

不同风等级扰动对贫富营养下铜绿微囊藻生长的影响

颜润润, 逢勇, 陈晓峰, 赵伟, 马俊

(河海大学环境科学与工程学院教育部浅水湖泊综合治理与资源开发重点实验室, 南京 210098)

摘要: 为了探讨不同营养水平条件下动力扰动对微囊藻生长产生的影响, 在实验室中模拟了不同风浪强度, 分别测定了铜绿微囊藻生长的速率. 结果显示, 贫营养下, 对藻体有规律地施以一定的扰动有助于藻类的生长, 扰动使得藻比增长率从 0.1 d^{-1} 最大增加至 0.3 d^{-1} ; 约 4.0 m/s 风力最有利于铜绿微囊藻的生长, 弱扰动对藻类生长促进作用不明显, 强扰动对藻类生长限制作用更显著. 富营养下, 各风力等级下的扰动对铜绿微囊藻比增长率和最大现存量的影响均不明显, 藻比增长率基本介于 $0.27\sim 0.29\text{ d}^{-1}$. 结果表明, 水体中营养水平相差悬殊时, 扰动所引起的营养物质重新分配相对于其他因子对藻生长具有更重要的影响. 太湖目前的富营养化状况下, 动力扰动对藻类生长的直接影响不大.

关键词: 铜绿微囊藻; 扰动; 贫营养; 富营养; 生长; 太湖

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)10-2749-05

Effect of Disturbance on Growth of *Microcystis aeruginosa* in Different Nutrient Levels

YAN Run-run, PANG Yong, CHEN Xiao-feng, ZHAO Wei, MA Jun

(Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The specific growth of *Microcystis aeruginosa* was studied under different nutrient levels and different disturbance in laboratory. It is shown that the algae get better growth under disturbance than stationary state in oligotrophic nutrient water, the specific growth rate can increase from 0.1 d^{-1} to 0.3 d^{-1} . The algae can get the maximum specific growth rate under the wind speed of 4.0 m/s , relatively low disturbance doesn't have obvious impact on algae but relatively high disturbance has evident inhibition effect on algae. In eutrophic nutrient, disturbance has little effect on the growth rate and the biomass, the specific growth is $0.27\sim 0.29\text{ d}^{-1}$. The results show the effect of disturbance on the distribution of nutrients is more important than other factors when the nutrient conditions are quite different in water body. On the condition of nutrient in Lake Taihu, the disturbance doesn't have evident effect on the growth of algae.

Key words: *Microcystis aeruginosa*; disturbance; oligotrophic; eutrophic; growth; Taihu Lake

由于我国蓝藻水华频发的湖泊多为浅水湖泊, 水浅的特点决定了湖泊的水动力过程(风力、流速等)势必会对浮游生物本身及其环境作用产生巨大的影响^[1,2]. 一些观测结果也显示, 太湖蓝藻水华的暴发一般均在稳定大风作用过后的小风或静风、天气晴朗时段, 这预示着蓝藻水华的出现与水动力过程可能存在着某种联系^[3]. 20 世纪 90 年代, 有学者提出一定强度的风浪搅动可以有效地抑制藻类的增长和聚集^[4]. 国内外多以野外观测的方法研究水华暴发和动力扰动的关系, 通过对监测资料的分析探讨风浪、水流情况对藻类生物量的影响^[5~7], 也有不少研究着重于太湖的风扰动通过影响内源释放进而间接地影响藻类的生长. 近年来, 越来越多的学者开始关注扰动对微囊藻生长的直接影响, 并展开了大量的实验工作. 金相灿等^[8]利用光照恒温生物摇床模拟扰动条件发现扰动对铜绿微囊藻生长的影响主要表现在使其生长滞后; 廖平安等^[9]采用推流技术

制造流速的实验也显示增加水体流速可以在一定程度上抑制水华的发生. 另外, 史小丽等^[10]采用悬臂搅拌机搅拌水体发现, 当扰动强度为 30 r/min 时, 铜绿微囊藻的生长是最好的; 也有实验显示, 同静止培养相比, 振荡能大大降低铜绿微囊藻的生长速率^[11].

太湖湖面频繁地受到了风的瞬时扰动, 扰动影响着蓝藻生长, 但是风浪形成的扰动对藻类的生长作用迄今未作出较为全面的定量分析. 到目前为止, 人们对动力扰动作用影响微囊藻生长的一些关键问题尚未做过研究, 例如: 实际湖体中何种扰动强度对微囊藻生长的影响最大? 在不同营养水平下这种扰动效应是否相同? 本实验则采用振荡方法^[12]模拟

收稿日期: 2007-10-11; 修订日期: 2007-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(50579015); 江苏省科技厅太湖专项(BK2007742); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20070294019); 河海大学自然科学基金项目(2007416611)

作者简介: 颜润润(1982~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为水环境规划及环境生态学, E-mail: annarr@163.com

了太湖小、中、大 3 个风力等级的扰动,研究了贫富营养水平下不同扰动对铜绿微囊藻生长的影响,探讨了扰动对铜绿微囊藻生长影响的内在原因.

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa* 7820, 单细胞)购自中国科学院水生生物研究所,保存在 pH 值为 8.6 的 MA 培养基中,培养条件为 25℃、光暗比 12 h/12 h、光强度 3 000 lx. 试验前期将处于对数生长期的微囊藻转移到无磷的 MA 培养基中培养 3d,使藻细胞处于磷饥饿状态.

1.2 实验方法

1.2.1 培养方法

在具硅胶塞的 250 mL 锥形瓶中加入 100 mL 的培养液,灭菌后,加入预先培养好的磷饥饿的铜绿微囊藻.培养液采用 MA 培养基,但是调整了氮磷营养水平以满足实验要求的贫富营养条件.藻的初始浓度约为 5.0×10^4 cells/mL,调节 pH 值为 8.6.在静止和每日扰动 2h 的间歇性振荡条件下培养铜绿微囊藻,以模拟浅水湖泊中不同强度风的搅动.每组处理设置 2 个重复.培养温度为 25℃,光源为日光灯冷光源,光照强度为 3 000 lx,光暗比 12 h/12 h.为避免由于位置不同造成的光通量差异,每次摇瓶后随机改变锥形瓶的位置,尽量使各瓶所受到光通量保持一致.

1.2.2 分析测定方法

实验中,藻类数量的测定采用一般计数法进行.自接种的当日起为第 1 d,每天在同一时间取样计数,当每组试验的日平均增长率低于 5%时,认为该组试验已达到最大现存量,即可停止测定.整个取样过程均在无菌条件下进行,以比增长率作为藻类在某一条件下增长率的估计值.

1.3 扰动强度及营养水平的确定

由于太湖频繁受到风扰动,必须选取能够代表小、中、大 3 个风等级的扰动才能较为全面地探讨不同扰动下铜绿微囊藻的生长状况.根据风力扰动引起的沉积物再悬浮等级确定了 5 个较为典型的扰动强度.为了研究扰动对不同营养水平下的铜绿微囊藻产生的生长差异,必须选择营养值悬殊较大且具代表性的水体营养水平.根据美国环保局的富营养化标准,总磷浓度 $< 10 \text{ mg/m}^3$ 为贫营养, $> 20 \text{ mg/m}^3$ 为富营养,同时考虑到太湖实际的氮磷比值,确定实验采用的氮磷浓度见表 1.

表 1 试验采用的扰动强度、氮磷比及磷浓度			
Table 1 Disturbance condition intensities, N/P ratio and phosphorus concentrations			
扰动强度 /r·min ⁻¹	N/P	贫营养(P) /μg·L ⁻¹	富营养(P) /μg·L ⁻¹
静止	25	5	100
60	25	5	100
90	25	5	100
120	25	5	100
150	25	5	100
200	25	5	100

2 结果与分析

2.1 不同风力等级下的扰动强度确定

选用和微囊藻培养试验同等规格的锥形瓶,在瓶中装入取自太湖梅梁湾的沉积物 5.00 g(湿重),再往瓶中加水至刻度 250 mL 位置,静置一段时间以模拟湖中的状态,于恒温培养振荡器内进行试验.调节振荡器转速(从 60 r/min 逐渐增至 200 r/min)对锥形瓶施以不同强度的扰动,实验中保持每种转速持续 20 min 以达到扰动影响的平衡.观察不同扰动强度下瓶中沉积物的状态发现:转速在 60 ~ 105 r/min 之间,泥液面保持相对静止,水体颜色基本没有变化;在转速达到 120 r/min 时,泥面随水流发生错动,表层沉积物发生悬扬,水体颜色变黄;当转速达到 175 r/min 时,底泥发生大规模再悬浮,水体很快便完全浑浊,整个过程上层水体的悬浮物浓度随转速变化关系见图 1.在太湖再悬浮研究中,秦伯强等^[13]发现风速 $> 4.0 \text{ m/s}$ 时沉积物才开始出现再悬浮现象;张运林等^[14]得出底泥悬浮的临界风速大约在 5 ~ 6.5 m/s 之间,当风速大于临界风速时,底泥发生大规模再悬浮.根据沉积物的再悬浮情况将风速 $< 4.0 \text{ m/s}$ 定为小风, 4.0 ~ 6.5 m/s 之间确定为中风, > 6.5

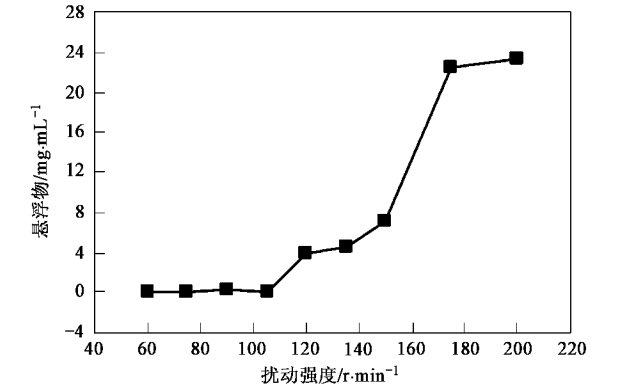


图 1 悬浮物浓度随扰动强度变化关系
Fig. 1 Relationship of total suspended matter and disturbance

m/s确定为大风,不同的风速分别代表湖泊不同的再悬浮强度等级(表 2).藻类实验中根据再悬浮强度等级选取 60 r/min和 90 r/min的扰动代表小扰动,120 r/min和 150 r/min的扰动代表中扰动,200 r/min的扰动代表大扰动,不同的扰动等级与不同的风力等级相对应.

表 2 不同再悬浮等级对应风速与试验范围内的扰动

Table 2 Wind speed and experimental disturbance under corresponding resuspension grade

再悬浮等级	扰动等级	风速范围 /m·s ⁻¹	扰动范围 /r·min ⁻¹
未悬浮	小风/小扰动	< 4	60 ~ 105
开始悬浮	中风/中扰动	4.0 ~ 6.5	120 ~ 150
大量悬浮	大风/大扰动	> 6.5	175 ~ 200

2.2 贫营养下扰动对铜绿微囊藻的生长影响

铜绿微囊藻在不同风力等级的扰动下的生长曲线及平均增长率分别见图 2 和图 3. 结果显示,相对于静止条件而言,对藻体有规律地施以一定的扰动

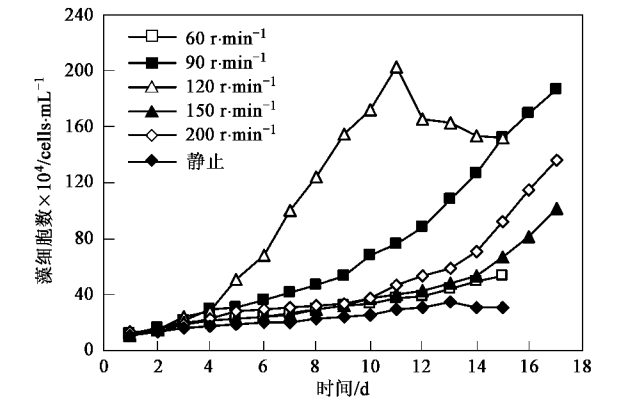


图 2 不同扰动强度下铜绿微囊藻生长曲线

Fig.2 Growth curve of *M. aeruginosa* under different disturbance

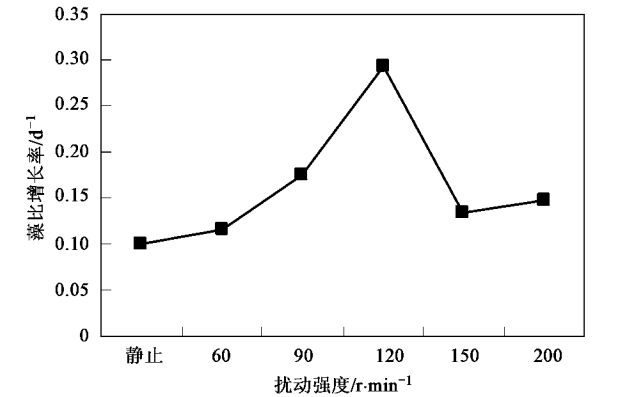


图 3 不同扰动强度下铜绿微囊藻的比增长率

Fig.3 Specific growth rate and maximum biomass of *M. aeruginosa* under different disturbance

有利于藻类的生长,但是不同的扰动强度对藻类的生长影响却又存在很大的差别. 120 r/min扰动强度即相当于太湖 4.0 m/s的风速最有利于铜绿微囊藻的生长,使藻类增长率达到 0.30 d⁻¹的.该扰动下,从第 5d 开始,铜绿微囊藻即表现出明显高于其他扰动下的现存量,之后一直以较快的速度生长,很快达到最大现存量.在试验设置的扰动强度范围内,随着扰动强度的提高,藻比增长率和最大现存量均呈现先增加后减小的趋势.在小风等级下,较大的风力(90 r/min)比较小的风力(60 r/min)更有利于藻类的生长;而中风等级下,较小的风力(120 r/min)比较大的风力(150 r/min)更有利于藻类的生长;大风等级下的扰动对藻类的生长则较前两者更为不利.

出现这样的情况,可以从以下几个方面来分析:由于铜绿微囊藻通常采用扩散方式进行磷吸收^[15],因此,其细胞生长时,会导致其周围营养盐浓度的降低.尤其当外界磷浓度较低时,将会导致扩散速度的减慢.由于扰动可以将整个培养体系的营养盐进行重新分配,不断补充细胞周围减少的营养物质,不仅有助于细胞对营养物质的吸收,而且能够提高营养物质的利用率.然而,微囊藻作为一种自养的光合植物,可通过光合作用来合成有机碳,有机碳浓度对其生长影响不大^[16].因此,扰动主要通过增加藻细胞获取氮磷等生存物质的机会来促进其生长.另一方面,藻细胞生长到一定阶段将会产生一些次级代谢产物并排放到外环境中,这些物质聚集在细胞周围时会对藻类的生长产生抑制.而扰动降低了藻细胞周围代谢产物的浓度,有助于解除代谢产物对藻细胞生长的抑制作用.然而,扰动有利于藻类生长的同时却也打乱了藻细胞进行生长的光反应和暗反应等所需要的较为稳定的环境.虽然扰动强度较低的情况对生长环境的影响不大,但是由于扰动强度太弱,对营养物质的促进方面表现得也不够明显;4 m/s风速等级的扰动在既不影响生长环境的同时又有利于营养盐的吸收和利用,故而表现出藻类最好的生长效果;然而扰动强度增长到一定程度有可能在影响藻类的生长环境这一方面表现得更为显著,因而不利于其生长.

2.3 富营养下扰动对铜绿微囊藻的生长影响

在较高的初始磷浓度培养液中,扰动对铜绿微囊藻生长(图 4)的影响均不明显,比增长率(图 5)基本间于 0.27 ~ 0.29 d⁻¹,低扰动下的最大现存量略高于高扰动.出现这样的情况,可能因为营养水平较高时,细胞周围的营养盐已经足够供给藻细胞的生

长需要,间歇性扰动所引起营养盐浓度的重新分配对藻细胞的生长没有发挥促进作用.但是扰动对微囊藻生长过程却有一定的影响,和静止组比较发现,在 60 r/min 扰动时,2 组藻生长前期非常接近,后期扰动组略有提前;随着扰动强度的增加,扰动组表现为生长滞后,并且强度越大,滞后越明显.90、120 r/min 扰动组分别在第 11、10 d 出现生长滞后,而 150 r/min 扰动组则在第 6 d 即出现延滞现象.产生生长滞后效应的原因可能是由于藻种的培养一直处于静止状态,外界的扰动影响了藻原来的生长环境,需要一些时间适应,但仍保持与静止类似的生长过程.扰动强度越大,所需要的适应时间越长,因而表现出不同风力等级下延迟时间的差异.

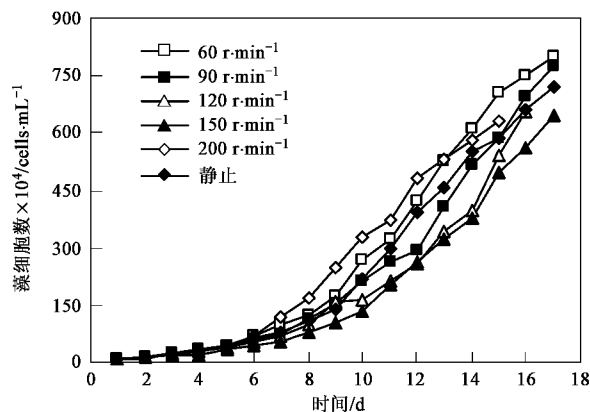


图 4 不同扰动强度下铜绿微囊藻生长曲线

Fig.4 Growth curve of *M. aeruginosa* under different disturbance

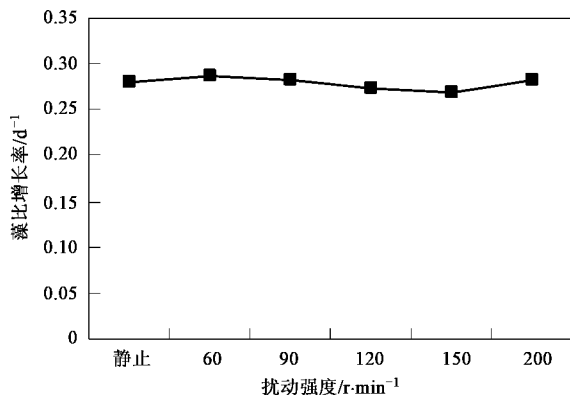


图 5 不同扰动强度下铜绿微囊藻的比增长率

Fig.5 Specific growth rate and maximum biomass of *M. aeruginosa* under different disturbance

3 讨论

河流中进行的一些实验显示增加水体流速可以在一定程度上抑制水华的发生.这在实际中也得到

了验证,如在长江中上游的三峡库区干流江段同滇池外海水体中的营养盐浓度均已达到了发生富营养化的条件,但目前长江干流尚未出现富营养化.流速过大时由于水流的冲刷作用,藻类的生长、繁殖环境受到破坏,藻类难以聚集生长形成水华^[17].然而,适当的扰动也有利于藻类的生长.在模拟长江天然流态下流速与藻类生长的关系的研究中发现,藻类在某一特定的流速下有显著的生长^[18].虽然河流和湖泊的藻类所受到的扰动方式不同,河流的动力主要来自于重力引起的水量传输,而湖泊的动力主要来自于湖面表面的风,但是藻类在河流和湖泊中的表现基本一样^[19].通过室内模拟试验研究不同流速条件对太湖水铜绿微囊藻生长的影响时也发现,扰动过小或过大都不利于藻类生长,只有在某一流速下藻类生长最快.从本试验中较低营养培养体系中不同扰动下的藻类生长规律可知,铜绿微囊藻的生长存在一个最优扰动强度约 4.0 m/s 太湖风速,该扰动强度下藻类生长状况最好,具有最大的比增长率和最大现存量.这能解释在许多氮、磷浓度较低的水体中,也时常可以见到蓝藻的水华.目前,太湖水体平均 TP 浓度为 0.1 mg/L, TN 浓度平均为 2.3 mg/L,处于富营养状态,从实验结果可知,扰动对当前太湖水体中藻类的生长的直接影响不大.

扰动对水体中微囊藻生长的影响是多方面的,它也可能影响铜绿微囊藻对光能的吸收,黑暗培养时,还可能改变微囊藻藻液中溶解氧的含量和氧化还原电位等^[11].另外,实际湖体中的扰动也可能改变铜绿微囊藻胶质群体的大小和水体中的微生态系统,例如藻-菌关系等.不同营养盐条件下的试验结果证实,扰动所引起的营养物质重新分配相对于其他因子对藻生长具有更重要的影响.营养水平较高时,细胞周围的营养盐已经足够供给藻细胞的生长需要,在此情况下,间歇性扰动所引起营养盐浓度的重新分配对藻细胞的生长影响不大.然而,在实际湖体中,风扰动对藻类的影响则是多方面的叠加效应. Sheng 等^[20]在浅水湖泊中与海湾中研究发现,沉积物的悬浮主要是由于波浪的作用,其贡献可以达到 70% 以上.湖水中营养盐浓度较低时,扰动不仅使水体中本身的营养物质充分被藻类利用,还可以使悬浮质中的一些磷、氮营养元素释放到水体中,使得水中的 TP、TN 浓度保持较高的水平,这或许是引起夏季水华持续暴发的一个重要原因.另外,在太湖水华暴发的季节,风速较小时,湖面光滑,漂浮着的藻类停留在水表面顺着风向不断堆积在迎风岸边,也容

易形成水华.但是,太湖风浪引起表层沉积物的再悬浮,这些悬浮物在沉降中对藻类有卷带和掩埋作用,微囊藻被胶体沉降物裹夹时变丧失浮力而沉降^[21];风浪扰动后,虽然营养盐暂时不成为限制因素,但是风浪引起的水体混合程度增加导致单位藻细胞可接受的光强下降^[22],却也有可能限制藻类的生长.

4 结论

(1)不同风力等级下的扰动对贫营养水体中的藻类生长具有很大的影响,相对于静止条件而言,对藻体有规律地施以一定的扰动有利于藻类的生长,但是不同的扰动强度对藻类的生长影响却又存在很大的差别.约 4.0 m/s 风力最有利于微囊藻的生长,太弱的间歇性扰动对藻类生长促进作用不明显,太强的间歇性扰动对藻类生长限制作用更显著.

(2)扰动作用也因水中的营养状况不同而产生很大差异.在富营养的水体中,各风力等级下的扰动对铜绿微囊藻比增长率和最大现存量的影响均不明显,仅表现出适当的生长延滞.太湖当前处于富营养水平,扰动对太湖水体中藻类生长的直接影响不大.

(3)扰动可能从营养物质的吸收、代谢产物的趋散和藻的生长环境等多个方面直接影响藻类的生长.在水体营养状况差异较大的情况下,间歇性扰动所引起的营养物质重新分配相对于其他因子对藻生长具有更重要的影响.

参考文献:

[1] 张运林,秦伯强,陈伟民,等.不同风浪条件下太湖梅梁湾光合有效辐射的衰减[J].应用生态学报,2005,16(6):1133-1137.

[2] 逢勇,李一平,罗澈葱.水动力条件下太湖透明度模拟研究[J].中国科学(D辑),2005,35(增刊II):145-156.

[3] 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.

[4] 杨清心.太湖水华成因及控制途径初探[J].湖泊科学,1996,8(2):67-74.

[5] Yamamoto T, Hashimoto T, Tarutani K, et al. Effects of winds, tides and river water runoff on the formation and disappearance of the *Alexandrium tamarense* bloom in Hiroshima Bay, Japan [J]. Harmful Algae, 2002,1(2):301-312.

[6] Schallenberg M, Burns C W. Effects of sediment resuspension on phytoplankton production: teasing apart the influences of light, nutrients and algal entrainment [J]. Freshwater Biology, 2004, 49: 143-159.

[7] 黄程,钟成华,邓春光,等.三峡水库蓄水初期大宁河回水区流速与藻类生长关系的初步研究[J].农业环境科学学报,2006,25(2):453-457.

[8] 金相灿,李兆春,郑朔方.铜绿微囊藻生长特性研究[J].环境科学研究,2004,17(增刊):52-54.

[9] 廖平安,胡秀琳.流速对藻类生长的影响的试验研究[J].北京水利,2005,(2):12-14.

[10] 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.

[11] 张民,史小丽,蒋丽娟,等.两种外源性磷及振荡对铜绿微囊藻生长的影响[J].应用与环境生物学报,2002,8(5):507-510.

[12] 范成新,张路,秦伯强,等.风浪作用下太湖悬浮态颗粒物中磷的动态释放估算[J].中国科学(D辑),2003,33:760-768.

[13] 秦伯强,胡维平,高光,等.太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念模式[J].科学通报,2003,48(17):1822-1831.

[14] 张运林,秦伯强,陈伟民,等.太湖水体中悬浮物研究[J].长江流域资源与环境,2004,13(3):266-271.

[15] Fujimoto N, Sudo R. Nutrient-limited growth of *Microcystis aeruginosa* and *Phormidium tenue* and competition under various N:P supply ratios and temperatures [J]. Limnol Oceanogr, 1997,42(2):250-256.

[16] 瞿建宏,刘韶斌.水体中芽孢杆菌和微囊藻的生长及其资源竞争[J].湛江海洋大学学报,2002,22(3):13-18.

[17] 高月香,张毅敏,张永春.流速对太湖铜绿微囊藻生长的影响[J].生态与农村环境学报,2007,23(2):57-60.

[18] 钟成华.三峡库区水体富营养化研究[D].成都:四川大学,2004.86-87.

[19] Reynolds C S, Descy J P, Padisck J. Are phytoplankton dynamics in rivers so different from those in shallow lakes? [J]. Hydrobiologia, 1994, 289:1-7.

[20] Sheng Y P, Lick W. The transport and resuspension of sediments in a shallow lake [J]. Journal of Geophysical Research, 1979, 84(C4):1809-1826.

[21] Robert E L. Phycology [M]. (Second edition). London: Cambridge Univ Press, 1985.

[22] Pannard A, Bormans M, Lagadeuc Y. Short-term variability in physical forcing in temperate reservoirs: effects on phytoplankton dynamics and sedimentary fluxes [J]. Freshwater Biology, 2007, 52:12-27.