

水动力条件下藻类动态模拟

丁 玲¹, 逢 勇¹, 李 凌^{2,3}, 高 光⁴

(1. 河海大学环境科学与工程学院, 南京 210098; 2. 河海大学生态环境模拟中心, 南京 210098;
3. Environmental Engineering, School of Engineering, The University of Queensland, Brisbane Qld 4072, Australia;
4. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要:藻类动态变化是其内部生理特征和外部驱动因素综合作用的结果。除了藻类自身生理因素及光、温度、营养盐等因素, 水动力作用使底泥发生再悬浮所造成的营养盐的内源释放对藻类的影响也非常重要。1999 年 5 月 8 日~6 月 24 日在太湖湖泊生态系统研究站大型生态实验槽中进行了模拟水动力条件下的太湖藻类动态实验, 并应用国外先进的 PHREEQC 软件从生物化学和生态动力学角度建立了藻类生态动力学模型。模型不仅考虑了氮循环及磷循环, 还考虑了水动力条件引起的内源释放问题, 根据 2003 年 4 月 26~4 月 30 日在河海大学环形水槽所做的底泥释放实验结果建立了水流和各形态氮磷营养盐释放的定量关系。

由于目前太湖的野外监测资料存在较明显的时空不一致性, 模型参数率定的精度受到了较大影响。从室内模拟实验出发, 通过对生态槽实验结果的模拟, 确定和验证了模型的各参数值, 计算结果显示模拟值能较好地拟合实验测量值, 表明所建藻类生态动力学模型能较好地描述藻类及各种营养盐的动态变化, 这对揭示藻类“水华”暴发机理有一定的意义。

关键词:水动力; 藻类动态实验; PHREEQC 软件; 藻类生态动力学模型; 参数确定

文章编号: 1000-0933(2005)08-1863-06 中图分类号: X524 文献标识码: A

Simulation study on algal dynamics under different hydrodynamic conditions

DING Ling¹, PANG Yong¹, LI Ling^{2,3}, GAO Guang⁴ (1. College of Environmental Science and Engineering, Hehai University 210098, Nanjing, China; 2. Centre for Eco-Environmental Modelling, Hehai University 210098, Nanjing, China; 3. Environmental Engineering, School of Engineering, The University of Queensland, Brisbane Qld 4072, Australia; 4. Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences 210008, Nanjing, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 1863~1868.

Abstract: Algae growth is affected by both their physiological characteristics and the external driving factors, including light, temperature and nutrients. The nutrients released from sediment resuspension under hydrodynamic forces, impose significant effects on algae growth. In this study, an experiment of Taihu algal dynamics under different simulated hydrodynamic conditions was carried out in an ecologic tank. The experiment was conducted using water and sediments collected from Taihu under three different hydrodynamic conditions: static, slow water flow, and fast water flow. Based on the experimental data, an algal growth model was developed using the PHREEQC simulating package and incorporating observed biochemical and ecological kinetics. Quantitative relations between the releases of nitrogen/phosphorus nutrients and the water flow velocity were incorporated in the model based on the results from laboratory experiments of nutrient release from sediments in an annular tank. Detailed calibration and verification of the model parameters were carried out based on the experimental results. The calculated values fitted well with the data, suggesting that the developed model represents the dynamic growth of algae reasonably well. This model may be used to study the mechanisms of algae bloom in Taihu.

Key words: hydrodynamics; Taihu algae growth; PHREEQC; algal growth model; parameter estimation

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50239030); 国家 863 计划资助项目(2003AA6011002)
收稿日期: 2004-04-25; 修订日期: 2005-02-04
作者简介: 丁玲(1979~), 女, 博士生, 主要从事水环境保护研究. E-mail: dingling-hohai@163.com
Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 50239030), National 863 Project of China (No. 2003AA6011002)
Received date: 2004-04-25; Accepted date: 2005-02-04
Biography: DING Ling, Ph. D. candidate, mainly engaged in water environmental protection. E-mail: dingling-hohai@163.com

近年来,随着太湖水体富营养化的加剧,藻类大量繁殖,致使水体透明度下降,水质恶化,严重破坏了太湖的生态环境。太湖藻类水华的频繁暴发,严重影响了周边地区的工农业供水和湖面景观,从而制约了周边地区的经济发展。因此,对藻类水华暴发机理的研究显得尤为迫切和必要。

国内外对湖泊藻类的研究由来已久,迄今国内已有大量文献报道了藻类的种间关系及其与环境的相关关系^[1~3],但运用模拟方法揭示藻类动态变化机制的研究尚不多见。逢勇^[4]、刘元波^[5]、许秋瑾^[6]等人曾进行了太湖藻类的动态模拟研究,探讨了太湖藻类的动态变化机制,对治理太湖藻类“水华”有一定的现实意义,但是他们对藻类的模拟均没有考虑水动力因素。太湖为大型浅水湖泊,风浪引起的湖流作用易使底泥发生再悬浮,底泥中的营养盐大量释放进入湖水中,这势必对藻类的生长产生较大的影响。此外,他们建立的藻类模型也都是建立在太湖野外时间序列监测资料的基础之上,由于目前太湖的野外监测资料存在较明显的时空不一致性,这对模拟的精度将产生较大影响。为了更真实地反映太湖藻类动态变化的实际情况,本研究取太湖源水至太湖湖泊生态系统研究站的生态模拟槽中,通过泵控制水流达到模拟太湖的水动力条件,进行藻类动态实验。应用国外先进的 PHREEQC 通用软件建立了太湖藻类生态动力学模型并对实验结果进行了模拟。模型在逢勇^[4]等人工作的基础上引入了水流与底泥释放的定量关系项,从而能较真实地模拟出水动力条件下藻类的动态变化过程。

1 生态槽实验

(1)实验概况 实验于 1999 年 5 月 8 日到 6 月 24 日进行。生态槽长 6.5m、宽 1.3m、高 1.6m,其平面布置图见图 1。槽底均匀铺设太湖淤泥,淤泥厚度为 10cm,淤泥上覆太湖水,水深为 1.15m。实验期间将空调打开,温度基本维持在 25℃。每天测 1 次水温。光源为自然太阳光,每天测 1 次光强。实验分 3 个阶段连续进行:静止阶段、小水流阶段和大水流阶段。小水流阶段自 5 月 23 日开始,表层平均流速控制为 0.124m/s,运作 10d,使其由静止状态进入稳定的小水流状态,然后连续采样 5d,期间小水流状况不变;大水流阶段自 6 月 8 日开始,表层平均流速控制为 0.319m/s,同样运作 10d,使其由小水流状态进入稳定的大水流状态,同样连续采样 5d,期间大水流状况不变^[7]。

(2)实验仪器及方法 光强的测定选用美国 LI-COR 公司生产的水下光量子仪,它能精确测定水下光合有效辐射(400~700nm)强度,在混浊水体中光强低于 0.01μmol/(m²·s)还能测定。叶绿素 a 的测定采用分光光度法测量,选用的仪器为上海仪器厂生产的 7230 分光光度计。计算公式为: $[Chl/a] = 27.9(E_b - E_a)V_e/V$,式中 $[Chl - a]$ 为叶绿素 a 的浓度, E_a 为提取液酸化前波长 665nm 和 750nm 处的光密度差, E_b 为提取液酸化后波长 665nm 和 750nm 处的光密度差, V_e 为提取液体积, V 为抽滤水样体积。流速用 LS78 型低速流速仪测定,小水流用 QDX10-10-0.55 潜水泵控制,大水流用 QY 油浸式潜水泵控制,营养盐浓度的测定参见“湖泊生态调查观测与分析”^[8]。

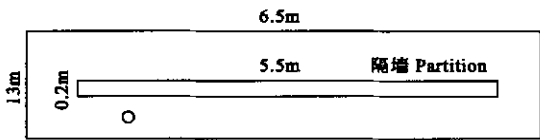


图 1 生态槽平面示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the ecological tank

○潜水泵 Sinking pump

(3)实验结果 两种水流状况下生态槽中藻类及各形态氮、磷营养盐浓度变幅及均值见表 1。

表 1 生态槽实验结果

Table 1 Results of ecological tank experiment

	叶绿素 a Chl-a(μg/L)		氨氮 Ammonium(mg/L)		有机氮 Organic nitrogen(mg/L)	
	变幅 Range	均值 Average	变幅 Range	均值 Average	变幅 Range	均值 Average
小水流状态 Slow water current regime	9.7~29.2	16.7	0~0.011	0.006	0.645~0.723	0.692
大水流状态 Fast water current regime	8.8~21.6	16.4	0~0.049	0.011	0.945~1.284	1.132
	硝酸盐氮 Nitrate(mg/L)		无机磷 Inorganic phosphorus(mg/L)		有机磷 Organic phosphorus(mg/L)	
	变幅 Range	均值 Average	变幅 Range	均值 Average	变幅 Range	均值 Average
小水流状态 Slow water current regime	0.516~0.669	0.577	0~0.005	0.0027	0.036~0.054	0.04
大水流状态 Fast water current regime	0.841~1.041	0.963	0.003~0.02	0.0104	0.086~0.104	0.097

2 基于 PHREEQC 的太湖藻类生态动力学模型

近年来已有诸多文献对太湖藻类生态过程及其限制性环境因子进行了研究^[4,9],普遍认为太湖藻类生态过程除了自身生理因素外,主要与光照、温度和氮、磷营养盐有关。当考虑水动力时,水流作用引起的底泥中营养盐的释放也是影响藻类动态变化的重要因素。

PHREEQC 是近年来发展起来的,由美国地调所开发的水文地球化学通用模拟软件,它能模拟水-岩(土)-气-有机物间相

相互作用下的各种复杂的地球化学和动态生物化学反应,用户可以根据自己的研究内容自定义各类生物化学动力学过程。PHREEQC 以其通用、便捷、模拟精度高的优点,已成功应用于国内外地下水研究中^[10~12],但在地表水环境中的应用尚很少见。本文应用 PHREEQC 通用软件,从生物化学和生态动力学角度建立了太湖藻类生态动力学模型,模型在氮、磷循环中考虑了水动力引起的内源释放。这对揭示太湖藻类“水华”暴发机理,治理太湖有一定的现实意义,同时也是 PHREEQC 在地表水环境中的应用研究的初步尝试。

2.1 模型基本方程

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = \left(G_{P1} - D_{P1} - \frac{V_{S1}}{D} \right) C_1 \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial t} = D_{P1}C_1a_{PC} - K_{23}\theta_{23}^{T-20}X_{PRC}C_2 - \frac{V_{S3}}{D}(1-f_{D2})C_2 + S_2 \quad (2)$$

$$\frac{\partial C_3}{\partial t} = K_{23}\theta_{23}^{T-20}X_{PRC}C_2 - G_{P1}C_1a_{PC} - \frac{V_{S5}}{D}(1-f_{D3})C_3 + S_3 \quad (3)$$

$$\frac{\partial C_4}{\partial t} = D_{P1}C_1a_{NC} - K_{45}\theta_{45}^{T-20}X_{PRC}C_4 - \frac{V_{S3}}{D}(1-f_{D4})C_4 + S_4 \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_5}{\partial t} = K_{45}\theta_{45}^{T-20}X_{PRC}C_4 - G_{P1}a_{NC}C_1P_{NH_3} - K_{56}\theta_{56}^{T-20}C_5 + S_5 \quad (5)$$

$$\frac{\partial C_6}{\partial t} = K_{56}\theta_{56}^{T-20}C_5 - G_{P1}a_{NC}C_1(1-P_{NH_3}) + S_6 \quad (6)$$

$$G_{P1} = \mu_{\max}f(T)G(I)G(N) \quad f(T) = K_{1c}\theta_{1c}^{T-20} \quad f(I) = \frac{I}{K_I + I}$$

$$G(N) = \min \left\{ \frac{N}{K_N + N}, \frac{P}{K_P + P} \right\} \quad D_{P1} = K_{1R}\theta_{1R}^{T-20} + K_{1D} \quad X_{PRC} = \frac{C_1}{K_P + C_1}$$

式中, C_1 为藻类叶绿素浓度; G_{P1} 为营养盐、水温、太阳辐射等对藻类生长率的综合影响项, 其中 $G(N)$ 为营养盐对藻类生长率的影响项, $f(T)$ 为温度对藻类生长率的影响项, $G(I)$ 为太阳辐射对藻类生长率的影响项; N 、 P 为氮、磷的浓度; I 为光照强度, D_{P1} 为藻类损失率; V_{S1} 为藻类沉降速度; D 为水深; C_2 为有机磷的浓度; $D_{P1}C_1a_{PC}$ 为藻类释放的有机磷项; $K_{23}\theta_{23}^{T-20}X_{PRC}C_2$ 为磷矿化项; $V_{S3}(1-f_{D2})C_2/D$ 为有机磷沉降项; S_2 为底泥释放有机磷项; C_3 为无机磷(正磷酸盐磷)的浓度; $G_{P1}C_1a_{PC}$ 为藻类吸收无机磷项; $V_{S5}(1-f_{D3})C_3/D$ 为无机磷沉降项; S_3 为底泥释放无机磷项; C_4 为有机氮的浓度; $D_{P1}C_1a_{NC}$ 为藻类释放的有机氮项; $K_{45}\theta_{45}^{T-20}X_{PRC}C_4$ 为氮矿化项; $V_{S3}(1-f_{D4})C_4/D$ 为有机氮沉降项; S_4 为底泥释放有机氮项; C_5 为氨氮的浓度; $G_{P1}a_{NC}C_1P_{NH_3}$ 为藻类吸收氨氮项; $K_{56}\theta_{56}^{T-20}C_5$ 为氮硝化项; S_5 为底泥释放氨氮项; C_6 为硝酸盐氮的浓度; $G_{P1}a_{NC}C_1(1-P_{NH_3})$ 为藻类吸收硝酸盐氮项; S_6 为底泥释放硝酸盐氮项。由于水动力使底泥再悬浮造成营养盐的大量释放, 故 S_i 表征为营养盐释放率随流速的变化关系。2003 年 4 月 26~30 日在河海大学海岸及海洋工程研究所重点实验室进行的模拟水流条件的太湖底泥释放实验结果表明, 水流速度与底泥中营养盐的释放率呈指数相关^[13], 具体表达式为 $N: y = 137.88e^{0.06x}$, 相关系数 $R^2 = 0.94$; $P: y = 36.78e^{0.05x}$, 相关系数 $R^2 = 0.97$, 其中 y 为底泥中 N 或 P 的释放率($\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$), x 为水体流速(cm/s)。故本模型中各形态氮磷营养盐的释放率可借用这一关系具体写为:

$$S_i = a_i e^{0.05u} (i = 2, 3), S_i = a_i e^{0.06u} (i = 4, 5, 6)$$

2.2 数值解法

对上述 6 个偏微分方程采用五阶龙格-库塔算法进行积分^[14,15]。以藻类为例, (1) 式可简化为:

$$\frac{dC_1}{dt} = F(C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, t)$$

则计算公式为:

$$C_{1_{i+1}} = C_{1_i} + \Delta t \varphi(t_i, C_{1_i}, C_{2_i}, C_{3_i}, C_{4_i}, C_{5_i}, C_{6_i}, \Delta t)$$

其中:

$$\varphi(t_i, C_{1_i}, C_{2_i}, C_{3_i}, C_{4_i}, C_{5_i}, C_{6_i}, \Delta t) = \sum_{i=1}^5 c_i K_i$$

$$K_1 = F(t_i, C_{1_i}, C_{2_i}, C_{3_i}, C_{4_i}, C_{5_i}, C_{6_i})$$

$$K_i = F(t_i + \lambda_i \Delta t, C_{1_i} + \Delta t \sum_{j=1}^{i-1} \mu_{ij} K_j, C_{2_i} + \Delta t \sum_{j=1}^{i-1} \mu_{ij} K_j, C_{3_i} + \Delta t \sum_{j=1}^{i-1} \mu_{ij} K_j, C_{4_i} + \Delta t \sum_{j=1}^{i-1} \mu_{ij} K_j, C_{5_i} + \Delta t \sum_{j=1}^{i-1} \mu_{ij} K_j, C_{6_i} + \Delta t \sum_{j=1}^{i-1} \mu_{ij} K_j) \quad i = 2, \dots, 5$$

式中, c_i, λ_i, μ_{ij} 均为常数, 时间步长取为 60s。

3 藻类动态模拟

对藻类动态实验小水流阶段的实验结果进行模拟, 重复调试参数使模拟值与实验测量值在允许的误差范围内, 得到若干组参数值, 采用最小二乘法从中筛选出最优的一组。再利用大水流阶段的实验结果对确定的参数进行验证, 以确保模拟的精度。

3.1 小水流阶段的藻类动态模拟

以初始时刻的藻类、各种营养盐浓度、温度、光照作为模型的初始条件, 以后每天测定的温度、光照作为模型的边界条件进行模拟。小水流阶段藻类及各形态氮、磷营养盐浓度动态过程如图 2 所示, 确定的模型各参数值见表 2。

表 2 藻类生长模型参数表
Table 2 Parameter values of algae growth model

参数 Parameter	含义 Meaning	数值 Value	文献范围 Literature value
$\mu_{\max}$	藻类最大生长率 Maximum growth rate of algae(24h) ⁻¹	1.0	1~5 ^[16]
K_N	氮的半饱和常数 Half saturation constant of N-uptake(mg/L)	0.14	0.05~0.5 ^[16]
K_P	磷的半饱和常数 Half saturation constant of P-uptake(mg/L)	0.015	0.005~0.03 ^[16]
K_{1C}	藻类在 20℃时的系数 Constant or coefficient at 20℃(24h) ⁻¹	2.0	2.0 ^[4]
θ_{1C}	温度系数 Temperature dependence coefficient	1.12	1.068 ^[4]
K_I	光饱和参数 Light saturation parameter ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)	300	300 ^[6]
K_{1R}	藻类的呼吸率 Respiration rate of algae(24h) ⁻¹	0.45	0.1~0.5 ^[16]
θ_{1R}	温度系数 Temperature coefficient	1.11	—
K_{1D}	藻类死亡率 Death rate of algae(24h) ⁻¹	0.2	0.17 ^[6]
a_{PC}	藻中磷含量 content of phosphorus in algae	0.025	0.025 ^[4]
K_{23}	矿化率常数 Rate coefficient for mineralization(24h) ⁻¹	0.08	0.01~0.178 ^[17]
θ_{23}	温度系数 Temperature coefficient	1.05	0.8~1.08 ^[17]
a_{NC}	藻中氮含量 Content of nitrogen in algae	0.25	0.25 ^[4]
K_{45}	矿化率常数 Rate coefficient for mineralization(24h) ⁻¹	0.05	0.075 ^[4]
θ_{45}	温度系数 Temperature coefficient	1.02	1.08 ^[4]
K_{56}	硝化率常数 Rate coefficient for nitrification(24h) ⁻¹	0.154	0.13 ^[4]
θ_{56}	温度系数 Temperature coefficient	1.04	1.08 ^[4]
a_2	释放率系数 Rate coefficient for release ($\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)	24.52	—
a_3	释放率系数 Rate coefficient for release ($\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)	15.99	—
a_4	释放率系数 Rate coefficient for release ($\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)	7.03	—
a_5	释放率系数 Rate coefficient for release ($\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)	168.82	—
a_6	释放率系数 Rate coefficient for release ($\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)	-21.87	—

从表 2 显示的营养盐释放参数来看, 硝态氮呈现“负释放”现象, 这与范成新等^[18]的实验结果是一致的。这主要是由于氮的反硝化作用使 NO₃-N 不断转化为中间产物 NO₂⁻-N, 而 NO₂⁻-N 又不断向低价态物质如 N₂O 和 N₂ 转化, 后两者可透过水-气界面逸入大气, 从而表现为硝态氮含量的减少, “释放”呈负值。另外, 上图显示藻类及各种营养盐浓度的计算值均能较好地吻合实验测量值, 除了氨氮浓度计算值与实测值的平均相对误差为 14.8% 外, 其余平均相对误差均在 10% 以下。

3.2 大水流阶段的藻类动态模拟

应用确定的各参数值, 对大水流阶段的藻类动态过程进行模拟, 计算结果如图 3。验证结果显示, 模拟值能较好地拟合实测值, 除了氨氮和无机磷浓度计算值与实测值的平均相对误差为 16.3% 和 11.3%, 其余平均相对误差均小于 10%。

4 结语

本研究取太湖源水至实验室的生态槽中, 在水动力及一定的温度、光照、营养盐等条件下进行了藻类动态实验。同时应用 PHREEQC 通用软件建立了太湖藻类生态动力学模型并对生态槽实验小水流和大水流阶段的实验结果进行模拟, 模型在氮、磷循环中考虑了水动力引起的内源释放, 并建立了各形态氮磷营养盐释放与水流的定量化关系。模拟结果显示, 计算值能较好地拟合实验测量值, 表明模型能较好地反映水动力条件下太湖藻类动态变化的内部机制, 在太湖藻类预测及藻类“水华”爆发预警系统中有良好的应用前景。

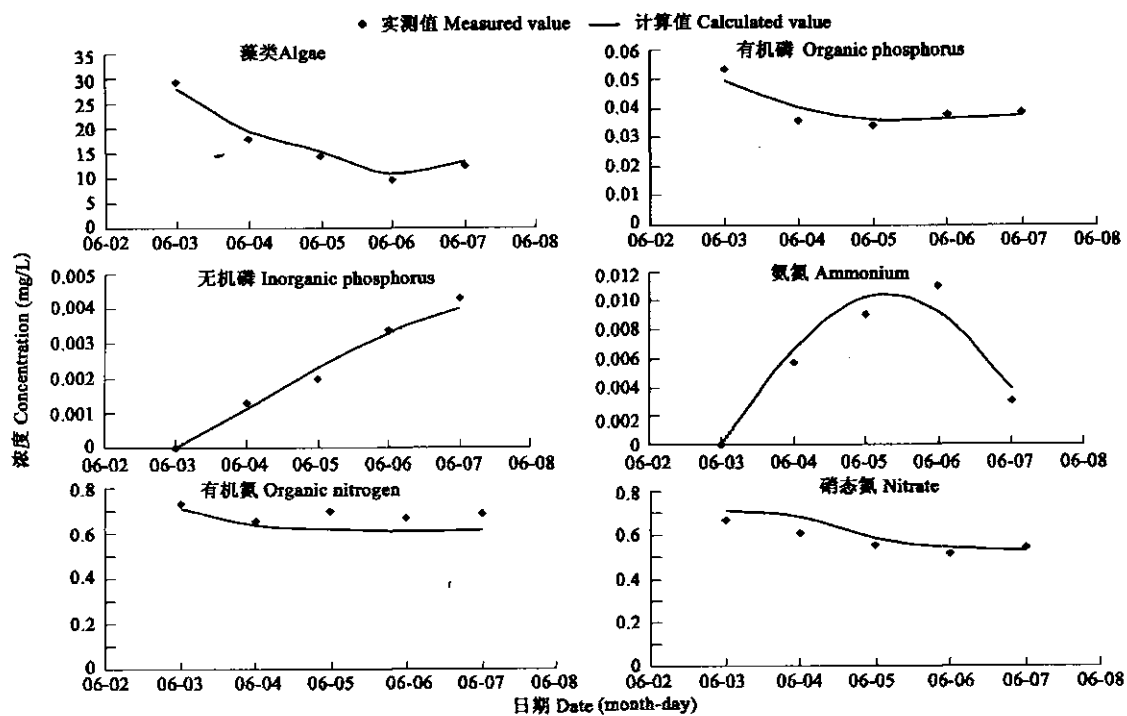


图 2 计算值与实测值对比

Fig. 2 Comparison of calculated and measured values in model calibration

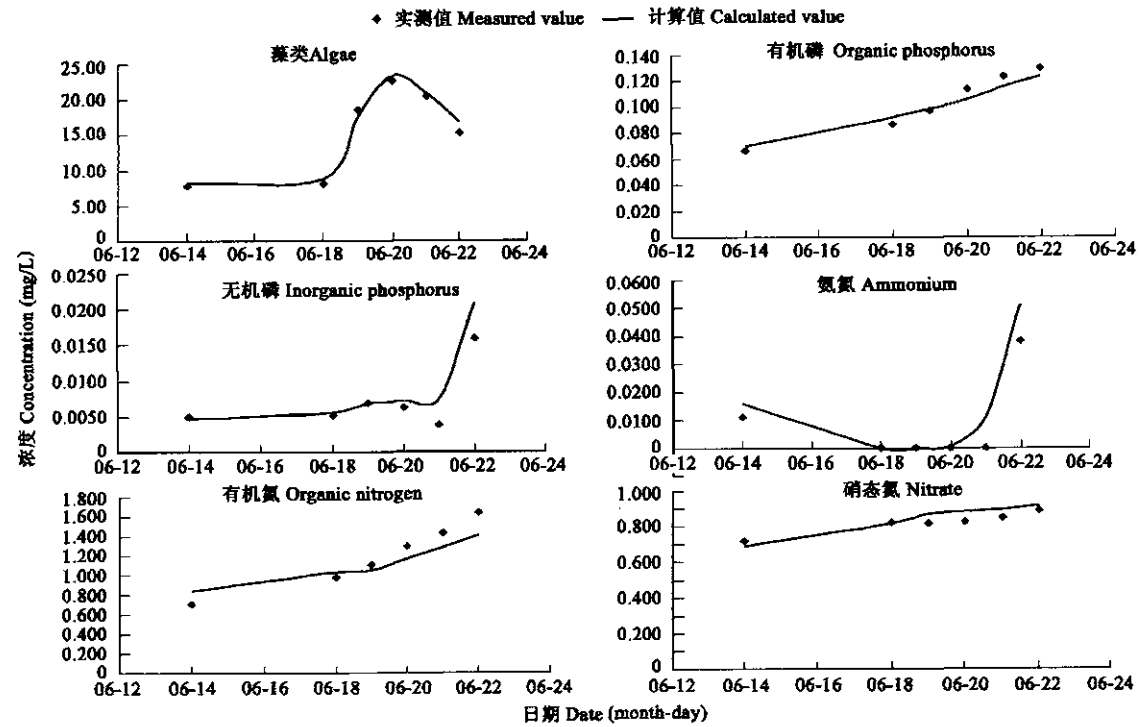


图 3 计算值与实测值比较

Fig. 3 Comparison of calculated and measured values in model verification

References:

[1] Chen Y W, Gao X Y & Qin B Q. The summer phytoplankton species composition in northern part of west Taihu Lake. *Lake Science*, 1998, **10**: 35~40.

[2] Chen Y W, Qin B Q & Gao X Y. Prediction of blue-green algae bloom using stepwise multiple regression between algae & related environmental factors in Meiliang bay, lake Taihu. *Lake Science*, 2001, **13**: 63~71.

[3] Zhang Q T, Zhang Z Q & Dong S L. Effects of environmental factors on the growth and associated aspects of red tide alga. *Report of ocean and lake*, 2002, **1**: 79~84.

[4] Pang Y. *General numerical study on atmosphere-water environment in Taihu Lake area*. Beijing: Weather Press, 1998.

[5] Liu Y B, Chen W M, Fan C X, *et al.* Ecological simulation of blue algae bloom in Meiliang bay, Taihu Lake and analysis of its harness strategies. *Lake Science*, 1998, **10**: 53~59.

[6] Xu Q J, Qin B Q, Chen W M, *et al.* Ecological simulation of algae growth in Taihu Lake. *Lake Science*, 2001, **13**: 149~157.

[7] Chen W M, Chen W Y, Qin B Q, *et al.* Experimental study on the biological community succession caused by water flow. *Lake Science*, 2000, **12**(4):343~352.

[8] Huang X F. Analysis and ecological investigation of lake. Beijing: China Standard Press, 1999.

[9] Liu Y B & Chen W M. Review on simulation study on algae dynamics. *Lake Science*, 2000, **12**: 171~177.

[10] Appelo C A J. Cation and proton exchange, pH variations, and carbonate reactions in a freshening aquifer. *Water Resources Research*, 1994,**30**:2793~2805.

[11] Appelo C A J. Some calculations on multicomponent transport with cation exchange in aquifers. *Ground Water*, 1994b, **32**:968~975.

[12] Tebes-Steven, Caroline, and Valocchi A J. Reactive transport simulation with equilibrium speciation and kinetic biodegradation and adsorption/desorption reactions. A Workshop on Subsurface Reactive Transport Modeling, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington, October 29-November, 1997. 1.

[13] Li Y P, Pang Y, Chen K S, *et al.* Study on the starting principles of sediment by water force in Taihu lake. *Advance in Water Science*, 2004, **15**: (6):770~774.

[14] Fehlberg E. Klassische Runge-Kutta-Formeln fünfter und siebenter Ordnung mit chrittweisen-Kontrolle. *Computing*, 1969, **4**:93~106.

[15] David L Parkhurst, Appelo C A J. User's guide to PHREEQC (version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one dimensional transport, and inverse geochemical calculations. U. S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report, 1999. 99~4259.

[16] Jørgensen S E. *Fundamentals of ecological modeling* ELSEVIER SCIENCE B. V. , Netherlands, 1994.

[17] Pei H P, Ma J Y, Zhou H. The dynamic model of algae in West Lake of Hangzhou. *Journal of Aquatic Creature*, 2000, **2**: 144~149.

[18] Fan C X, Qin B Q & Sun Y. Substance exchange across water-sediment interface in Meiliang Bay and Wuli Lake. *Lake Science*, 1998, **10**: 73~78.

参考文献:

[1] 陈宇炜. 西太湖北部夏季藻类种间关系的初步研究. 湖泊科学, 1998, **10**(4): 35~40.

[2] 陈宇炜. 太湖梅梁湾藻类及相关环境因子逐步回归统计和蓝藻水华的初步预测. 湖泊科学, 2001, **13**(1): 63~71.

[3] 张青田. 环境因子对赤潮藻类增殖及相关特性的影响. 海洋湖沼通报, 2002, **1**:79~84.

[4] 逢勇. 太湖地区大气-水环境的综合数值研究. 北京: 气象出版社, 1998.

[5] 刘元波. 太湖梅梁湾藻类生态模拟与蓝藻水华治理对策分析. 湖泊科学, 1998, **10**(4):53~59.

[6] 许秋瑾. 太湖藻类生长模型研究. 湖泊科学, 2001, **13**(2): 149~157.

[7] 陈伟民, 陈宇炜, 秦伯强, 等. 模拟水动力对湖泊生物群落演替的实验. 湖泊科学, 2000, **12**(4): 343~352.

[8] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析. 北京, 中国标准出版社, 1999.

[9] 刘元波. 湖泊藻类动态模拟. 湖泊科学, 2000, **12**(2): 171~177.

[13] 李一平, 逢勇, 陈克森, 等. 水动力作用下太湖底泥起动力规律研究. 水科学进展, 2004, **15**(6): 770~774.

[17] 裴洪平, 马建义, 周宏. 杭州西湖藻类动态模型研究. 水生生物学报, 2000, **24**(2): 143~149.

[18] 范成新, 秦伯强, 孙越. 梅梁湖和五里湖水-沉积物界面的物质交换. 湖泊科学, 1998, **10**(1): 73~78.