

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.03.002

微囊藻垂直运动数值模拟

邵军荣¹,吴时强¹,孙 坚²,周 杰¹,吴修锋¹

(1.南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210029;
2.镇江市规划设计研究院,江苏 镇江 212000)

摘要:综合考虑光、营养盐、温度对微囊藻生长的影响,建立了太湖静止水体微囊藻垂直运动模型,分析藻类在水体生态系统复杂因素作用下的运动变化规律.通过与 Kromkamp-Walsby 模型比较发现,太湖静止水体微囊藻垂直运动模型模拟结果合理可靠,模型计算结果显示藻半径大的微囊藻更容易运动到水体表面,在持续大风或持续阴天后水华更易暴发.

关键词:蓝藻水华;微囊藻;垂直运动;太湖

中图分类号:X173 X52 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1980(2012)03-0252-06

Numerical simulation of vertical migration of *Microcystis*

SHAO Jun-rong¹, WU Shi-qiang¹, SUN Jian², ZHOU Jie¹, WU Xiu-feng¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
2. Zhenjiang City Planning and Design Institute, Zhenjiang 212000, China)

Abstract: With consideration of the effects of light, nutrients, and temperature on the growth of *Microcystis*, a vertical migration model of *Microcystis* under a static water body in Taihu Lake was developed in order to study the algae migration affected by complex factors in the aquatic ecosystem. Compared with the results of the Kromkamp-Walsby model, it was found that the results of the proposed model were reasonable and reliable. The calculated results show that *Microcystis* with a large radius could migrate to the water surface more easily than that with a small radius, and algal blooms would easily occur after sustained strong winds and cloudy days.

Key words: cyanobacteria bloom; *Microcystis*; vertical migration; Taihu Lake

目前我国 66% 以上的湖泊、水库处于富营养化水平,其中重富营养和超富营养的占 22%. 湖泊富营养化使得水华产生的程度及频率都有所加强. 蓝藻水华暴发会产生多种危害:(a) 当养殖水体中形成水华时,一方面严重抑制了浮游植物因光合作用产生的氧气,另一方面也阻隔了空气中的氧气进入养殖水体,从而直接或间接地加剧了水污染事故的频繁发生;(b) 藻类大量死亡时会产生藻毒素,藻毒素通过食物链影响人类的健康,蓝藻水华的次生代谢产物能损害肝脏,具有促癌效应,直接威胁人类的健康;(c) 蓝藻水华还会破坏生态景观. 目前,在蓝藻水华发生机理和过程尚不明确条件下,需要准确预测湖泊蓝藻水华漂移扩散的路径及范围,分析藻类在水体生态系统复杂因素作用和影响下的运动变化规律,为环境保护工作者采取应急措施提供科学依据.

目前,尽管对藻类浮力机制已经有较深的认识,但想从藻类生理、化学过程来研究藻类的运动依旧相当困难. 目前该类研究模型大多是在实验的基础上建立的. Kromkamp 等^[1]通过实验确定了颤藻密度变化与光辐射的关系,并开发出了湖泊中颤藻垂直运动模型. 该模型的核心是不同光照条件下颤藻密度的变化,它既可以计算藻类在水体中的垂直分布情况,也可以解释通常情况下藻类‘强光照藻下沉,弱光照藻上浮’的自然

收稿日期:2011-05-11

基金项目:水利部公益性行业科研专项(201001030) 南京水利科学研究院基金(Y109006,Y110005)

作者简介:邵军荣(1985—),男,江苏南通人,博士研究生,主要从事水力水质数学模型研究. E-mail: szr1215@163.com

现象. Visser 等^[2]在实验的基础上,建立了微囊藻密度变化与光辐射之间负指数(negative exponential)的响应关系,该模型最大的优点是考虑了强光对微囊藻类的抑制作用. Howard 等^[3-6]开发了藻类运动 SCUM (simulation of cyanobacterial underwater movement)系列模型. 第一代 SCUM93 模型,以 Kromkamp-Walsby 模型为基础,同时考虑了湖泊水流的运动. 第二代 SCUM 模型^[6]在第一代模型的基础上,考虑了光、营养盐同时作用下藻类的运动,但在一些实际模拟过程中,藻类密度会小于 900 kg/m³,这与实际情况严重不符,因此很快被第三代模型所取代. 第三代 SCUM96 模型^[4,7]采用理论方法计算微囊藻浮力变化,该模型对碳水化合物含量、地表辐射、湖泊水体温度、湖泊水流运动进行了详细计算,使得模型在时间、空间上有了较高的适应性. Wallac 等^[8-9]开发了具有反应时间(response time)的微囊藻垂直运动模型,该模型同样以 Kromkamp-Walsby 模型为基础,认为微囊藻在有光照辐射时,密度、碳水化合物的含量不会随着辐射的变化而立刻发生改变,而是有一个时间滞留以进行生理调节. Guven 等^[10]在前人研究的基础上建立了河流中蓝藻生长运动模型. 该模型包括 3 个子模型:藻生长子模型、河流水动力子模型、物质平衡子模型. 在藻生长子模型中综合考虑了光、温度、营养盐对藻密度的影响. 在河流水动力子模型中,分别给出了层流、紊流状态水体的流动计算公式. 在物质平衡子模型中,将河流划分成几段,每段作为一个连续搅拌反应器(continuously stirred tank reactor)进行物质平衡计算.

本文在前人研究的基础上,选择光、营养盐、温度作为控制微囊藻生长的主要因子,建立 3 种因子共同作用下的微囊藻生长、垂直运动模型.

1 模型的建立

1.1 微囊藻生长模型

光辐射直接影响微囊藻的光合作用,进而影响微囊藻中碳水化合物的含量. Wallace 等^[8,11]通过实验发现,微囊藻中碳水化合物的含量与密度成线性关系,因此光辐射影响着微囊藻密度的变化. Visser 等^[2]根据实验结果得到了有效光辐射与密度变化的关系,如图 1 所示.

通过实测数据的拟合,可得表达式:

$$\frac{d\rho}{dt} = \left(\frac{N_0}{60}\right) \bar{I}_z \exp\left(-\frac{\bar{I}_z}{I_1}\right) + N_1 \tag{1}$$

式中: $\frac{d\rho}{dt}$ ——微囊藻密度变化率, kg/(m³·min); $\bar{I}_z$ ——有效光辐射, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; I_1 ——微囊藻密度变化最快时对应的有效光辐射, 277.5 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; N_0 , N_1 ——拟合常数, 分别为 0.094 5 kg·m²/(m³· μmol), -0.016 5 kg/(m³·min).

从 Visser 的实验结果可见,当有效光辐射大于临界光辐射 I_c (10.9 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) 时,微囊藻密度增大;当有效光辐射小于 I_c 时,微囊藻得不到充足的阳光,密度下降,此时可使用 Kromkamp 等^[1]实验结果进行计算,如图 2 所示. 可得表达式:

$$\frac{d\rho}{dt} = -c_1 I_a - c_2 \tag{2}$$

式中: I_a ——有效光辐射大于 I_c 时刻到计算时刻微囊藻接受的有效光辐射平均值; c_1, c_2 ——拟合常数, 分别为 8.17×10^{-5} kg·m²·s/(m³·min· μmol), 0.023 16 kg/(m³·min).

上述光辐射与密度的关系是在实验条件下得出的. 要将实验结果引入实际湖泊中,首先需要计算确定不同地区、不同时间微囊藻所接受的有效光辐射,可采

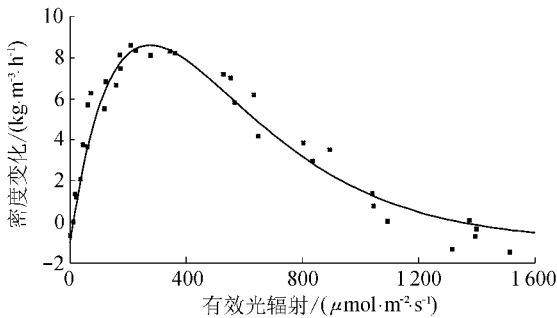


图 1 有效光辐射与密度变化关系

Fig. 1 Relationship between effective irradiance and density change

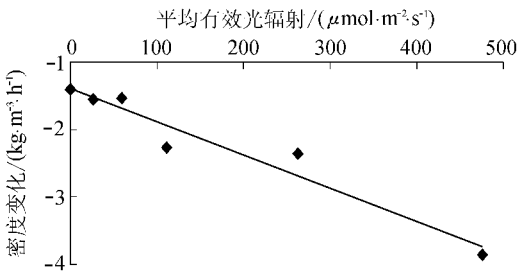


图 2 平均有效光辐射与密度变化关系

Fig. 2 Relationship between average effective irradiance and density change

用以下计算公式^[7,12]：

$$\delta = 0.409\sin(0.0172D - 1.39) \tag{3}$$

$$D_L = 0.133 \times \left(\frac{180}{\pi}\right) \times \cos^{-1}(-\tan\varphi \tan\delta) \tag{4}$$

$$D_M = 12 + \frac{120 - \Phi}{15} \tag{5}$$

$$T_1 = D_M - \frac{D_L}{2} \tag{6}$$

$$T_2 = D_M + \frac{D_L}{2} \tag{7}$$

$$I_m = I_{sc}(\sin\delta\sin\varphi + \cos\delta\cos\varphi) \tag{8}$$

式中： δ ——太阳赤纬角，rad； D ——从1月1日起的天数，d； D_L ——日照时长，h； φ ——当地纬度； D_M ——当地正午时间，h； Φ ——当地经度； T_1 ——第 D 天太阳升起时间，h； T_2 ——第 D 天太阳落山时间，h； I_m ——正午大气层上空太阳辐射， W/m^2 ； I_{sc} ——大气层上空太阳常数， $1\,370\,W/m^2$ 。

太阳辐射通过大气圈到达地表。由于大气对太阳辐射有一定的吸收、散射和反射作用，使得投射到大气上界的太阳辐射不能完全到达地面。给定时刻 t (min)，到达水体表面能被微囊藻利用的有效光辐射 I_0 可表示为^[7]

$$I_0 = 4.6c(1 - b)I_m\sin\left(\frac{\pi t}{60D_L}\right) \tag{9}$$

式中： I_0 ——有效光辐射， $\mu mol/(m^2 \cdot s)$ ； b ——大气、湖面对辐射的总衰减系数，本文取0.7； c ——光活性系数，即到达湖面能被微囊藻利用的辐射(400~700 nm)与到达湖面总辐射的比值，本文取0.47。

水深为 Z (m)，给定时刻 t (min)，则微囊藻实际接受到的有效光辐射 I_z 为

$$I_z = I_0\exp(-\varepsilon Z) \tag{10}$$

在模型计算过程中， Δt 时间间隔内，微囊藻接受到的有效光辐射用平均辐射 $\bar{I}_z$ 可表示为

$$\bar{I}_z = \frac{I_{z2} - I_{z1}}{\ln I_{z2} - \ln I_{z1}} \tag{11}$$

式中： I_{z1}, I_{z2} ——水深 z_1, z_2 处微囊藻接受到的有效光辐射。

营养盐是藻类生长的一个重要因素，国内外文献^[13-14]大多采用米门方程分别表示氮、磷对藻生长的影响，计算公式为

$$\alpha_N = \frac{\rho(N)}{K_{SN} + \rho(N)} \quad \alpha_P = \frac{\rho(P)}{K_{SP} + \rho(P)} \tag{12}$$

式中： α_N, α_P ——氮、磷对藻生长的限制因子； $\rho(N), \rho(P)$ ——氮、磷的质量浓度，mg/L； K_{SN}, K_{SP} ——氮、磷的半饱和和常数，本文 K_{SN} 取为0.2 mg/L， K_{SP} 取为0.03 mg/L。

研究表明，水体中营养盐的含量与浮游植物的数量有密切关系^[15]。在本文模型中，使用Liebig最小生长定律^[13,16]来确定营养盐对微囊藻生长的综合影响，其计算表达式如下：

$$f(\rho(N)) = \min\{\alpha_N, \alpha_P\} \tag{13}$$

温度对微囊藻生长影响可表示为^[17]

$$f(T) = \exp\left(-\frac{2.3}{15} \times |T - T_{opt}|\right) \tag{14}$$

式中： T ——水温， $^{\circ}C$ ； T_{opt} ——微囊藻最佳生长温度，取 $25\,^{\circ}C$ 。

整合光辐射、营养盐、温度对微囊藻生长的影响，并进行温度修正，计算微囊藻密度变化：

$$\frac{d\rho}{dt} = f(I)\min\{\alpha_N, \alpha_P\}\exp\left(-\frac{2.3}{15} \times |T - T_{opt}|\right) \tag{15}$$

当 $\bar{I}_z \geq I_c$ 时 $f(I) = \left(\frac{N_0}{60}\right)\bar{I}_z\exp\left(-\frac{\bar{I}_z}{I_1}\right) + N_1$

当 $\bar{I}_z < I_c$ 时 $f(I) = -c_1 I_a - c_2$
则新的微囊藻密度计算式为

$$\rho_2 = \rho_1 + \frac{d\rho}{dt}dt$$

(16)

式中： ρ_1 ——初始微囊藻密度， kg/m^3 ； ρ_2 —— dt （s）时间间隔后新的微囊藻密度， kg/m^3 。

1.2 微囊藻垂直运动模型

微囊藻颗粒直径在 0.5 mm 以内，由密度引起的运动速度小于 2 cm/min，25 ℃ 条件下绕流雷诺数约为 0.167^[18]，小于 1，绕流为层流。因此在微囊藻浓度不大的静止水体中可用斯托克斯公式^[19] 计算微囊藻垂直运动速度：

$$v = \frac{2gr^2(\rho_c - \rho_w)}{9\varphi_0 n}$$

(17)

式中： v ——微囊藻垂直运动速度， m/s ； g ——重力加速度， $9.81 \text{ m}/\text{s}^2$ ； r ——微囊藻有效半径， m ； ρ_c ——微囊藻的密度， kg/m^3 ； ρ_w ——水体密度，取 $998.2 \text{ kg}/\text{m}^3$ ； φ_0 ——藻的形状阻力，用来描述颗粒偏离球体的程度，该系数取为 1^[19]； n ——水体动力黏度， $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ，可由下式确定：

$$n = \frac{10\exp\left(-1.65 + \frac{262}{T + 139}\right)}{1000}$$

(18)

得到新的运动速度后，可计算下一个 dt 时间间隔后微囊藻所处的水深：

$$z_2 = z_1 + vdt$$

(19)

式中： z_1 ——当前微囊藻所处的水深， m ； z_2 —— dt 时间间隔后微囊藻所处的水深。

当经过时间 dt ，微囊藻所处位置确定后，再返回重新计算有效光辐射、藻密度、垂直运动速度以及微囊藻所处的水深，如此一直循环下去。

2 模型验证

Kromkamp-Walsby 模型是当今模拟颤藻垂直运动著名的模型，目前关于藻类垂直运动的模型大多以该模型为基础。为检验本文所建立模型的合理性，比较了本文所建模型和 Kromkamp-Walsby 模型的模拟结果，如图 3 所示。

由图 3 分析可见，2 个模型在藻上浮、下沉时间上具有良好的一致性。太阳升起 1 h 后微囊藻到达水体表面，且漂浮在水体表面 3 h，随后开始下沉，在日落后 2 h，微囊藻又漂浮到水体表面，直到第 2 天太阳升起后数小时才开始下沉。从模型开始计算时刻起，微囊藻与颤藻在 1 h 后漂浮到水体表面，此后藻将受到较高的光辐射。由文献 [2] 可知，高辐射照射时（ $\geq 600 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ）微囊藻密度的增加小于颤藻，而较小的密度会引起较小的运动速度，因此在同样的计算条件下，本文模型计算水深与 Kromkamp-Walsby 模型相比稍微偏小。总体来说，本文模型计算结果合理可靠，可以用来模拟静止湖泊中微囊藻的垂直运动。

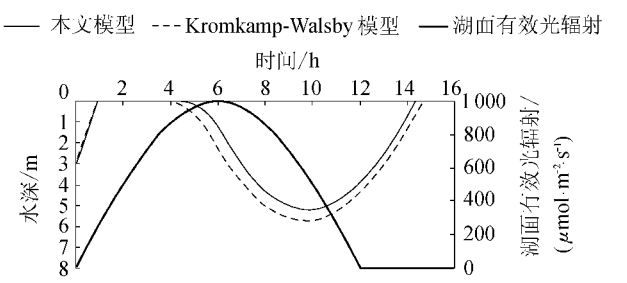


图 3 模拟结果比较

Fig. 3 Comparison of simulation results

3 模型在太湖湖区中的初步应用

将本文建立的微囊藻垂直运动模型运用到太湖中，模拟静止太湖湖体中微囊藻的运动状态。本文给定 2005 年 7 月太湖水温为 28 ℃，2005 年 7 月 15—25 日计算出的湖面有效光辐射如图 4 所示^[20]。太湖特有的参数设置如下： $N = 4 \text{ mg}/\text{L}$ ； $P = 0.15 \text{ mg}/\text{L}$ ； $\varepsilon = 3.5 \text{ m}^{-1}$ ；总水深 $T_h = 1.9 \text{ m}$ ； $\varphi = 120^\circ$ ； $\Phi = 30^\circ$ 。取不同的初始密度 ρ_0 、初始水深 z_0 以及藻半径 r 。

a. 半径大的微囊藻更容易运动到水体表面。当藻的初始密度取 $980 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，初始水深取 0.5 m（水面处为

0点),藻半径分别取 20,30 μm 时,模拟 2005 年 7 月 15 日起 10 d 内静止水体中单个微囊藻的垂直运动情况,模拟结果如图 5 所示.

从图 5 可见,半径大的藻类比半径小的更容易到达水体表面.颤藻由于具有较小的半径,因此在获得足够的密度下沉前可能运动不到湖面,而微囊藻半径较大,容易运动到湖面形成水华,这可以用来解释为何水华中的藻类多以微囊藻为主.

b. 持续大风、持续阴天后水华更易暴发.持续大风使得水体产生较强的紊动,藻类被水流带到水深较大的地方,因此大风条件下不太可能在水体表面形成蓝藻水华.适宜的水动力条件能够驱动藻类的运动,但此时必须以藻类上浮作为先决条件,这样藻类才能在水体表面积聚^[21].大风使得藻类处在较大的水深,且得不到充足的阳光生长,藻类的密度与无风时相比偏小.持续的阴天藻类得不到充足的光辐射,同样能够使藻类的密度比通常情况要小.以上 2 种条件能够提供藻类上浮这个先决条件,因此持续大风、持续阴天后,密度小的藻类会快速运动到水体表面,并且长时间停留在水体表面,如图 6 所示.如果此时有适宜的水动力条件,大量的藻类将被输运到湖泊岸线处,形成蓝藻水华.

4 结 论

本文建立了静止水体中微囊藻垂直运动模型,通过与 Kromkamp-Walsby 模型计算结果比较,发现本文模型模拟结果合理可靠.同时针对太湖湖区水动力特性,应用本文模型,分析了藻类的变化规律,认为藻半径大的微囊藻更容易运动到水体表面,这可以用来解释为何水华中的藻类多以微囊藻为主.持续大风、持续阴天将导致微囊藻的密度降低,一旦大风等导致微囊藻密度降低的条件消失,湖泊将容易暴发水华.

然而,藻类垂向运动影响因素较多,本文仅对单个藻在静止水体中的运动进行了初步研究,实际上整个湖泊中藻类的运动状态相当复杂.

参考文献:

[1] KROMKAMP J, WALSBY A E. A computer model of buoyancy and vertical migration in *cyanobacteria* [J]. *Journal of Plankton Research*, 1990, 12(1): 161-183.

[2] VISSER P M, PASSARGE J, MUR L R. Modelling vertical migration of the *cyanobacterium Microcystis* [J]. *Hydrobiologia*, 1997, 349: 99-109.

[3] HOWARD A. Computer simulation modelling of buoyancy change in *Microcystis* [J]. *Hydrobiologia*, 1997, 349: 111-117.

[4] HOWARD A, IRISH A E, REYNOLDS C S. A new simulation of *cyanobacterial* underwater movement [J]. *Journal of Plankton Research*, 1996, 18(8): 1375-1385.

[5] HOWARD A. SCUM-simulation of *cyanobacterial* underwater movement [J]. *Comput Appl Biosci*, 1993, 9(4): 413-419.

[6] HOWARD A, KIRKBY M J, KNEALE P E, et al. Modelling the growth of *cyanobacteria* (GrowSCUM) [J]. *Hydrological Processes*, 1995, 9(7): 809-821.

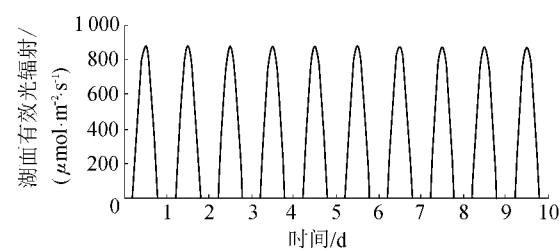


图4 水面有效光辐射日变化情况

Fig. 4 Daily variation of effective irradiance on water surface

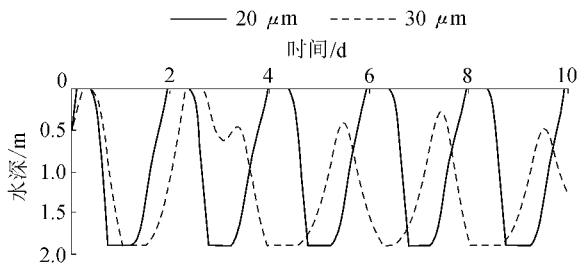


图5 不同半径微囊藻运动路径

Fig. 5 Simulation of vertical migration of *Microcystis* with different radii

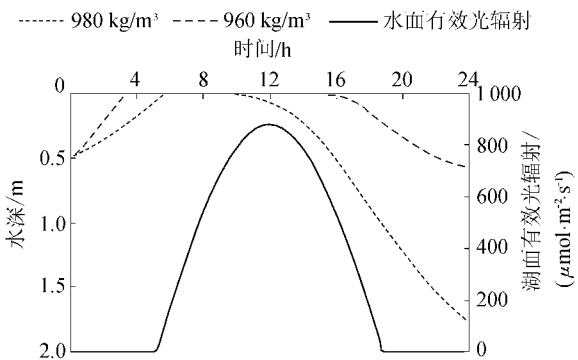


图6 不同初始密度微囊藻运动路径

Fig. 6 Simulation of vertical migration of *Microcystis* with different initial densities

- [7] HOWARD A. Modeling movement patterns of the *cyanobacterium, microcystis* [J]. *Ecological Applications*, 2001, 11(1): 304-310.
- [8] WALLACE B B, HAMILTON D P. The effect of variations in irradiance on buoyancy regulation in *Microcystis aeruginosa* [J]. *Limnology and Oceanography*, 1999, 44(2): 273-281.
- [9] WALLACE B B, HAMILTON D P. Simulation of water-bloom formation in the *cyanobacterium Microcystis aeruginosa* [J]. *Journal of Plankton Research*, 2000, 22(6): 1127-1138.
- [10] GUVEN B, HOWARD A. Identifying the critical parameters of a *cyanobacterial* growth and movement model by using generalised sensitivity analysis [J]. *Ecological Modelling*, 2007, 207(1): 11-21.
- [11] THOMAS R H, WALSBY A E. Buoyancy regulation in a strain of *Microcystis* [J]. *Journal of General Microbiology*, 1985, 131: 799-809.
- [12] 刘钰, PREIRA L S, TEIXIRA J L, 等. 参照腾发量的新定义及计算方法对比 [J]. *水利学报*, 1997, 28(6): 27-33. (LIU Yu, PREIRA L S, TEIXIRA J L, et al. Update definition and computation of reference evapotranspiration comparison with former method [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, 28(6): 27-33. (in Chinese))
- [13] 王玲玲, 戴会超, 蔡庆华. 河道型水库支流库湾富营养化数值模拟研究 [J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2009, 41(2): 19-23. (WANG Ling-ling, DAI Hui-chao, CAI Qing-hua. Simulation of eutrophication in branch of channel-type reservoirs [J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2009, 41(2): 19-23. (in Chinese))
- [14] 王恒, 孙涛, 郝芳华, 等. *环境水力学原理* [M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2005: 127-133.
- [15] 蒋玉玲, 李青, 陈晓宏, 等. 广州市大金钟水库浮游植物与环境因子的关系 [J]. *水资源保护*, 2011, 27(1): 46-50. (JIANG Yu-ling, LI Qing, CHEN Xiao-hong, et al. Relationship between phytoplankton and environmental factors in Dajinzhong reservoir of Guangzhou [J]. *Water Resources Protection*, 2011, 27(1): 46-50. (in Chinese))
- [16] GUVEN B, HOWARD A. Modelling the growth and movement of *cyanobacteria* in river systems [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 368: 898-908.
- [17] 龙天渝, 蒙国湖, 吴磊, 等. 水动力条件对嘉陵江重庆主城段藻类生长影响的数值模拟 [J]. *环境科学*, 2010, 31(7): 1498-1503. (LONG Tian-yu, MENG Guo-hu, WU Lei, et al. Numerical simulation for effects of hydrodynamic condition on algae growth in Chongqing reaches of Jialing River [J]. *Environmental Science*, 2010, 31(7): 1498-1503. (in Chinese))
- [18] 丛海兵, 黄廷林, 周真明. 于桥水库铜绿微囊藻上浮运动规律及其控制 [J]. *给水排水*, 2009, 35(11): 140-145. (CONG Hai-bing, HUANG Ting-lin, ZHOU Zhen-ming. Study on floating mechanisms and controlling of the *Microcystis aeruginosa* in Yuqiao reservoir [J]. *Water and Wastewater Engineering*, 2009, 35(11): 140-145. (in Chinese))
- [19] REYNOLDS C S, OLIVER R L, WALSBY A E. Cyanobacterial dominance: the role of buoyancy regulation in dynamic lake environments [J]. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 1987, 21: 379-390.
- [20] 陈黎明, 钱新, 杨珏, 等. 基于 DYRESM 模型的太湖全年水温模拟及其在水华预警中的应用 [J]. *环境保护科学*, 2009, 35(2): 18-21. (CHEN Li-ming, QIAN Xin, YANG Jue, et al. Water-temperature simulation of Taihu Lake based on DYRESM Model and its application in the fore-warning of cyanobacteria-bloom [J]. *Environmental Protection Science*, 2009, 35(2): 18-21. (in Chinese))
- [21] WEBSTER I T. Effect of wind on the distribution of phytoplankton cells in lakes [J]. *Limnology and Oceanography*, 1990, 35(5): 989-1001.