

藻类生长的水动力学因素影响与数值仿真

王华¹, 逢勇^{1,2}

(1. 河海大学环境科学与工程学院, 南京 210098; 2. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 南京 210098)

摘要: 为了定量研究水动力条件对藻类生长影响, 选择微囊藻进行了室内扰动实验. 通过维持光照、温度、营养盐等生境因子的一致性, 调整振荡器转速, 研究了不同扰动强度对藻类生长规律的影响; 提出了“水动力影响参数 α ”对藻类生长公式进行了修正, 以内江为例建立了二维非稳态藻类生长模型, 对不同方案下内江藻类暴发特征进行了预测分析. 结果表明, 水动力条件对藻类生长影响明显, 低流速有利于藻类生长, 而在静止与高流速条件下, 藻类生长受到抑制; 内江引航道节制闸关闭后, 流速减缓, 藻类易于暴发, 可能发生水华的水域面积约 2.5 km^2 , 占总面积的 36.8%; 完全静止状态以及节制闸开启后内江水动力条件改善条件下, 藻类暴发程度有所减小, 可能发生水华面积分别为 0.78 km^2 和 0.18 km^2 .

关键词: 富营养化; 扰动; 流速; 藻类; 水华

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)04-0884-06

Numerical Simulation on Hydrodynamic Character for Algae Growth

WANG Hua¹, PANG Yong^{1, 2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory for Integrated Regulation and Resources Exploitation on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to quantitatively study the direct effects of hydrodynamic condition on the growth of algae, the *Microcystis aeruginosa* was chosen to carry through the disturbance-experiment. By keeping the same value of illumination, temperature and nutrition and changing the rotate speed of oscillator, the growing processes of algae under different disturbance intensities were researched. The hydraulic parameter was presented to amend the formula for the growth of algae. Take Neijiang as an example. A 2-D unsteady model for algae growth was established to forecast the scope of water blooms in Neijiang. It is found that the growth of algae is obviously influenced by hydrodynamic condition, and a condign low velocity is beneficial for its growth while both the quiescence condition and high velocity will restrain its growth rate. After the close of the water gate in Leading Channel, the velocity in Neijiang will be decreased, which accelerated the growth rate of algae, and the area of water blooms will be increased to 2.5 km^2 which is about 36.8 percent of the total water surface area of Neijiang. Under the quiescent condition and the improved hydrodynamic condition, the growth rate of algae will be effectively controlled and the area of water blooms will be reduced to 0.78 km^2 and 0.18 km^2 respectively.

Key words: eutrophication; disturbance; velocity; algae; water blooms

水体富营养化是当今世界范围内亟待解决的水质问题之一^[1~3]. 解决富营养化问题的核心是抑制浮游植物的过量生长, 即消除藻类^[4,5]. 目前关于克藻方法的研究比较广泛, 主要可分为: ①物理法, 如水体解层^[6~8]、絮凝-沉淀法^[9,10]、活性炭吸附法^[11,12]、稀释与冲刷等; ②化学法, 包括施用化学药剂(称杀藻剂, algicide)、光降解和光催化氧化^[13]、臭氧氧化^[14]等; ③生物法, 如利用藻类病原菌或藻类病毒抑藻^[15]、水生植物化感物质抑藻^[4]等. 此外, 一些学者还从稀土积累^[16]、超声波^[17]等方面对克藻作用进行了研究. 然而, 针对水动力条件抑制藻类生长的量化研究, 尚不多见. Mitrovic 等^[18]曾就此进行了初步探讨, 但其研究均基于野外条件, 缺乏必要的实验支撑. 本研究选择微囊藻进行了室内扰动实验, 通过维持藻类其它生境因子的一致性, 定量分析了不同扰动强度对藻类生长规律的影响; 基于实验结

果, 提出了“水动力影响参数 α ”对藻类生长率公式进行了修正; 以镇江内江为例, 针对其感潮特性明显, 水文情势复杂多变的特征, 在有限体积法框架下, 建立了二维非稳态藻类生长模型, 从而准确模拟、预测了内江藻类暴发的时空分布特征.

1 研究背景

内江位于江苏省镇江市, 水面面积约 6.8 km^2 , 其上游通过引航道与长江相通, 下游通过焦南闸与长江汇聚(见图 1). 受长江潮汐作用, 内江感潮特性明显, 每日出现 2 次高低潮. 由于长江水沙年际、年内分布不均, 极易导致内江水量、水质及泥沙的不平

收稿日期: 2007-04-23; 修订日期: 2007-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(50579015); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2003AA6011002)

作者简介: 王华(1983~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水环境保护及数值模拟, E-mail: wanghua543543@163.com

个 $\cdot\text{mL}^{-1}$;当转速增加到 $120\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 以上时,藻细胞数量又明显减少,平均最大生物量仅为 3.3×10^5 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$;④静止条件下,微囊藻增长率较低,仅为 0.29 d^{-1} ;转速为 $60\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $90\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时增长率相对较高,分别达 0.57 d^{-1} 、 0.71 d^{-1} ;随着扰动强度的加大,增长率又呈现降低趋势,转速达 $200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时增长率仅为 0.33 d^{-1} 。综上所述:适当的扰动强度能促进铜绿微囊藻的生长,维持其较高的生物量,而静止状态与高强度扰动对藻类生长有明显的抑制作用。

3 水流对藻类生长影响

3.1 藻类生长模型

基于实验结果,以内江为例,将藻类生长模型与水动力模型相耦合,在有限体积法框架下,建立了综合考虑光照、温度、营养盐及水动力条件等影响因子的二维非稳态藻类生长模型。

3.1.1 基本方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \\ & \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2 + gh^2/2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} \\ & = gh(s_{0x} - s_{fx}) \\ & \frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2 + gh^2/2)}{\partial y} \\ & = gh(s_{0y} - s_{fy}) \\ & \frac{\partial(hN)}{\partial t} + \frac{\partial(huN)}{\partial x} + \frac{\partial(hvN)}{\partial y} \\ & = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_x h \frac{\partial N}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_y h \frac{\partial N}{\partial y}\right) + S_N \\ & \frac{\partial(hP)}{\partial t} + \frac{\partial(huP)}{\partial x} + \frac{\partial(hvP)}{\partial y} \\ & = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_x h \frac{\partial P}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_y h \frac{\partial P}{\partial y}\right) + S_P \\ & \frac{\partial(hc_{\text{chl-a}})}{\partial t} + \frac{\partial(huc_{\text{chl-a}})}{\partial x} + \frac{\partial(hvc_{\text{chl-a}})}{\partial y} \\ & = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_x h \frac{\partial c_{\text{chl-a}}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_y h \frac{\partial c_{\text{chl-a}}}{\partial y}\right) + S_{\text{chl-a}} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, h 为水深; t 为时间; u 、 v 为 x 、 y 方向垂线平均水平流速分量; g 为重力加速度; s_{0x} 为 x 向的河底底坡; s_{0y} 为 y 向的河底底坡; s_{fx} 为 x 向摩阻底坡; s_{fy} 为 y 向摩阻底坡; N 、 P 分别为总氮、总磷的垂线平均浓度; $c_{\text{chl-a}}$ 为叶绿素 a 的垂线平均浓度; S_N 、 S_P 、 $S_{\text{chl-a}}$ 分别为氮、磷和叶绿素 a 的源汇项,具体为:

$$S_N = R_N - F_N + C_N - U_N$$

$$S_P = R_P - F_P + C_P - U_P \quad (3)$$

$$S_{\text{chl-a}} = (\mu - s - d)c_{\text{chl-a}}$$

式中, R_N 、 R_P 分别为底泥中氮、磷释放项; F_N 、 F_P 分别为氮、磷沉降项; C_N 、 C_P 分别为藻类死亡分解对氮、磷的贡献项; U_N 、 U_P 分别为藻类对氮、磷的吸收项; μ 为藻类生长率; s 为藻类沉降率; d 为藻类损失率。其中针对藻类生长率 μ , 文中提出了“水动力影响参数 α ”进行修正。

$$\mu = \mu_{\max} \cdot f(T) f(I) f(N) f(P) \cdot \alpha \quad (4)$$

式中, $\mu_{\max}$ 藻类最大生长率; $f(T)$ 为温度函数; $f(I)$ 为光照函数; $f(N)$ 与 $f(P)$ 为氮磷营养盐函数; α 为水动力影响参数, $0 < \alpha < 1$, $\alpha = g(u)$ 。

3.1.2 方程离散

将水流水质方程与藻类生长方程联合求解, 公式(2)可统一写为以下形式^[22~24]。

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial f(q)}{\partial x} + \frac{\partial g(q)}{\partial y} = b(q) \quad (5)$$

式中, q 为守恒物理量; $f(q)$ 与 $g(q)$ 分别为 x 、 y 方向通量; $b(q)$ 为源汇项。

$$f(q) = (hu, hu^2 + gh^2/2, huv, huN, huP, huc_{\text{chl-a}})^T$$

$$g(q) = (hv, huv, hv^2 + gh^2/2, hvN, hvP, hvc_{\text{chl-a}})^T \quad (6)$$

$$b(q) = (0, gh(s_{0x} - s_{fx}), gh(s_{0y} - s_{fy}),$$

$$\nabla \cdot (D_i \nabla (hN)) + S_N, \nabla g(D_i \nabla (hP)) + S_P,$$

$$\nabla \cdot (D_i \nabla (hc_{\text{chl-a}})) + S_{\text{chl-a}})^T$$

在任意形状的单元 Ω 上采用有限体积法对式(5)进行积分离散, 运用 FVS 格式求解法向数值通量。具体求解及模型率定验证过程详见文献[25, 26]。

3.2 流速与扰动对应关系

室内实验可通过维持其它环境因子的统一性研究动力条件对藻类生长的影响, 但由于野外环境与室内条件的客观差异性, 如何将室内扰动强度转换成模型中水体流速却是难点。本研究结合内江实际, 通过大规模同步监测及泥沙起悬试验, 以起悬泥沙浓度为中间因子, 建立了扰动强度与水体流速的等量转化关系。

3.2.1 野外同步监测

根据内江潮汐特征, 选择 2004-04-21 ~ 2004-04-22 和 2004-08-18 ~ 2004-08-19 洪枯 2 季 2 个典型全日潮进行监测。2 次监测点位布置相同: 在引航道上、下断面, 运粮河段断面, 焦南闸断面布置 4 处监测断面, 各断面布置左、中、右 3 条监测垂线; 在内江

水域布设 7 条水文测验垂线,全潮过程同步监测水流、泥沙,见图 3.内江水体泥沙以悬移质为主,垂向分布明显;考虑对流扩散作用对监测点位泥沙浓度的影响,文中采用各监测垂线 0.8*H* 处监测结果,建立内江水体实际流速与起悬泥沙浓度关系见图 4.内江起悬泥沙浓度随水体流速的增大而增加,二者呈现明显的正比关系,采用二次函数曲线进行拟合,结果为:

$$SS = 0.539u^2 - 0.131u + 0.008 \quad (R = 0.82) \quad (7)$$

式中,SS 为起悬泥沙浓度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$); *u* 为水体流速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); *R* 为相关系数.

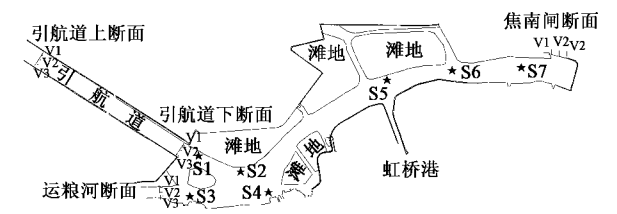


图 3 内江水文水质监测点位及断面布置

Fig.3 Monitoring points and sections in Neijiang

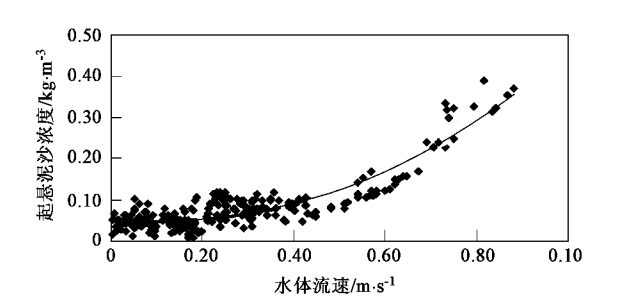


图 4 内江水体流速与泥沙起悬浓度相关曲线

Fig.4 Relationship between velocity and concentration of re-suspended sediments

3.2.2 泥沙起悬实验

考虑到内湖泥沙淤积特性在潮汐作用及地形因素影响下随空间分布不均,实验共布置 S1~S6 共 6 个底泥采样点(见图 3).采用柱状采样器采集泥样,实验用水完全取自泥样点内江原水.实验设置 6 个扰动强度,转速分别为 60、90、120、150、180 以及 200 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$,每组扰动设置 2 个重复^[27~29].根据实验结果绘制扰动强度与起悬泥沙浓度相关曲线见图 5,采用指数函数进行拟合:

$$SS = 0.0059\exp(0.0211\omega) \quad (R = 0.94) \quad (8)$$

式中, ω 为扰动转速($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$); *R* 为相关系数.

3.2.3 相关性建立

动力扰动是泥沙起悬的主要原因^[30~32],文中定

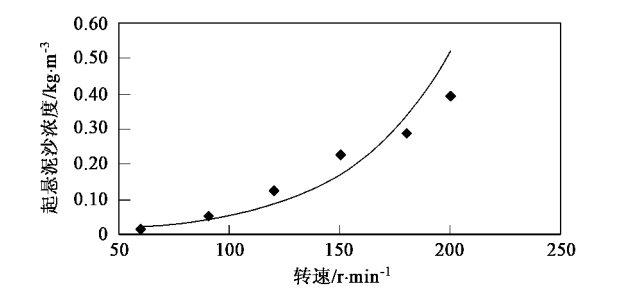


图 5 扰动强度与泥沙起悬浓度相关曲线

Fig.5 Relationship between the concentration of re-suspended sediments and disturbance intensity

义“引起相同起悬泥沙浓度的室内扰动与水体流速其动力效应是相当的”.从而根据野外实测及室内泥沙起悬实验结果,建立扰动与流速关系如下:

$$u = \sqrt{0.01\exp(0.0211\omega)} - 0.1215 \quad (\omega > 0) \quad (9)$$

由公式(9)可得不同流速条件对藻类增长率的影响见图 6,曲线表明低流速条件有利于藻类生长,而静止与高流速对藻类生长有一定抑制作用.

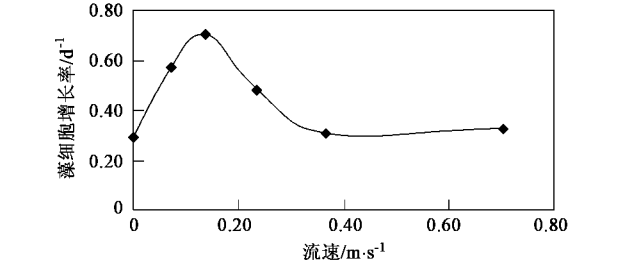


图 6 水体流速与藻细胞增长率相关曲线

Fig.6 Relationship between the increasing rate of algae cells and velocity of water current

3.3 数值仿真

运用所建藻类生长模型对引航道节制闸关闭后的低流速条件、节制闸开启后的高流速条件以及完全静止状态下内江藻类生长过程进行数值模拟.计算区域为内江,根据地形资料,应用 gambit 软件将其划分为 2 645 个四边形单元网格,共 2 882 个节点,平均网格尺寸为 50 m×50 m.以 2004 年 8 月引航道、运粮河全日潮实测流量以及焦南闸实测水位作为计算边界.考虑计算稳定性及精度,取时间步长 Δt 为 1 s.根据计算结果,运用 surfer 软件绘制 3 种方案下内江藻类暴发的空间分布见图 7~9(根据文献[33],以叶绿素 a 浓度 $10 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 作为水华暴发临界值).结果表明:节制闸关闭后,内江水流减缓,平均流速在 $0.05 \sim 0.12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,内江可能发生水华

面积达 2.5 km^2 , 约占水域总面积的 36.8%; 完全静止状态下, 藻类暴发程度有所减小, 可能发生水华面积约 0.78 km^2 ; 节制闸开启后, 内江水动力条件改善, 水体流速达 $0.20 \sim 0.30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 藻类生长明显受到抑制, 可能发生水华区域仅 0.18 km^2 , 且仅在一些岸边滞留区, 这一结论与“太湖流域富营养化控制机理研究”课题的相关研究成果一致。



图 7 完全静止状态下内江藻类空间分布

Fig.7 Distribution of algae in Neijiang under quiescent condition



图 8 节制闸关闭(低流速)内江流场及藻类空间分布

Fig.8 Flow structure and distribution of algae in Neijiang after the closing of water gate (low velocity)



图 9 节制闸开启(高流速)内江流场及藻类空间分布

Fig.9 Flow structure and distribution of algae in neijiang after the opening of water gate (high velocity)

4 结论

(1) 动力条件对藻类生长影响明显, 适当的动力扰动能促进藻类生长, 维持其较高的生物量, 而静止状态与高强度扰动对藻类生长有明显的抑制作用。

(2) 提出了“水动力影响参数 α ”对藻类生长公式进行修正, 完善了藻类生长数学模型, 从而能够更合理地预测水体富营养化。

(3) 内江引航道节制闸关闭状态下, 水流减缓, 藻类易于暴发, 可能发生水华面积达 2.5 km^2 ; 完全静止条件下, 藻类暴发程度有所减小, 可能发生水华面积约 0.78 km^2 ; 节制闸开启后, 藻类生长受水流抑制作用明显, 可能发生水华面积仅为 0.18 km^2 。

参考文献:

- [1] 卢小燕, 徐福留, 詹巍, 等. 湖泊富营养化模型的研究现状与发展趋势[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 792-796.
- [2] Jorgensen S E. State-of-the-art of ecological modeling with emphasis on development of structural dynamic models [J]. Ecological Modelling, 1999, 120: 75-96.
- [3] Rast W, Hdland M. Eutrophication of lakes and reservoirs: a framework for making management decisions [J]. Ambio, 1988, 17(1): 2-12.
- [4] 施丽丽, 刘昕雁, 刘瑶, 等. 黄花水龙克藻效应的研究及其野外应用[J]. 南京大学学报(自然科学), 2006, 42(5): 502-505.
- [5] Smetacke V. Coastal eutrophication: Causes and consequences. Mantourl M. Ocean margin processes in global change [M]. New York: John Wiley & Sons, 1991. 251-279.
- [6] Jones G J, Poplawski W. Understanding and management of cyanobacterial in sub-tropical reservoirs of queensland, Australia [J]. Wat Sci Tech, 1998, 37(2): 161-168.
- [7] 翁酥颖, 戚蓓静, 史家梁, 等. 环境微生物学 [M]. 北京: 科学出版社, 1985. 145-148.
- [8] Lafforgue M, Szeligiewicz W. Selective mechanisms controlling algal succession in Aydat lake [J]. Wat Sci Tech, 1995, 32(4): 117-127.
- [9] Chow C W K, House J, Velzeboer R M A, et al. The effect of ferric chloride flocculation on cyan bacterial cells [J]. Water Res, 1998, 32(2): 808-814.
- [10] Grutzmacher G, Bottcher G, Chorus I. Removal of microcystins by slow sand filtration [J]. Environ Toxicol, 2002, 17(4): 386-394.

[11] Warhurst A M, Raggett S L, McConnachie G L, *et al.* Adsorption of the Cyanobacterial hepatotoxin Microcystins-LR by a low-cost activated carbon from the seed husks of the pan-tropical tree, *Moringaoleifera*[J]. *Science of the Total Environment*, 1997, **207**: 207-211.

[12] Morris R J, Williams D E, Luu H A, *et al.* The adsorption of Microcystins-LR by natural clay particles[J]. *Toxicant*, 2000, **38** (2):303-308.

[13] Welker M, Steinberg C, Jones G. Release and persistence of microcystin in natural waters [A]. In: *Cyanotoxins-Occurrence, Causes, Consequences*[C]. Berlin: Springer, 2001.83-101.

[14] 穆丽娜,陈传炜,俞顺章,等.太湖水体微囊藻毒素含量调查及其处理方法研究[J]. *中国公共卫生*, 2002, **18**(12): 1455-1456.

[15] Pelly J. What is causing toxical algal blooms [J]. *Enviro Sci Tech/News*, 1998, **1**(1): 26-30.

[16] 章健,刘庆都,姜玲,等.稀土积累对水体中藻类生长的影响[J]. *生物学杂志*, 1997, **14**(78): 34-35.

[17] 屠清瑛,章永泰,杨贤智.北京什刹海生态修复试验工程[J]. *湖泊科学*, 2004, **16**(1): 61-67.

[18] Mitrovic S M, Oliver R L, Rees C. Critical flow velocities for the growth and dominance of *Anabaena circinalis* in some turbid freshwater rivers [J]. *Freshwater Biology*, 2003, **48**: 164-174.

[19] 史小丽,王凤平,蒋丽娟,等.扰动对外源性磷在模拟水生态系统中迁移的影响[J]. *中国环境科学*, 2002, **22**(6): 537-541.

[20] 张路,范成新,秦伯强,等.模拟扰动条件下太湖表层沉积物磷行为的研究[J]. *湖泊科学*, 2001, **13**(1): 35-38.

[21] 朱广伟,秦伯强,高光.强弱风浪扰动下太湖的营养盐垂向分布特征[J]. *水科学进展*, 2004, **15**(6): 775-779.

[22] Zhao D H, Shen H W, Tabios III G Q, *et al.* Finite-Volume Two-Dimensional Unsteady-Flow Model for River Basins[J]. *Hydr Engrg ASCE*, 1994, **120**(7): 863-883.

[23] 赵棣华,戚晨,庾维德,等.平面二维水流-水质有限体积法及黎曼近似解模型[J]. *水科学进展*, 2000, **11**(4): 368-374.

[24] Zhao D H, Shen H W, Lai J S. Approximate Riemann Solvers in FVM for 2-D Hydraulic Shock Waves Modeling [J]. *Hydr Engrg ASCE*, 1996, **122**(12): 693-702.

[25] 胡四一,谭维炎.无结构网格上二维浅水流动的数值模拟[J]. *水科学进展*, 1995, **6**(1): 1-9.

[26] 丁玲.水体透明度模型及其在沉水植物恢复中的应用研究[D].南京:河海大学, 2006. 1-146.

[27] 李一平,逢勇,陈克森,等.水动力作用下太湖底泥起动规律研究[J]. *水科学进展*, 2004, **15**(6): 771-774.

[28] 孙小静,秦伯强,朱广伟,等.风浪对太湖水体中胶体态营养盐和浮游植物的影响[J]. *环境科学*, 2007, **28**(3): 506-511.

[29] 陈德辉,刘永定,袁峻峰,等.微囊藻和栅藻共培养试验及其竞争参数的计算[J]. *生态学报*, 1999, **19**(6): 908-913.

[30] 林炳尧.泥沙起动流速随机特征的初步分析[J]. *泥沙研究*, 2000, **1**: 46-49.

[31] 窦国仁.再论泥沙起动流速[J]. *泥沙研究*, 1999, **6**: 1-6.

[32] 张兰丁.粘性泥沙起动流速的探讨[J]. *水动力学研究与进展 A 辑*, 2000, **15**(1): 82-87.

[33] 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): 590-594.