J. Lake Sci.(湖泊科学),2010,**22**(4):563-568
http://www.jlakes.org. E-mail:jlakes@niglas.ac.cn
© 2010 by *Journal of Lake Sciences*

不同温度下水流对铜绿微囊藻生长的影响模拟*

王婷婷[1],朱　伟[1,2],李　林[1]
(1:河海大学环境科学与工程学院,南京 210098)
(2:水资源高效利用与工程安全国家工程中心,南京 210098)

摘　要:在蓝藻暴发机理研究中,水动力是一个非常重要的参数,目前多数研究在模拟各种流速环境的同时,未能实现实验过程中恒定的光、温条件控制.本研究采用小型环形槽模拟不同水体流速,在恒定的光、温条件下研究铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa* 905)在流动水体中的生长情况,并对比了两种典型温度(15℃和25℃)条件下的差异.结果表明,水流使微囊藻生长滞后,改变其对数生长期持续时间和比增长率,直接影响微囊藻的最大生物量;不同流速的水流对微囊藻生长的影响与一定温度范围内的温度条件有关,15℃时,水体流动不利于微囊藻的生长繁殖;而在25℃时,微囊藻细胞生理活性增加,微囊藻对水体流动环境适应能力增强,水体流动更有利于微囊藻的生长繁殖,且流速在15cm/s时微囊藻获得最大生物量.
关键词:铜绿微囊藻;流速;温度;生物量;比增长率;模拟

Simulation on the hydrodynamic effects of *Microcystis aeruginosa* in different temperature conditions

WANG Tingting[1],ZHU Wei[1,2] & LI Lin[1]
(1:*School of Environmental Science and Engineering*,*Hohai University*,*Nanjing* 210098,*P. R. China*)
(2:*The Efficient Use of Water Resources and Engineering Center for Engineering National Security*,*Nanjing* 210098,*P. R. China*)

Abstract:Hydrodynamic parameter is an important factor affecting algal bloom,so that many experiments have been carried out to simulate hydrodynamic conditions such as variable flow velocity,but the simulations have not included constant temperature and light. To consider the issues,we studied the effects of variable flow velocity on growth of *Microcystis aeruginosa* under constant temperature and light,and then analyzed the differences between 15℃ and 25℃. The results show that when the upgrowth prolonged,the time of exponential growth,maximum growth ratio and maximum biomass of algae were affected by fluid water. The growth of algea was influenced by fluid water which was controlled by temperature at 15℃,when the growth of *Microcystis* was inhibited by fluid water. However,at 25℃,the growth of *Microcystis* was promoted because the temperature improves adaptation of *Microcystis* to fluid water and *Microcystis* obtains optimal growth rate under the condition of 15cm/s.
Keywords:*Microcystis aeruginosa*;water flow velocity;temperature;biomass;growth rate;simulation

随着湖泊富营养化的加剧,藻类水华发生的频率和幅度不断增加,给人们的生产和生活带来了巨大危害[1-2].目前,国内外就蓝藻水华暴发的成因和基本条件开展了大量研究,现有成果表明:蓝藻水华的暴发一般与蓝藻的生理特点、营养盐、温度、光照及其它生物等诸多环境因素密切相关[3].其中,水动力条件起到了不可忽视的作用[4],这种作用在浅水湖泊中更为显著.任健等[5]通过对1986-2007年12个太湖蓝藻暴发典型个例的分析,发现水流条件是引发蓝藻暴发的主要诱导因素之一;还有一些研究报道,湖泊中水体的流动可能比水体中营养盐的含量本身更能影响蓝藻的生长[6].可见就水流对蓝藻生长影响的具体研究有重要意义.

---

* 国家自然科学基金项目(50979028)资助.2009-10-19收稿;2009-12-17收修改稿.王婷婷,女,1986年生,硕士研究生;E-mail:wangting19860801@163.com.

关于水流对蓝藻生长影响的研究,主要集中于水流通过改变水体环境从而间接影响蓝藻生长的研究.然而 Reynolds 等[7]研究认为,水流还可能通过改变藻类生长的生物学条件,从而直接影响藻的生长、繁殖和组成,其中蓝藻个体数目较小,对水流更为敏感.金相灿、史小丽等[8-9]在室外研究了某一扰动条件下蓝藻的生长情况;王华、颜润润等[10-11]利用恒温振荡培养箱研究了不同程度扰动对蓝藻生长的影响,研究都发现,扰动直接改变了蓝藻的生长情况.另外,焦世珺、Ding Ling、曹巧丽等[12-14]利用大型水槽进行了水流对蓝藻生长影响的定量研究,也发现,流速改变直接影响蓝藻的生物量,但由于缺少对光、温条件的考虑和控制,结果差异较大.而高月香等[15]研究认为水流对蓝藻生长的影响与外界条件有关.因此,为了进一步明确不同流速的水流对蓝藻生长的影响,必须在控制其他外界条件稳定的基础上,展开不同外界条件下水流对蓝藻生长影响的具体研究.

本实验以小型环形槽作为实验装置模拟不同流速,实验在光照培养箱中进行,实现了对光、温条件的恒定控制.实验对比研究了两种典型温度下,铜绿微囊藻在流动水体中生长情况,旨在明确水流对铜绿微囊藻生长的影响及随温度的变化,为蓝藻水华的防治提供一定的理论依据.

1 材料及方法

1.1 实验材料

实验所用铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa* 905)购自中国科学院水生生物研究所,用 BG-11 培养基[16]在光照度 3000lx、25℃恒温条件下扩大培养 1 周左右,使藻密度大于 10^6 cells/ml.实验用水采用 BG-11 培养基.

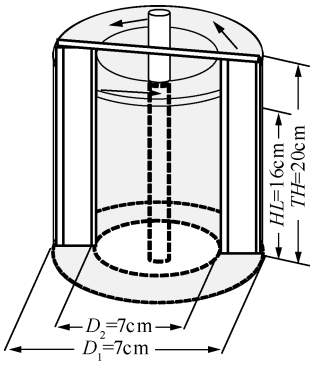

图 1 小型有机玻璃环形槽

Fig. 1 Small perspex ring groove

1.2 实验方法

取一定体积扩大培养的藻液在 4500r/min 的速度离心 15min,弃去上清液,用 15mg/L 的碳酸氢钠溶液洗涤后离心,重复 3 次,再用无菌水稀释后接种于培养基中进行饥饿培养,2d 后用于实验[17],实验初始藻密度为 20.0×10^4 cells/ml 左右.

实验装置采用带推流叶片的小型有机玻璃环形槽,如图 1 所示,推流叶片在电动机的驱动作用下,推动槽内水体流动产生水流,通过调节电动机转速进而控制槽内水体的不同流速.这一环流水槽可以模拟无限长水流条件,模拟流速范围为 0 - 55cm/s.根据太湖的水流特征[18-19],实验设置了 6 个流速梯度:0、5、10、15、25、35cm/s,其中 0cm/s 为静止对照组.在实验进行前装置采用紫外灯杀菌 2 - 4h.实验过程设置三组平行样.

实验在光照培养箱中进行,以维持稳定的光照及温度条件.实验条件的设置参考铜绿微囊藻生长最适的条件:光照度 2500lx,光暗比 14h∶10h,由于春季是蓝藻开始大量繁殖的阶段,对后期蓝藻的大规模迅速暴发有重要意义[20],因此参考太湖春季平均温度和春末时温度,选择 15℃和 25℃作为两种温度条件.

1.3 测试指标

隔天在同一时间暂停运行装置 3 - 5min,取样进行藻细胞计数,用无菌吸管吸取 1ml 的藻类培养液,移至试管中,振荡后吸取 0.1ml 到 0.1ml 微藻计数板上,在双目显微镜下进行细胞计数,多次计数取平均值.并根据藻细胞数计算比增长率.每次取样后做水位标记,并用无菌蒸馏水补充实验期间蒸发损失的水分.

比增长率(μ)计算公式为:

$$\mu=\ln(x_2/x_1)/(t_2-t_1)$$

式中:x_1 为某一时间间隔开始时的藻细胞数量(cells/ml);x_2 为某一时间间隔终结时的藻细胞数量(cells/ml);t_2-t_1 为某一时间间隔(d).

2 结果及分析

2.1 铜绿微囊藻在不同流速水体中的生长曲线

两种温度下不同流速水体培养的铜绿微囊藻细胞数量随时间变化的曲线，即微囊藻的生长曲线见图 2. 从整体上看，微囊藻的生长曲线都经过了适应期、对数生长期、稳定期和衰亡期 4 个阶段. 流速的差异使生长曲线发生明显的变化，而温度不同时这种变化亦有不同. 15℃时，微囊藻随着流速的变化相对较小，在静止水体中较早达到最大藻细胞数量，且藻细胞数量获得最大增长. 25℃时，相对于静止水体而言，流动水体中微囊藻细胞数量都较大，而且随着流速的变化也比较明显，流速在 15cm/s 时藻细胞数量获得最大值.

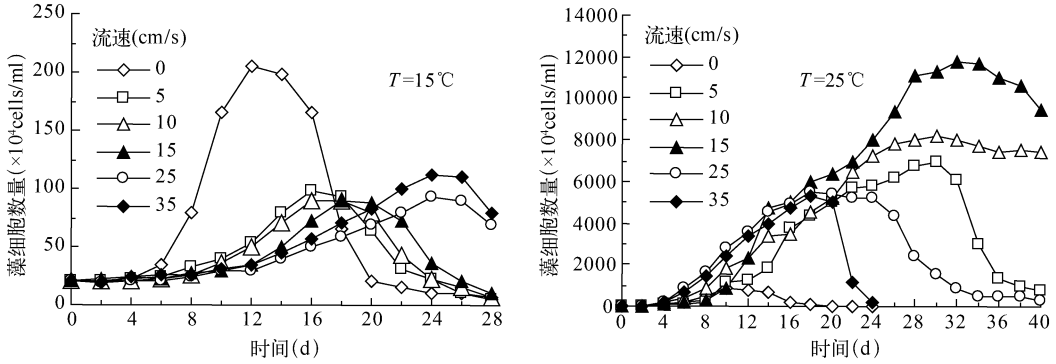

图 2 铜绿微囊藻在不同流速条件下生长曲线

Fig. 2 The growth curves of *Microcystis aeruginosa* at different flow velocities

2.2 铜绿微囊藻在不同流速时的生长周期

流速不同会对藻类的生长、繁殖产生影响，这种影响表现在适应期、对数生长期、稳定期和衰亡期四个阶段，尤其是适应期和对数生长期.

流速对铜绿微囊藻的适应期有一定的影响，两种温度条件下微囊藻在流动水体中的适应期，较静止水体都有明显延长(图 3a). 但 15℃与 25℃的表现不同，15℃微囊藻的适应期随着流速增加而延长，25℃时，则在 15cm/s 时出现最长，其后虽然流速增加但适应期不再变化. 15℃时，微囊藻在静止水体中经过 4d 的适应期就可进入对数生长期，随着流速增加，微囊藻适应期延长，5cm/s、10cm/s 及 15cm/s 实验组达到 6d，而 25cm/s 和 35cm/s 实验组适应期更是长达 8d. 25℃时，各流速条件下微囊藻适应期较 15℃明显缩短，静止对照组在实验进行到第 2d 就开始进入对数生长期，而其他实验组也在第 4d 就进入对数生长期. 3 组平行实组结果完全一致. 可见，水体流动使微囊藻生长明显滞后，低温 15℃时这种影响更为明显.

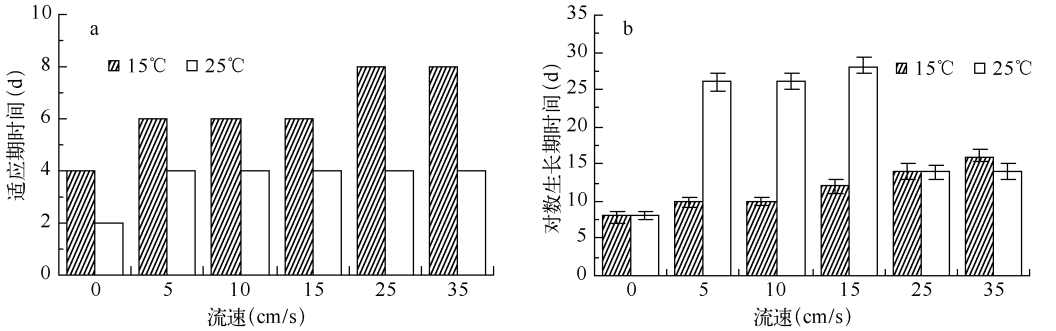

图 3 铜绿微囊藻适应期(a)和对数生长期(b)时间

Fig. 3 The adaptation period(a) and logarithmic phase(b) of *Microcystis aeruginosa*

为了比较铜绿微囊藻在不同流速时对数生长期的差异,将实验结果整理为图 3b. 3 组平行实验结果显著性差异较小,基本一致. 两种温度条件下,微囊藻在静止水体中对数生长期均在 8d 左右. 水体的流动都使对数生长期的时间有了不同程度的延长. 15℃时,流速越大,微囊藻对数生长期越长;延长倍率是静止时的 1.75 - 2.75 之间. 25℃时,以流速在 15cm/s 为峰值,对数生长期长达 22d 左右,是静止时的 2.75 倍左右,峰值之前,流速造成了对数生长期的延长,峰值之后,对数生长期增加量逐渐减少.

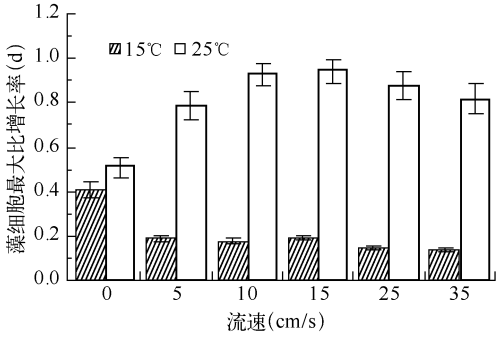

图 4 铜绿微囊藻在不同流速水体中最大比增长率

Fig. 4 The maximum specific growth rate of *Microcystis aeruginosa* at different flow velocities

2.3 微囊藻在不同流速水体中的最大比增长率

对比两种温度条件下,各实验组铜绿微囊藻的最大比增长率随流速条件的变化表明,两种温度条件下,铜绿微囊藻在不同流速水体中的最大比增长率有较大差异(图 4). 15℃时,流速的增加降低了微囊藻的最大比增长率,使其远远小于静止水体;但 25℃时,水的流动反而增加了微囊藻的最大比增长率. 流速从 0cm/s 增加到 15cm/s 时,微囊藻最大比增长率迅速增大,在 15cm/s 时达到最大值,流速从 15cm/s 增加到 35cm/s 时,基本呈现出最大比增长率随流速增加而稍有降低的趋势.

2.4 微囊藻在不同流速水体中的最大生物量

铜绿微囊藻最大生物量与流速的关系可以看出,两种温度条件下,铜绿微囊藻最大生物量随流速的变化趋势显著不同(图 5). 15℃时,流速的增加使得铜绿微囊藻最大生物量都有所减少. 各流速实验组微囊藻的最大生物量在 89×10^4 - 205×10^4 cells/ml 之间变化,其中在静止水体中获得最大值,水体流动使铜绿微囊藻最大生物量减少了 55% 左右;而 25℃时,相对于静止水体,水的流速变化造成了微囊藻最大生物量的增加,而流速为 15cm/s 时达到最大值,此后稍有下降,当流速从 15cm/s 增加到 35cm/s 时,微囊藻的最大生物量反而减少为峰值时的 54.81%,与流速表现出负相关性.

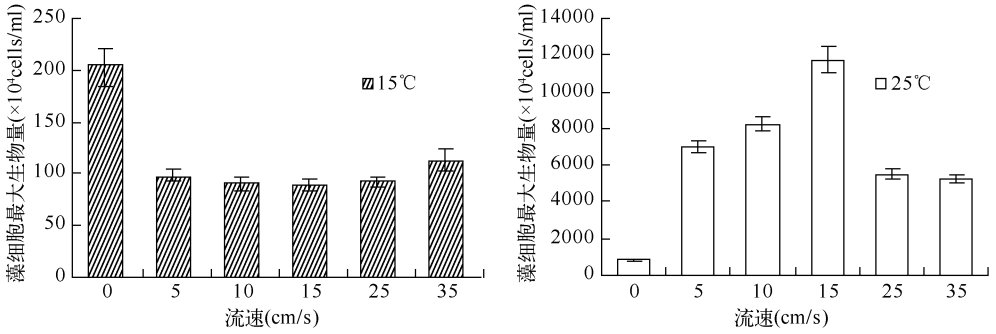

图 5 铜绿微囊藻在不同流速水体中最大生物量

Fig. 5 The maximum biomass of *Microcystis aeruginosa* at different flow velocities

2.5 讨论

有研究提出,水流直接影响铜绿微囊藻的生长,主要表现在使其生长滞后[8]. 通过对本实验的分析发现,水流条件直接改变了微囊藻生长周期各阶段持续的时间,主要延长了微囊藻的适应期和对数生长期,微囊藻在流动水体中生长明显滞后,低温 15℃时尤为明显.

实验还发现,微囊藻进入对数生长期后,微囊藻最大比增长率和微囊藻最大生物量随流速变化趋势基本一致. 15℃时,微囊藻在静止水体中获得最大比增长率,同时也获得最大的生物量. 25℃时,不同流速的水体流动对微囊藻生长的具体影响差异较大,但微囊藻最大生物量随流速变化趋势,与其最大比增长率及对数生长期持续时间随流速的变化趋势基本一致,流速在 5 - 15cm/s 范围内,微囊藻在保持最大比增长率的

基础上，对数生长期时间显著长于其它实验组，获得最大生物量，流速在 25－35cm/s 范围内，微囊藻细胞最大比增长率减小，对数生长期明显缩短，最大生物量也大量减少. 可见，不同的水流速对微囊藻生长的影响，直接表现于改变了微囊藻的生长周期和比增长率，从而影响了微囊藻的最大生物量.

就具体不同流速对藻类的影响，通常认为，流速逐渐增大对藻生长不利. 而有研究表明，除嫌流水藻类外，急流水藻类和中流水藻类都可以在流水中生长，适当的水体流动有利于藻的生长和繁殖[21]. 且廖平安、张毅敏等[22-23]也认为，蓝藻生长可能存在最佳流速条件. 在该流速条件下，水体流动有利于改变微囊藻胶质群体大小和微生态环境，从而增加微囊藻吸收营养物质的能力[8]，还有利于装置内溶氧的增加[23]；而大于该流速时，水流对藻细胞的剪切力作用增加，破坏了藻的生长、繁殖环境，抑制了藻细胞的分裂[24]. 通过对本实验的分析发现，25℃时，流速在 15cm/s 时微囊藻获得最大生物量，小于 15cm/s 时，微囊藻最大生物量与流速成正相关，大于 15cm/s 时，微囊藻最大生物量与流速成负相关. 推测在该实验条件下，25℃时微囊藻生长的最佳流速在 15cm/s. 这和 15℃时不同流速的水体流动对微囊藻生长的影响存在显著差异，温度在 15℃时，微囊藻在流速为 0cm/s 的静止水体获得最大的生物量，在流动水体生物量明显减少. 因而，流速改变对微囊藻生长的影响与实验设置的两种温度条件密切相关. 但赵颖等[24]对比研究了较高温度 25℃和 35℃时，流速对铜绿微囊藻生长的影响，发现，在该两种温度条件下，流速的改变对蓝藻生长的影响基本一致. 可见，水流对蓝藻生长的影响在较低温度范围内与温度条件相关，在较高温度范围内，水流对蓝藻生长的影响也许不受温度条件干扰.

25℃和 35℃两种温度条件下，微囊藻细胞生理活性差异不显著，但 15℃和 25℃两种温度下，微囊藻细胞生理活性显著不同，生理活动所需要的酶，在 15－25℃的温度范围内，随着温度升高其活性也增加，藻代谢速率加快[6,9]. 有研究表明[25]，在适宜的外界条件下，15－25℃范围内，温度每上升 10℃，藻类代谢活动强度增加 2 倍. 另外，Jacco 等[26]研究还发现，相比较 25℃，在 15℃时，微囊藻细胞气囊内气泡量减小，浮力下降，影响了藻细胞对光强的吸收，从而间接影响藻细胞的光合作用，藻生长情况明显差于其他温度条件，且易受水体流动带来的机械损伤，在流动水体中生长情况相对较差. 可以认为，低温条件下微囊藻本身的生命力、活性都比较小，此时水体流动对其生长、繁殖产生的负面干扰更为显著；但在适宜温度下，相对于水流的负面干扰而言，正面影响更大，适宜的流速能助长微囊藻的生长与繁殖，促进细胞进行分裂的时间延长，细胞的分裂速率加快，同时细胞对营养盐的吸收利用能力增强[27-28]，经过 3 次重复实验均能得到相同的结果.

因此，在一定温度范围内的不同温度条件下，受铜绿微囊藻细胞生理活性和代谢速率等差异的影响，铜绿微囊藻对水体流动环境的适应生长能力差异较大. 本实验条件下，15℃时，微囊藻生理活性较弱，对水体流动环境的适应能力较差，水体流动不利于微囊藻的生长与繁殖，是否可以考虑在初春较低温度时，增加水体流动，抑制蓝藻的大量生长，进而防治后期蓝藻水华的大规模暴发；但在 25℃时微囊藻细胞生理活性增强，适当的水体流动有利于微囊藻的生长与繁殖，微囊藻生长的最佳流速在 15cm/s. 考虑太湖水体的流速，如梅梁湾、贡湖等，一般在 10cm/s 左右[18-19]，其水流条件可能为春末夏初时微囊藻的大量生长与繁殖提供了有利条件.

致谢：对水资源高效利用与工程安全国家工程中心的老师在实验过程中给予的帮助，特此致谢.

3 参考文献

[1] 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. 地球科学进展，2007，**22**(9)：898-906.

[2] Codd GA. Cyanobacterial toxins the perception of water quality, and the prioritization of ertrophication control. *Ecol Eng*, 2000, **16**: 51-60.

[3] Paerl W, Fulton RS, Moisander PH *et al*. Harmful freshwater algal blooms, with an emphasis on cyanobacteria. *Sci World*, 2001, (1): 76-113.

[4] Verkhozina VA, Kozhova OM, Kusner YuS. Hydrodynamics as a limiting factor in the Lake Baikal ecosystem. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 2000, **3**: 203-210.

[5] 任　健，蒋名淑，商兆堂等. 太湖蓝藻暴发的气象条件研究. 气象科学，2000，**28**(4)：221-226.

[6] 张　民，史小丽，蒋丽娟等. 两种外源性磷及振荡对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)生长的影响. 应用与环境生

物学报,2002,**8**(5):507-510.
[7] Reynolds CS. The ecology of freshwater phytoplankton. London:Cambridge University Press,1984:132-133.
[8] 金相灿,李兆春,郑朔方. 铜绿微囊藻生长特性研究. 环境科学研究,2004,**17**(增刊):52-54.
[9] 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. 中国环境科学,2002,**22**(6):537-541.
[10] 王 华,逄 勇. 藻类生长的水动力学因素影响与数值仿真. 环境科学,2008,**29**(4):884-889.
[11] 颜润润,逄 勇. 不同风等级扰动对贫富营养下铜绿微囊藻生长的影响. 环境科学,2008,**29**(10):2749-2753.
[12] 焦世珺. 三峡库区低流速河段流速对藻类生长的影响[学术论文]. 重庆:西南大学,2007.
[13] Ding Ling,Wu Jian Q,Pang Yong *et al*. Simulation study on algal dynamics based on ecological flume experiment in Taihu Lake,China. *Ecological Engineering*,2007,**31**:200-206.
[14] 曹巧丽,黄钰玲,陈明曦. 水动力条件下蓝藻水华生消的模拟实验研究与探讨. 人民珠江,2008,**4**:8-13.
[15] 高月香,张毅敏,张永春. 流速对太湖铜绿微囊藻生长的影响. 生态与农村环境学报,2007,**23**(2):57-60.
[16] 胡小贞,马祖友,易文利等. 4 种不同培养基下铜绿微囊藻和四尾栅藻生长比较. 环境科学研究,2004,**17**(增刊):55-57.
[17] Catherine WY, Lam Warwick, Silvester B. Growth interactions among blue-green (*Anabaena Oscillarioides*, *Microcystis aeruginosa*) and green (*Chlorella* sp.) algae. *Hydrobiologia*,1979,(4):135-143.
[18] 李一平,逄 勇,张志毅等. 太湖梅梁湾-贡湖套网格风生流数值模拟. 水资源保护,2004,**2**:19-21.
[19] 秦伯强,胡维平,陈伟民等. 太湖梅梁湾水动力及相关过程研究. 湖泊科学,2000,**12**(4):327-334.
[20] 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. 湖泊科学,2009,**21**(3):314-328.
[21] 福迪 B. 著,罗迪安译. 藻类学. 上海:上海科学技术出版社,1980:392-394.
[22] 廖平安,胡秀琳. 流速对藻类生长影响的试验研究. 北京水利,2005,**2**:12-14.
[23] 张毅敏,张永春,张龙江等. 湖泊水动力对蓝藻生长的影响. 中国环境科学,2007,**27**(5):707-711.
[24] 赵 颖,张永春. 流动水体下的温度对铜绿微囊藻生长的影响. 污染防治技术,2008,**21**(2):39-41.
[25] 王志红,崔福义. 水温与营养值对水库藻华态势的影响. 生态环境,2005,**14**(1):10-15.
[26] Jacco Kromkamp,Joke Botterweg,Luuc R Mur. Buoyancy regulation in *Microcystis aeruginosa* grown at different temperatures. *FEMS Microbiology Letters*,1988,**53**(3-4):231-237.
[27] Laura Arin,Celia Marrase,Marie Maar *et al*. Combined effects of nutrients and small-scale turbulence in a microcosm experiment. I. Dynamics and size distribution of osmotrophic plankton. *Aquatic Microbial Ecology*,2002,**29**:51-61.
[28] Francesc Peters,Cèlia Marrase. Effects of turbulence on plankton:an overview of experimental evidence and some theoretical considerations. *Marine Ecology Progress Series*,2000,**205**:291-306.