blooms. Based on the CE-QUAL-W2 model, indoor growth of *Microcystis aeruginosa*, a dominant species, typical of Cyanobacteria blooms was simulated with the aid of the PIKAIA genetic algorithm for analysis of sensitivity of different growth kinetic parameters to its growth, and threshold of sensitive parameters. Results show that the CE-QUAL-W2 model is good at simulating indoor growth process of *Microcystis aeruginosa*, and AG (maximum algal growth rate), AS (algal settling rate), ASAT (light saturation intensity at maximum photosynthetic rate), ALGN (ALGP) [stoichiometric equivalent between algal biomass and nitrogen (phosphorus)], and ACHLA (ratio between algal biomass and chlorophyll a) are the sensitive parameters that affect growth of *Microcystis aeruginosa*. Among them, AG and ACHLA are positively related to Chlorophyll a peak, while AS, ASAT, ALGP and ALGN are negatively related. Besides, AS and ACHLA are positively related to the time Chlorophyll a peak appears, while AG, ALGP and ALGN are negatively related. Variation of ACHLA can only multiply or reduce Chlorophyll a by time, but it will not affect the time the peak appears. Optimal values of the six parameters are defined as follows: AG = $7.526\ 8\ d^{-1}$, AS = $0.002\ 2\ m \cdot d^{-1}$, ASAT = $102.774\ 4\ W \cdot m^{-2}$, ALGP = $0.000\ 5$,

收稿日期: 2017-04-27

基金项目: 国家自然科学基金 (51709096, 51509086); 国家自然科学基金重大研究计划 (91647207); 国家科技合作与交流专项 (2014DFE70070); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2014ZX07104-005-02); 河湖生态修复及藻类利用湖北省重点实验室开放基金 (HHKF201502); 湖北工业大学博士科研启动基金 (BSQD2015013)

^① 通信作者 E-mail: majun150@126.com

ALGN=0.041 3, ACHLA=0.125 8 mg · μg⁻¹.

Key words: *Microcystis aeruginosa*; growth kinetic model; numerical simulation; sensitive parameters

水华暴发是一个复杂的生态动力学过程^[1-3],国内外学者从水动力^[4-6]、水温^[7-9]、光照^[10-13]、营养盐^[14-18]等方面开展了一系列野外观测和现场围隔实验,取得了诸多进展。然而,对水库或水质管理部门来说,仅在水华发生后跟踪监测远远不够,更需要能在水华暴发前较准确地预测出水华情势,提前采取干预措施。水华的数值模拟是解决这一问题的有效手段:一方面可以预测未来一段时间内的水华情势;另一方面也可以用于水华暴发机理研究。

国内外学者对水华的数值模拟研究经历了从黑箱模型、统计模型到过程模型研究的过程。目前水华模型以过程模型为主,模拟精度主要取决于关键生态动力学参数的取值。藻类生态动力学参数取值不仅与藻种有关,还与环境水体物化特性有关^[19-20],即使同一藻种,在不同生长阶段参数取值也不一样^[21]。基于临界层理论^[22],垂向梯度差异(包括温度、光照和浓度等方面)对于藻类长势有着决定性影响。由美国陆军工程兵团和波特兰州立大学开发的 CE-QUAL-W2 模型是应用于河流、河口、湖泊和水库的立面(纵向/垂向)二维水动力水质模型。该模型假定水体横向均匀,在相对较狭窄的、纵向和垂向上存在温度或浓度梯度的水体都有广泛应用^[21]。CE-QUAL-W2 模型在水流、水温和营养盐方面模拟应用较多,对水华直接模拟应用较少(对水华模拟多为通过水动力、营养盐间接联系,或将该模型中藻类生长动力学模块与其他模型耦合),而对于实验室尺度的藻类生长模拟几乎没有;现有宏观尺度水华模拟应用中对于藻类生态动力学参数极少进行系统细致的研究^[23-26]。由此,目前水华模拟的难点在于如何合理有效地选择藻类的生态动力学参数,以提高模拟效果。

铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)水华是目前湖泊中主要的有害蓝藻水华^[27-28]。因此笔者选择铜绿微囊藻作为藻生长数值模拟的研究对象,旨在证明 CE-QUAL-W2 模型能较好地模拟室内养藻过程,并研究关键参数对模拟效果的影响规律以及实验室条件下模型关键参数的合理优化取值,为后续研究藻类数值模拟提供借鉴。

1 研究方法

1.1 藻类生长动力学模型

CE-QUAL-W2 中的生态动力学模型^[21]将藻作

为水体物质的一种进行计算,其对流扩散方程为

$$\frac{\partial (B\Phi)}{\partial t} + \frac{\partial (UB\Phi)}{\partial x} + \frac{\partial (WB\Phi)}{\partial z} - \frac{\partial \left(BD_x \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)}{\partial x} - \frac{\partial \left(BD_z \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)}{\partial z} = q_\Phi B + S_\Phi B. \quad (1)$$

式(1)中 Φ 为横向平均组分浓度, $g \cdot m^{-3}$; U 为 x 垂向流速, $m \cdot s^{-1}$; W 为 z 垂向流速, $m \cdot s^{-1}$; B 为水面宽, m ; D_x 为温度和组分纵向扩散系数, $m^2 \cdot s^{-1}$; D_z 为温度和组分垂向扩散系数, $m^2 \cdot s^{-1}$; q_Φ 为单位体积内物质横向流入或流出的量, $g \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$; S_Φ 为横向平均的源汇项, $g \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$ 。

该方程中的源汇项如图1中藻的生态学过程所示,增量只有藻类生长,损量包括藻类的(暗)呼吸、排泄、死亡、沉降以及被捕食。

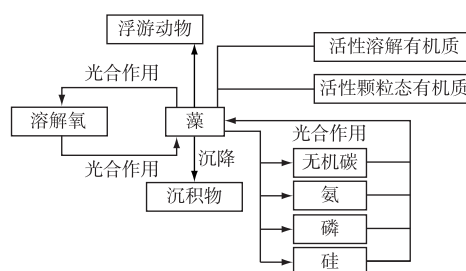


图1 藻的生态学过程

Fig. 1 Schematic diagram of the algae ecological process

源汇项 S_a 的计算公式为

$$S_a = K_{ag} \Phi_a - K_{ar} \Phi_a - K_{ae} \Phi_a - K_{am} \Phi_a - \omega_a \frac{\partial \Phi_a}{\partial Z} - \sum \left(Z_\mu \Phi_{zoo} \frac{\sigma_{alg} \Phi_a}{\sum \sigma_{alg} \Phi_a + \sigma_{pom} \Phi_{lpom} + \sigma_{zoo} \Phi_{zoo}} \right), \quad (2)$$

$$K_{ag} = \gamma_{ar} \gamma_{af} \lambda_{min} K_{ag, max}. \quad (3)$$

式(2)~(3)中, Z 为网格厚度, m ; K_{ag} 为藻类生长速率, d^{-1} ; K_{ar} 为藻类(暗)呼吸速率, d^{-1} ; K_{ae} 为藻类排泄速率, d^{-1} ; K_{am} 为藻类死亡率, d^{-1} ; ω_a 为藻类沉降速率, $m \cdot d^{-1}$; Z_μ 为浮游动物净生长速率, d^{-1} ; σ_{alg} 、 σ_{pom} 、 σ_{zoo} 分别为浮游动物捕食藻类、活性颗粒态有机质、浮游动物的喜好因子; Φ_a 为藻类质量浓度, $g \cdot m^{-3}$; Φ_{lpom} 为活性颗粒态有机质质量浓度, $g \cdot m^{-3}$; Φ_{zoo} 为浮游动物质量浓度, $g \cdot m^{-3}$; γ_{ar} 和 γ_{af} 分别为藻的生长曲线上升段和下降段的温度系数; λ_{min}

为藻类生长限制因子(光照、营养盐)的系数; $K_{ag,max}$ 为最大生长速率, d^{-1} 。

在数值模拟中,藻类最大生长率代表其生长“能力”,而实际生长率则受光照、温度和营养盐等

条件影响。实验所用藻类培养液以 BG-11 培养基为基础,N、P 营养盐浓度根据实验需求进行相应调整,未涉及硅营养盐。共选取 11 种动力学参数为研究对象,探究其对铜绿微囊藻生长的影响(表 1)。

表 1 铜绿微囊藻的关键动力学参数及其取值依据

Table 1 Key kinetic parameters of *Microcystis aeruginosa* and basis of their values

模型符号	物理意义	取值
AG	最大生长速率	待率定
AR	(暗)呼吸速率	待率定
AE	排泄速率	待率定
AM	死亡率	待率定
AS	沉降速率	待率定
ASAT	最适光强(光合速率最大时的光强)	待率定
ACHLA	单位藻干重所含叶绿素 a 量	待率定
AHSP	吸收磷的半饱和和常数	待率定
AHSN	吸收氮的半饱和和常数	待率定
AHSSI	吸收硅的半饱和和常数	实验未涉及
ALGP	藻细胞中磷含量	待率定
ALGN	藻细胞中氮含量	待率定
ALGSI	藻细胞中硅元素含量	实验未涉及
AT1(AK1)	该藻能生长的最低温度(对应产量系数)	统计值 12 ℃ ^[29] (默认值 0.10 ^[21])
AT2(AK2)	最适宜该藻生长的温度下限(对应产量系数)	统计值 26 ℃ ^[29] (默认值 0.99 ^[21])
AT3(AK3)	最适宜该藻生长的温度上限(对应产量系数)	统计值 31 ℃ ^[29] (默认值 0.99 ^[21])
AT4(AK4)	该藻能生长的最高温度(对应产量系数)	统计值 36 ℃ ^[29] (默认值 0.10 ^[21])
ALGC	藻细胞中碳含量	默认值
其他	其他参数	默认值

1.2 PIKAIA 遗传算法的自动率定方法

由于采用 Fortran 90 语言编写的 PIKAIA 遗传算法以适应度函数最大化为目标^[30],故选择常用于 CE-QUAL-W2 模型评价的均方根的倒数作为适应度函数。适应度函数计算公式^[31]为

$$f(x) = \sum_{i=1}^q w_i \times \sum_{j=1}^m \frac{1}{w_i} \times \frac{\sum_{j=1}^m O_{i,j}/m}{\left[\sum_{j=1}^m (P_{i,j} - O_{i,j})^2/m\right]^{1/2}}。$$

(4)

式(4)中, $O_{i,j}$ 为实测值; $P_{i,j}$ 为模拟值; m 为实测与模拟匹配的数目; w_i 为权重因子; q 为待率定参数的个数。选择叶绿素 a(Chl-a)作为研究指标。

2 模型构建及相关条件的处理

2.1 铜绿微囊藻室内生长实验

2.1.1 实验装置

铜绿微囊藻室内生长实验装置如图 2 所示,每组工况设置 2 个平行样,各水框之间水体不连通,视为互不影响。单个水框的尺寸约为 70 cm×40 cm×17 cm,水深 10 cm,水框上方布设一排日光灯管。

2.1.2 实验设计

室内生长实验控制的单一变量为水温,水温由可调式绝缘电热棒控制。根据铜绿微囊藻 AT1、AT2、AT3、AT4 这 4 个特征温度的 5 个区间设定 5 个具有代表性的水温工况,依次为(10±1)、(14±1)、(24±1)、(28±1)、(32±1)℃,编号为 1#~5#。实验藻种购自中国科学院淡水藻种库,具体培养条件如表 2 所示。光照测定使用 TES-1339 照度计,室温和湿度测定采用温湿度计,pH 值、营养盐和 Chl-a 浓度测定方法参照文献[32]。

2.1.3 铜绿微囊藻室内生长结果

实验周期约为 14 d,覆盖铜绿微囊藻从接种到死亡的整个过程。取样时间为每天 08:00,各装置的 Chl-a 浓度及水温实测值如图 3 所示。

静水实验的水温由空调和电热棒共同控制,低温水平较为稳定,高温水平则较难保持恒定,在控制水平上下稍有浮动。当水温为 10℃左右时,铜绿微囊藻极难生长,其 Chl-a 质量浓度不超过 2 mg·m⁻³;当水温在 14℃左右时,铜绿微囊藻直到实验周期最后 3 d 才显现出微弱的增长趋势;水温为 24、28 和 32℃左右时,Chl-a 浓度变化与藻类生长理论曲

线基本吻合,经历迟缓期、对数生长期、稳定期和衰亡期 4 个阶段;其中,在 28 ℃ 左右条件下 Chl-a 浓度峰值最高。这说明 5 组工况中,10 和 14 ℃ 左右并不在铜绿微囊藻的适宜温度范围内,而 28 ℃ 左右为铜绿微囊藻生长最适温度。因此模型使用(28±1) ℃ 实验进行率定,另外 4 组进行验证。

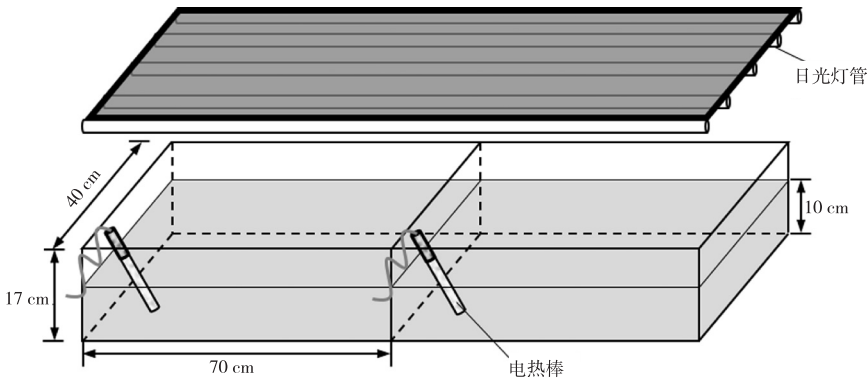


图 2 实验装置示意
Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus

表 2 室内实验各条件情况及其实现方法
Table 2 Conditions of the laboratory experiment and methods adopted

实验条件	控制手段或方法	水平
供试藻液	BG-11 培养后离心并除去细胞表面营养盐	铜绿微囊藻 915(<i>Microcystis aeruginosa</i>)
供试水体	自来水代替水库原水、蒸馏水补水	初始放置 2 d,每日补水
光照	日光灯管	[光]照度 2 000~2 300 lx
初始 pH 值	氢氧化钠溶液	8.6
初始 $\rho(\text{TN})$	硝酸钾溶液	$4.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$
初始 $\rho(\text{TP})$	磷酸二氢钾溶液	$0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$
室温	空调	14~17 ℃
相对湿度	空调	60%~70%
水温	可调式绝缘电热棒	(10±1)、(14±1)、(24±1)、(28±1)、(32±1) ℃

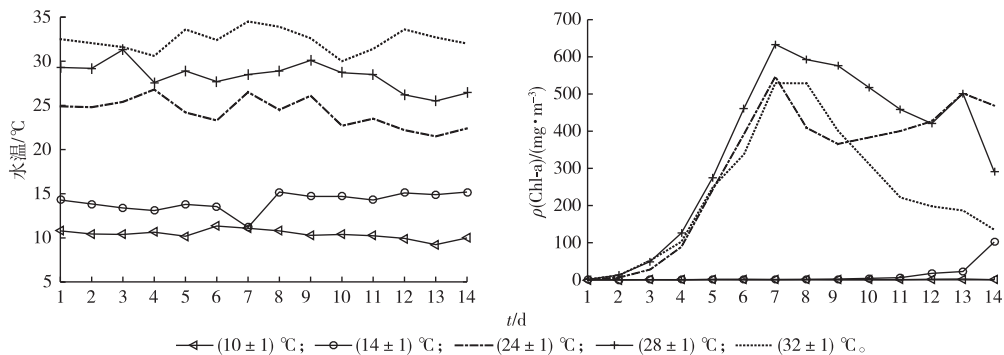


图 3 室内实验水温及叶绿素 a 浓度随时间的变化
Fig. 3 Measured data of water temperature and Chlorophyll a in laboratory experiment

2.2 铜绿微囊藻生长数学模型

2.2.1 网格划分

由图 4 可见,模型网格长度 $\Delta x = 10 \text{ cm}$,网格厚

度 $\Delta z = 5 \text{ cm}$,加上虚拟层,共计 $(2+2) \times (7+2) = 36$ 个网格(图中未显示虚拟层)。

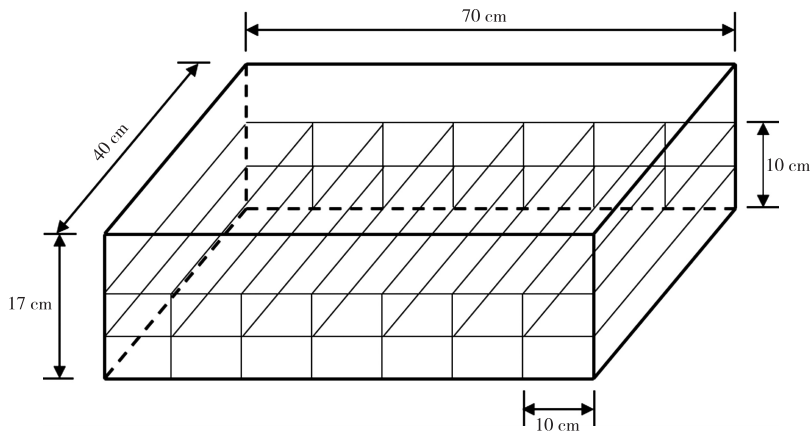


图 4 水框模型网格示意图

Fig. 4 Grid diagram of the tank model

2.2.2 模型初边值简化

模型的边界条件和初始条件简化设置见表 3。

表 3 模型初边值设置

Table 3 Initial boundary values of the model		
初边界条件	具体取值	设定依据
出/入流量	0	实际情况
水深	10 cm	实际情况
初始 $\rho(\text{TN})$	$4.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$	实际情况
初始 $\rho(\text{TP})$	$0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$	实际情况
相对湿度	65%	实际情况取中值
太阳辐射	$22 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	实际情况换算后取中值
云量	0	实际情况
风速、风向	0	实际情况
气温、露点温度	见表 4	根据水温工况和相对湿度换算

光照以实验条件为准,[光]照度与辐射之间的换算关系^[33]为

$$E = 1.04L/100。$$

式(5)中, L 为[光]照度, lx ; E 为太阳总辐射, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。实验中 L 为 2 000~2 300 lx,换算成 E 为 20~24 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$,模型中取中值,即 22 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

模型中的水温由太阳辐射、气温和露点温度共同决定,实验中光照和相对湿度一定,水温通过气温调节,露点温度根据式(6)换算^[34]。5 个水温工况对应的气温和露点条件见表 4。

$$\begin{cases} T_{\text{dp}} = \frac{c\gamma(T, H_{\text{R}})}{b - \gamma(T, H_{\text{R}})} \\ \gamma(T, H_{\text{R}}) = \ln H_{\text{R}} + \frac{bT}{c + T} \end{cases}。$$

(6)

式(6)中, T 为气温, $^{\circ}\text{C}$; T_{dp} 为露点温度, $^{\circ}\text{C}$; H_{R} 为相对湿度,%; $\gamma(T, H_{\text{R}})$ 为中间函数; b 、 c 为常数,分别取值 17.271、237.7 $^{\circ}\text{C}$ 。

表 4 模型关键温度值设置

Table 4 Critical temperature of the model			$^{\circ}\text{C}$
水温	气温	露点温度	
10.0	16.3	9.71	
14.0	20.2	13.40	
24.0	30.0	22.64	
28.0	34.0	26.47	
32.0	38.0	30.25	

3 参数率定与模型验证

3.1 动力学参数敏感性分析

根据 CE-QUAL-W2 模型中生态动力学模型的各项参数模拟藻类生长过程需要率定的动力学参数有 11 个,各参数取值范围见表 5。

所有 11 个参数的敏感性分析遵循控制单一变量原则。每个参数在其建议范围内取 5~6 个水平进行试算,结果见图 5。根据各参数对 Chl-a 的影响规律,分析发现 AG、AS、ALGP、ALGN、ASAT 和 ACHLA 这 6 个关键参数有较大影响,为藻类生长动力学模型的敏感参数;而 AR、AE、AM、AHSP 和 AHSN 这 5 个参数影响较小,为不敏感参数。

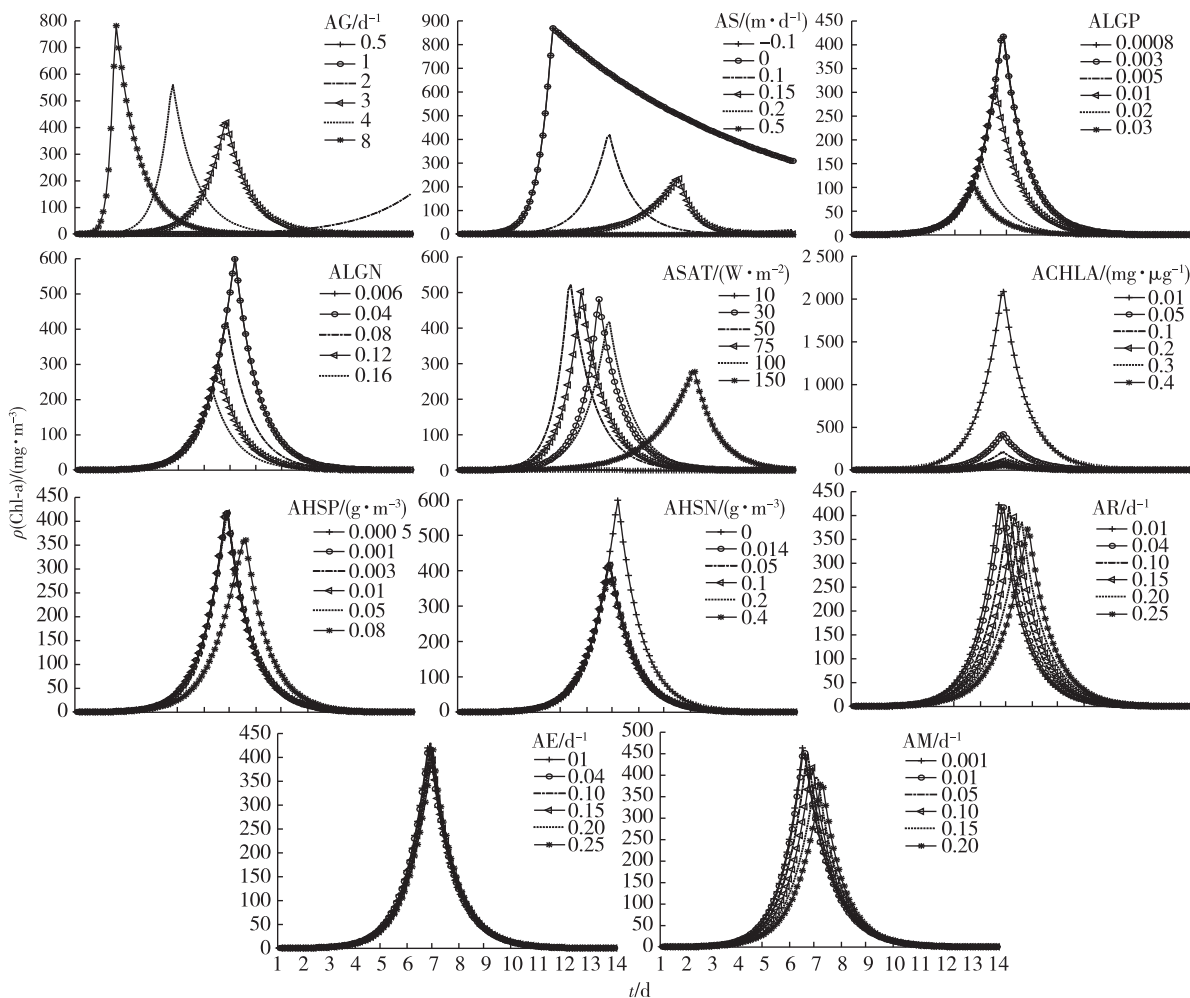
6 个敏感参数对 Chl-a 浓度具体影响为:AG 越大,Chl-a 峰值越大(正相关),峰现时间越早(负相关);AS 越大,Chl-a 峰值越小(负相关),峰现时间越晚(正相关);ALGP 越大,Chl-a 峰值越小(负相关),峰现时间越早(负相关);ALGN 规律与 ALGP 相同:在 10~50 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 范围内,ASAT 越大,Chl-a 峰值越大(正相关),峰现时间越早(负相关),在 50~170 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 范围内,ASAT 规律相反;ACHLA 越大,Chl-a 峰值越小(负相关),峰现时间不变(无关)。

表 5 藻类生长动力模型参数取值范围^[21]

Table 5 Value ranges of the kinetic parameters of the algae growth

参数	单位	取值范围	参数	单位	取值范围
AG	d ⁻¹	0.5~8.0	ACHLA	mg·μg ⁻¹	0.01~0.40
AR	d ⁻¹	0.01~0.25	AHSP	g·m ⁻³	0.0005~0.0800
AE	d ⁻¹	0.01~0.25	AHSN	g·m ⁻³	0~0.4
AM	d ⁻¹	0.001~0.200	ALGP		0.0008~0.0300
AS	m·d ⁻¹	-0.1~10.0	ALGN		0.006~0.160
ASAT	W·m ⁻²	10~170			

AG 为最大生长速率; AR 为(暗)呼吸速率; AE 为排泄速率; AM 为死亡率; AS 为沉降速率; ASAT 为最适光强(光合速率最大时的光强); ACHLA 为单位藻干重叶绿素 a 含量; AHSP 为吸收磷的半饱和常数; AHSN 为吸收氮的半饱和常数; ALGP 为藻细胞磷含量; ALGN 为藻细胞氮含量。



AG—最大生长速率; AS—沉降速率; ALGP—藻细胞磷含量; ALGN—藻细胞氮含量; ASAT—最适光强; ACHLA—单位藻干重叶绿素 a 含量; AHSP—吸收磷的半饱和常数; AHSN—吸收氮的半饱和常数; AR—(暗)呼吸速率; AE—排泄速率; AM—死亡率。

图 5 叶绿素 a 对藻类生长动力学模型参数响应规律

Fig. 5 Regularity of the responses of Chlorophyll a to kinetic parameters

3.2 敏感参数率定

模型以 28 ℃ 水温条件下的实验数据为基础,经过反复自动率定得到局部最优解后再进行手动微调,最终率定结果见图 6, Chl-a 浓度峰出现时间与实验保持一致(第 7 天),峰值相对误差为 0.3%,模

型关键参数取值:AG 为 7.526 8 d⁻¹, AS 为 0.002 2 m·d⁻¹, ASAT 为 102.774 4 W·m⁻², ALGP 为 0.000 5, ALGN 为 0.041 3, ACHLA 为 0.125 8 mg·μg⁻¹。

3.3 模型验证

基于率定所得参数,通过改变模型气象条件从而改变水温条件,得到另外4组水温条件下的 Chl-a 模拟结果,与实测数据对比情况见图7。模型关于 Chl-a 量级的模拟准确度高,10 和 14 °C 左右水温对铜绿微囊藻的生长都极为不利,因而 Chl-a 质量浓度极低, <10 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在 14 °C 左右水温条件下,实验最后 2 d 铜绿微囊藻才呈现出微弱的增长趋势,模型模拟结果与之相符。在 24 和 32 °C 左右水温条件下,模拟的峰现时间与实测一致(第 7 天),峰值的相对误差分别为 18% 和 23%,说明模型能准确模拟出峰值和峰现时间,基本能拟合铜绿微囊藻的缓

慢生长期和衰亡过程。

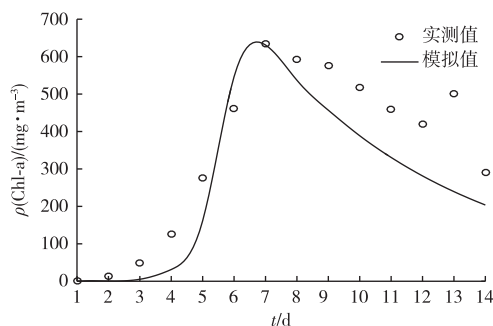
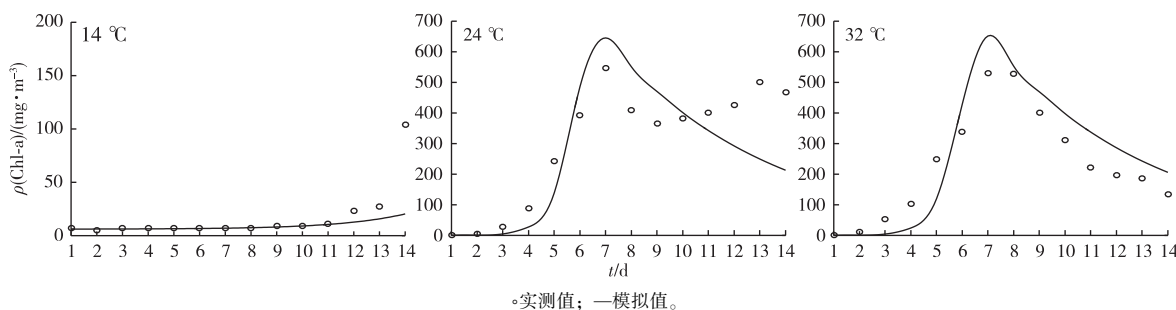


图6 28 °C水温条件下模型率定结果

Fig. 6 Calibration of the model at 28 °C (WT)



当水温为 10 °C 时,实测和模拟的 $\rho(\text{Chl-a})$ 几乎为 0。

图7 模型验证结果

Fig. 7 Verification of the model

4 结果与讨论

4.1 铜绿微囊藻生长动力学参数敏感性分析及其取值优化

CE-QUAL-W2 模型对于实验室不同水温条件下铜绿微囊藻生长的模拟应用效果可观,敏感性生长动力参数包括 AG、AS、ASAT、ALGN、ALGP 和 ACHLA。已有的水华模拟研究中铜绿微囊藻的 AG 取值一般 <2.0 d^{-1} [29,35-36],但由图 5 可知,当 AG < 2.0 d^{-1} 时,铜绿微囊藻的增长趋势很弱,增长速度极低,除非藻本身的活性低,否则 AG 范围建议为 2.0~8.0 d^{-1} 。AS ≥ 0.5 $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,铜绿微囊藻几乎无增长可能;AS 为 -0.1 和 0 $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,Chl-a 浓度曲线重合,此时的生态学意义是铜绿微囊藻的伪空泡调解其细胞密度从而垂直向上迁移或悬浮于水中,但室内实验过程中铜绿微囊藻没有出现过上浮,因此在铜绿微囊藻室内条件下 AS 取值范围建议为 0~0.5 $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ 。由图 5 可知,ASAT 对 Chl-a 的影响大致分为 2 个区间,分别为 10~50 和 50~170 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$,2 个区间的响应规律相反,具体变化的阈

值还需进一步试算。ALGN、ALGP、ACHLA 这 3 个参数均可参考表 5 中的取值范围。

以水温为 28 °C 的模型为基础,经过多次率定,以峰值和峰现时间为优先拟合准则,得到较优的参数组合如下:AG 为 7.526 8 d^{-1} ,AS 为 0.002 2 $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$,ASAT 为 102.774 4 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$,ALGP 为 0.000 5,ALGN 为 0.041 3,ACHLA 为 0.125 8 $\text{mg} \cdot \mu\text{g}^{-1}$ 。该组参数在温度约为 10、14、24 和 32 °C 的模型中得到良好验证。

4.2 铜绿微囊藻数值模拟的合理性分析

模拟结果与实测值的差异可能有以下 2 个原因:首先是水温条件,在模型中每种工况的水温恒定不变,而室内实验中水温会在一定范围内波动;其次是选取的对比指标 Chl-a,模型所得 Chl-a 浓度是由藻的生物量通过 ACHLA 的换算后得到,而实验测定的 Chl-a 浓度并不完全与藻的生物量对应,还包括部分未被分解的死亡藻细胞中的 Chl-a。因此,为提高模拟精度,建议后续研究在测定 Chl-a 浓度的同时,还需通过显微镜测量藻的生物量。

该铜绿微囊藻室内生长实验与野外最大的不

同在于,室内实验中的微囊藻是以单个细胞存在,不会在水面聚集成团,虽然理论上可以上下浮动,但由于培养环境相对稳定,并未出现上浮现象;而野外铜绿微囊藻大量聚集成团,并且分泌胞外多糖和调解伪空泡大小适应自然环境,具有显著的垂向迁移规律。李小龙等^[37]研究表明,铜绿微囊藻光饱和点在 $500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (约 $260 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) 附近,而光强达到 $900 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (约 $468 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) 时仍无光抑制现象发生,因此 ASAT 的最优取值可能会大于建议的取值范围上限 $170 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。而 AS 可能取负值,其他具有主动迁移能力的藻类(如拟多甲藻等)AS 也可能为负值,但是无主动迁移能力的藻类(如隐藻、硅藻等)AS 取值只能为正。后续研究建议在可控的实验条件下,有目的地探索各类生长动力参数与藻类生长变化之间的敏感性关系及其响应规律,可节省大量人力、物力和时间,同时为野外水华预测提供相关经验。

参考文献:

- [1] REYNOLDS C S. The Ecology of Phytoplankton [M]. New York, USA: Cambridge University Press, 2006: 179–236.
- [2] JØRGENSEN S E, BENDORICCHIO G. Fundamentals of Ecological Modelling [M]. 3rd ed. Oxford, UK: Elsevier Science Ltd., 2001: 236–259.
- [3] 秦伯强, 杨桂军, 马健荣, 等. 太湖蓝藻水华“暴发”的动态特征及其机制 [J]. 科学通报, 2016, 61 (7): 759–770. [QIN Bo-qiang, YANG Gui-jun, MA Jian-rong, et al. Dynamics of Variability and Mechanism of Harmful Cyanobacteria Bloom in Lake Taihu, China [J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61 (7): 759–770.]
- [4] DUR G, HWANG J S, SOUSSI S, et al. An Overview of the Influence of Hydrodynamics on the Spatial and Temporal Patterns of Calanoid Copepod Communities Around Taiwan [J]. Journal of Plankton Research, 2007, 29 (Suppl. 1): 97–116.
- [5] GARCÍA C M, PRIETO L, VARGAS M, et al. Hydrodynamics and the Spatial Distribution of Plankton and TEP in the Gulf of Cádiz (SW Iberian Peninsula) [J]. Journal of Plankton Research, 2002, 24 (8): 817–833.
- [6] ARIN L, MORÁN X A G, ESTRADA M. Phytoplankton Size Distribution and Growth Rates in the Alboran Sea (SW Mediterranean): Short Term Variability Related to Mesoscale Hydrodynamics [J]. Journal of Plankton Research, 2002, 24 (10): 1019–1033.
- [7] DUPUIS A P, HANN B J. Warm Spring and Summer Water Temperatures in Small Eutrophic Lakes of the Canadian Prairies: Potential Implications for Phytoplankton and Zooplankton [J]. Journal of Plankton Research, 2009, 31 (5): 489–502.
- [8] RALSTON D K, KEAFER B A, BROSNAN M L, et al. Temperature Dependence of an Estuarine Harmful Algal Bloom: Resolving Interannual Variability in Bloom Dynamics Using a Degree Day Approach [J]. Limnology and Oceanography, 2014, 59 (4): 1112–1126.
- [9] 袁琳娜, 杨常亮, 李晓铭, 等. 高原深水湖泊水温日成层对溶解氧、酸碱度、总磷浓度和藻类密度的影响: 以云阳宗海为例 [J]. 湖泊科学, 2014, 26 (1): 161–168. [YUAN Lin-na, YANG Chang-liang, LI Xiao-ming, et al. Effect of Daily Thermal Stratification on Dissolved Oxygen, pH, Total Phosphorus Concentration, Phytoplankton and Algae Density of a Deep Plateau Lake: A Case Study of Lake Yangzonghai, Yunnan Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26 (1): 161–168.]
- [10] 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 Fan-xiang, GAO Guang. Hypothesis on Cyanobacteria Bloom-Forming Mechanism in Large Shallow Eutrophic Lakes [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25 (3): 589–595.]
- [11] 徐宁, 陈菊芳. 广东大亚湾藻类水华的动力学分析: I. 藻类水华的生消过程及其与环境因子的关系 [J]. 海洋环境科学, 2001, 20 (2): 1–6. [XU Ning, CHEN Ju-fang. Dynamic Analyses on Several Algal Bloom Events in Daya Bay of Guangdong: I. Process of Algal Bloom and Its Relationship With Environmental Factors [J]. Marine Environmental Science, 2001, 20 (2): 1–6.]
- [12] CARNEIRO R L, SANTOS M E V D, PACHECO A B F, et al. Effects of Light Intensity and Light Quality on Growth and Circadian Rhythm of Saxitoxins Production in *Cylindrospermopsis raciborskii* (Cyanobacteria) [J]. Journal of Plankton Research, 2009, 31 (5): 481–488.
- [13] EDWARDS K F, THOMAS M K, KLAUSMEIER C A, et al. Phytoplankton Growth and the Interaction of Light and Temperature: A Synthesis at the Species and Community Level [J]. Limnology and Oceanography, 2016, 61 (4): 1232–1244.
- [14] ÖRNÓLFSÓTTIR E B, LUMSDEN S E, PINCKNEY J L. Phytoplankton Community Growth-Rate Response to Nutrient Pulses in a Shallow Turbid Estuary, Galveston Bay, Texas [J]. Journal of Plankton Research, 2004, 26 (3): 325–339.
- [15] JAKOBSEN H H, MARKAGER S. Carbon-to-Chlorophyll Ratio for Phytoplankton in Temperate Coastal Waters: Seasonal Patterns and Relationship to Nutrients [J]. Limnology and Oceanography, 2016, 61 (5): 1853–1868.
- [16] HARDING L W, GALLEGOS C L, PERRY E S, et al. Long-Term Trends of Nutrients and Phytoplankton in Chesapeake Bay [J]. Estuaries and Coasts, 2016, 39 (3): 664–681.
- [17] 李哲, 方芳, 郭劲松, 等. 三峡小江回水区段 2007 年春季水华与营养盐特征 [J]. 湖泊科学, 2009, 21 (1): 36–44. [LI Zhe, FANG Fang, GUO Jin-song, et al. Spring Algal Bloom and Nutrients Characteristics in Xiaojiang River Backwater Area, Three Gorge Reservoir, 2007 [J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21 (1): 36–44.]
- [18] 郑丙辉, 曹承进, 秦延文, 等. 三峡水库主要入库河流氮营养盐特征及其来源分析 [J]. 环境科学, 2008, 29 (1): 1–6. [ZHENG Bing-hui, CAO Cheng-jin, QIN Yan-wen, et al. Analysis of Nitrogen Distribution Characters and Their Sources of the Major Input Rivers of Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science, 2008, 29 (1): 1–6.]
- [19] 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 [J]. 湖泊科学, 2009, 21 (3): 314–328. [KONG Fan-xiang, MA Rong-hua, GAO Jun-feng, et al. The Theory and

- Practice of Prevention, Forecast and Warning on Cyanobacteria Bloom in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(3): 314–328.]
- [20] WHITEHEAD P G, BUSSI G, BOWES M J, *et al.* Dynamic Modelling of Multiple Phytoplankton Groups in Rivers With an Application to the Thames River System in the UK[J]. Environmental Modelling & Software, 2015, 74: 75–91.
- [21] THOMAS M C, EDWARD M B. CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 2.0[Z]. Portland: Portland State University, 2016.
- [22] SVERDRUP H U. On Conditions for the Vernal Blooming of Phytoplankton[J]. Ices Journal of Marine Science, 1953, 18(3): 287–295.
- [23] 谢涛, 纪道斌, 尹卫平, 等. 三峡水库不同下泄流量香溪河水动力特性与水华的响应[J]. 中国农村水利水电, 2013(11): 1–6. [XIE Tao, JI Dao-bin, YI Wei-ping, *et al.* The Hydrodynamic of Xiangxi Bay Response to Water Bloom on Different Discharges of the Three Gorges Reservoir [J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(11): 1–6.]
- [24] 姚焯. 基于抑制近坝支流水华的三峡水库非汛期优化调度研究[D]. 天津: 天津大学, 2014. [YAO Ye. Research on Three Gorges Reservoir Operation for Non-Flood Season Based on Controlling Algal Blooms in Near-Dam Tributaries[D]. Taijin: Tianjin University, 2014.]
- [25] 龙良红, 纪道斌, 刘德富, 等. 基于 CE-QUAL-W2 模型的三峡水库神农溪库湾水流水温特性分析[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(5): 28–35. [LONG Liang-hong, JI Dao-bin, LIU De-fu, *et al.* Characteristics of Flow Velocity and Water Temperature in Shennong Bay Using CE-QUAL-W2 Model[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(5): 28–35.]
- [26] 李光浩, 杨霞, 陈和春, 等. 三峡水库香溪河库湾水华水动力调控初步研究[J]. 人民长江, 2017, 48(10): 18–23, 29. [LI Guang-hao, YANG Xia, CHEN He-chun, *et al.* Preliminary Study on Hydrodynamic Regulation of Algal Bloom in Xiangxi River Bay [J]. Yangtze River, 2017, 48(10): 18–23, 29.]
- [27] 王蕾, 石利利, 蔡道基. 蓝藻水华优势藻高效防控铜制剂的筛选[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(1): 60–64. [WANG Lei, SHI Li-li, CAI Dao-ji. Screening of Copper Algicide to Suppress Dominant Algae of Cyanobacteria Algal Bloom[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2011, 27(1): 60–64.]
- [28] 方丽娟, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾夏季浮游植物演替规律及其原因[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(2): 234–240. [FANG Li-juan, LIU De-fu, YANG Zheng-jian, *et al.* Succession of Phytoplankton in Xiangxi Bay of Three-Gorge Reservoir in Summer and Its Causes[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2013, 29(2): 234–240.]
- [29] 崔玉洁. 三峡水库香溪河藻类生长敏感生态动力学过程及其模拟[D]. 武汉: 武汉大学, 2017. [CUI Yu-jie. The Sensitive Ecological Dynamic Processes and Their Simulations of Algal Growth of Xiangxi Bay in the Three Gorges Reservoir[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.]
- [30] CHARBONNEAU P. Genetic Algorithms in Astronomy and Astrophysics[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 1995, 101: 309–334.
- [31] PELLETIER G J, CHAPRA S C, TAO H. QUAL2Kw: A Framework for Modeling Water Quality in Streams and Rivers Using a Genetic Algorithm for Calibration[J]. Environmental Modelling & Software, 2006, 21(3): 419–425.
- [32] 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[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 88–284. [Editorial Board of “Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods” of State Environmental Protection Administration. Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 88–284.]
- [33] 毛军需. 太阳辐射度与光照度换算浅析[J]. 河南农业科学, 1995(1): 11–12. [MAO Jun-xu. Analysis of Solar Radiation Degree and Illuminance Conversion[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 1995(1): 11–12.]
- [34] BOLTON D. The Computation of Equivalent Potential Temperature [J]. Monthly Weather Review, 1980, 108: 1046–1053.
- [35] 马骏. 三峡水库香溪河库湾水动力循环模式及其环境效应研究[D]. 南京: 河海大学, 2015. [MA Jun. Study on Hydrodynamic Circulation Patterns and Their Environment Effects in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir [D]. Nanjing: Hohai University, 2015.]
- [36] 严萌. 不同环流模式对香溪河库湾水华生消影响规律研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2016. [YAN Meng. Reserch on the Influence of Different Hydrodynamic Circulation Patterns Impacting on Formation and Disappearance of Algal Bloom in Xiangxi Bay [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2016.]
- [37] 李小龙, 耿亚红, 李夜光, 等. 从光合作用特性看铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 的竞争优势[J]. 武汉植物学研究, 2006, 24(3): 225–230. [LI Xiao-long, GENG Ya-hong, LI Ye-guang, *et al.* The Advantages in Competition Based on the Photosynthetic Characteristics of *Microcystis aeruginosa* [J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 2006, 24(3): 225–230.]

作者简介: 徐雅倩(1992—), 女, 湖北武汉人, 硕士生, 主要研究方向为生态水利。E-mail: artryxu@163.com

(责任编辑: 许素)