

# 水体扰动对铜绿微囊藻生长影响的规律及原因\*

江林燕 江成 周伟 何义亮\*\*

(上海交通大学环境科学与工程学院, 上海, 200240)

**摘要** 在实验室条件下模拟不同扰动状态的水体,探讨铜绿微囊藻的生长与水体扰动之间的关系.结果表明,水体的扰动对铜绿微囊藻的生长同时存在促进和抑制作用.低速度扰动时,促进作用占主导地位;高速度扰动时,抑制作用占主导地位.实验发现中营养化条件下,当温度为 25 °C,光照为 4000 lx,光暗比为 12 h:12 h 时,300 r·min<sup>-1</sup>的扰动速度是铜绿微囊藻生长的临界速度.扰动过程可以为铜绿微囊藻的光合作用提供充足的二氧化碳是其能够促进铜绿微囊藻生长的潜在原因.

**关键词** 铜绿微囊藻, 扰动, 临界速度, 二氧化碳.

湖泊、水库等淡水水体是工业发展、农业灌溉以及人们日常生活中不可或缺的部分<sup>[1]</sup>.然而,近几年湖泊、水库的富营养化形势更加严峻,而我国的富营养化程度更是高于世界平均水平.富营养水体中蓝绿藻产生的藻毒素严重影响了水体水质,对工农业生产和人类健康产生极大危害.控制湖泊、水库富营养化及水体蓝绿藻爆发已成为当前迫在眉睫的重大课题<sup>[2-5]</sup>.

控制蓝绿藻繁殖的前提是,了解蓝绿藻的生长受哪些因素影响.影响水体富营养化、蓝绿藻爆发的因素多且复杂<sup>[6]</sup>,既有营养盐因素,环境因素,还有生态因素,其中生态因素中包括水体扰动.之前的研究偏重于营养盐方面<sup>[7]</sup>,即如何通过减少水体中营养盐的浓度控制藻的生长繁殖<sup>[8]</sup>.近些年,国内外学者开始关注生态因素对藻生长的影响<sup>[9-12]</sup>,特别是有关于扰动对藻生长的影响.

湖库水流缓慢,其水华的发生几率大于水流湍急的河流<sup>[13]</sup>;太湖蓝藻水华的发生均在大风作用过后的小风或静风、天气晴朗时段<sup>[14]</sup>等.这些结论表明水华的发生受水体扰动的影响.但目前有关扰动对营养化水体中藻生长的影响规律还不是很明确.且有关扰动影响藻生长的研究,主要侧重于扰动影响藻对营养盐的吸收和藻类的聚集等方面<sup>[15-16]</sup>.

本文通过实验分析不同扰动条件下铜绿微囊藻的生长情况,研究扰动对铜绿微囊藻生长的影响规律,并从光合作用方面探讨扰动影响藻生长的原因.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

实验所用的铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)购自中国科学院武汉水生生物研究所,采用的培养基是标准 BG-11 培养基(由中国科学院武汉水生生物研究所提供配方);实验在可控温度、光照和湿度的人工气候箱中进行;实验中扰动速度由 JJ-1A 搅拌器控制.

### 1.2 实验方法

在 1000 mL 细口透明实验瓶中,加入 700 mL 降低了氮磷浓度的 BG-11 培养基,加入 100 mL 经前期培养处于对数增长期的铜绿微囊藻.配置的实验水体中 TN 的浓度为 4.5 mg·L<sup>-1</sup>,总磷的浓度为 0.4 mg·L<sup>-1</sup>,叶绿素的浓度为 100 μg·L<sup>-1</sup>左右,即实验中所配制水体(按氮磷浓度及叶绿素浓度划分标准<sup>[17]</sup>)属于中营养化的水平.设置人工气候箱的温度为 25 °C,光照为 4000 lx,光暗比为 12 h:12 h.由搅拌器提供所需的扰动速度,同一扰动速度下设 2 个平行样.

实验周期为 10 d 左右,取样后不补充营养盐;每 2 d 取样,测定水质中叶绿素的浓度和藻光密度,分

2011 年 5 月 23 日收稿.

\* 上海市重大科委项目资助.

\*\* 通讯联系人, E-mail: ylhe@sjtu.edu.cn

析藻生长的比增长率。

叶绿素的测定采用国标法——分光光度法;光密度采用波长为 680 nm 时的吸光度;比增长率( $\mu$ )的计算:比增殖速率是在某一时间间隔内藻类生长的速率( $d^{-1}$ ). 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叶绿素的浓度( $\mu g \cdot L^{-1}$ ); $X_2$ 为某一时间间隔结束时叶绿素的浓度( $\mu g \cdot L^{-1}$ );( $t_2 - t_1$ )为某一时间间隔(d)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 低扰动速度对铜绿微囊藻的生长影响规律

设置扰动速度为 0、60、120、180、240 和 300  $r \cdot \min^{-1}$ . 通过藻的光密度大小和叶绿素浓度来表征其生长情况. 实验结果如图 1 所示。

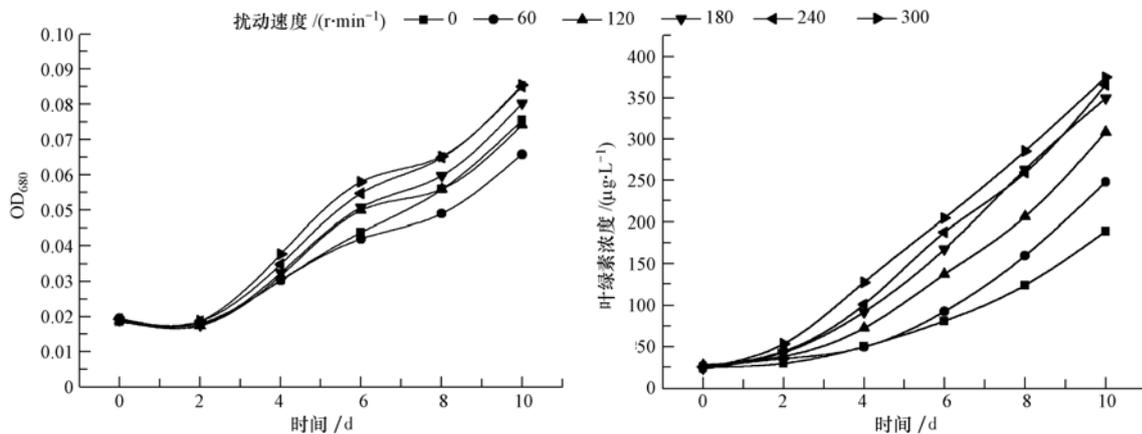


图 1 低扰动强度下铜绿微囊藻的生长曲线

Fig. 1 Growth curve of *Microcystis aeruginosa* under low disturbance

分析不同扰动速度下铜绿微囊藻生长的最大表征量,该实验组铜绿微囊藻生长的最大光密度、最大叶绿素含量、最大比增长率以及达到最大比增长率的时间如表 1 所示。

表 1 低扰动强度实验组的最大表征量

Table 1 Some properties of low speed disturbance group

| 扰动速度<br>/( $r \cdot \min^{-1}$ ) | 最大光密度 | 最大叶绿素浓度<br>/( $\mu g \cdot L^{-1}$ ) | 最大比增长率 | 达到最大比增长率的时间<br>/d |
|----------------------------------|-------|--------------------------------------|--------|-------------------|
| 0                                | 0.075 | 189                                  | 0.26   | 4                 |
| 60                               | 0.066 | 248                                  | 0.31   | 6                 |
| 120                              | 0.074 | 308                                  | 0.32   | 6                 |
| 180                              | 0.080 | 349                                  | 0.38   | 4                 |
| 240                              | 0.085 | 365                                  | 0.41   | 4                 |
| 300                              | 0.086 | 374                                  | 0.45   | 4                 |

综合分析图 1 和表 1,当扰动速度为 0—300  $r \cdot \min^{-1}$ 时,扰动速度越大,铜绿微囊藻生长的越好. 0  $r \cdot \min^{-1}$ 的实验组最大比增长率最小,为 0.26,出现在实验开始后的第 4 天. 扰动速度为 300  $r \cdot \min^{-1}$ 时,有最大的比增长率,为 0.45,出现在实验开始后的第 4 天. 扰动速度在 0—300  $r \cdot \min^{-1}$ 时,最大比增长率随着扰动速度的增大而增大,铜绿微囊藻的生物量也随着扰动强度的增大而增大。

扰动促进铜绿微囊藻的生长主要表现在以下几个方面:①扰动可以促使底泥释放营养盐从而促进藻生长;②扰动促进微囊藻在竞争中更好地获取营养物质<sup>[18]</sup>;③扰动可以降低藻细胞周围代谢产物(对藻生长有抑制作用)的浓度,而有助于藻的生长;④扰动可以延长藻生长过程中的适应期和对数增长期<sup>[19]</sup>. 本实验为实验室配制的水样,故不存在扰动使底泥释放营养盐的情况;培养基中营养盐充足且实

实验中采用的是单一的藻种,故铜绿微囊藻不需要通过竞争来获取营养物质.铜绿微囊藻作为一种自养型生物,空气中的二氧化碳是其主要的碳源.扰动可以为铜绿微囊藻光合作用提供更多二氧化碳,而有利于其生长.

为探讨二氧化碳对铜绿微囊藻生长的影响,设置扰动速度为 0 和  $300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,其中一组实验瓶带橡胶塞,橡胶塞的中心打孔,搅拌轴从中间穿过,取样时打开橡胶塞.橡胶塞的作用是使有扰动的实验瓶中藻吸收空气中的二氧化碳受阻,从而使其与静止的实验瓶中吸收二氧化碳的量相差无几.另一组为与第一组扰动速度相同、实验瓶瓶口敞开的对比实验组.实验结果如图 2 所示的生长曲线.

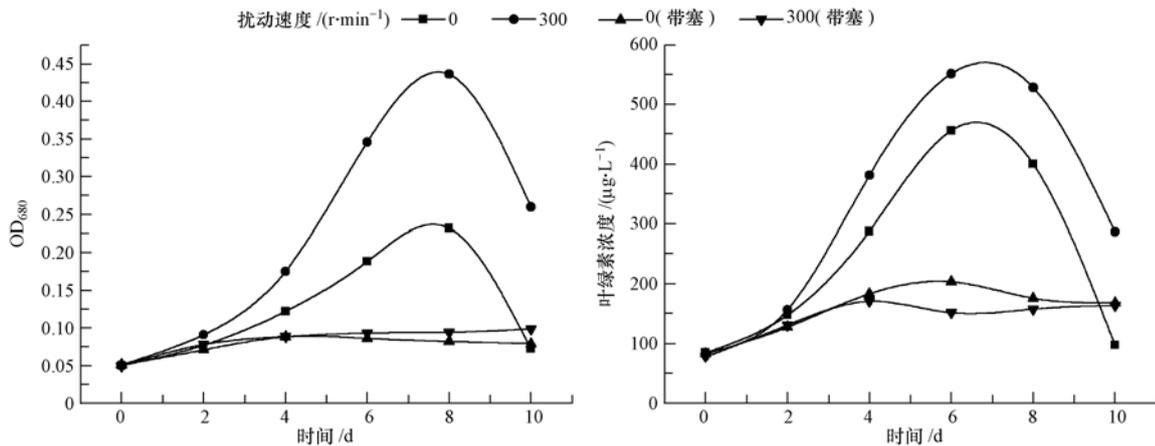


图 2 铜绿微囊藻的生长曲线

Fig. 2 Growth curve of *Microcystis aeruginosa* under different conditons

由图 2 可以见,敞口实验瓶中铜绿微囊藻经历生长的 4 个时期,0—2 d 适应期生长较缓慢;2—6 d 对数增长期,藻处于快速生长阶段;6—8 d 稳定生长期,之后进入了衰亡期.而带塞的实验组,从实验开始到结束,一直处于缓慢增长阶段.带塞的实验瓶中藻生长明显较开口实验瓶中慢,这是因为橡胶塞使铜绿微囊藻光合作用过程中可利用的二氧化碳量减少.表明二氧化碳也是影响铜绿微囊藻生长的重要因素.

分析不同扰动速度的两个敞口实验瓶中铜绿微囊藻的生长情况,可以看出铜绿微囊藻在扰动速度为  $300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  中较静止的水体中生长得好,这与前面的结论相一致;分析带塞的两个实验瓶中铜绿微囊藻的生长情况,结果发现有  $300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  的扰动与没有加扰动静止的水体中铜绿微囊藻的生长趋势几乎没差别.

本组实验结果表明,若在扰动的过程中控制二氧化碳的含量,则扰动对铜绿微囊藻生长的促进作用不明显.扰动对铜绿微囊藻生长的促进作用之一表现在,为铜绿微囊藻的光合作用提供充足的二氧化碳.

## 2.2 高扰动速度对铜绿微囊藻生长的影响规律

扰动速度为  $0-300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  时,扰动强度越大,为铜绿微囊藻的光合作用提供越多的二氧化碳,从而铜绿微囊藻生长得越好.进一步增大扰动强度,设置扰动速度为  $300, 500, 700, 900 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,得铜绿微囊藻的光密度和叶绿素浓度随时间变化的关系曲线如图 3 所示.

由图 3 看出,温度、光照、营养盐条件相同的条件下,控制扰动速度为  $300, 500, 700, 900 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  时,扰动速度为  $300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  中的铜绿微囊藻经历了正常的 4 个时期,即生长较缓慢期、对数增长期、稳定生长期和衰亡期;而大于  $300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  的实验组,扰动对其生长表现出明显的抑制作用.

该实验组的最大光密度、最大叶绿素浓度、最大比增长率以及达到最大比增长率的时间如表 2 所示.由表 2 可以看出,扰动速度为  $300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  时,在第 4 天达到最大的比增长率,而扰动速度为  $500, 700, 900 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  中的铜绿微囊藻几乎没有生长.扰动速度为  $300-900 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  时,扰动强度越大,最大比增长率越小;且藻的最大生物量也随着扰动强度的增大而呈递减.因扰动过大使藻细胞受到机械损伤而被破坏,这时扰动引起的促进作用远远小于抑制作用,从而加快了藻的衰亡.

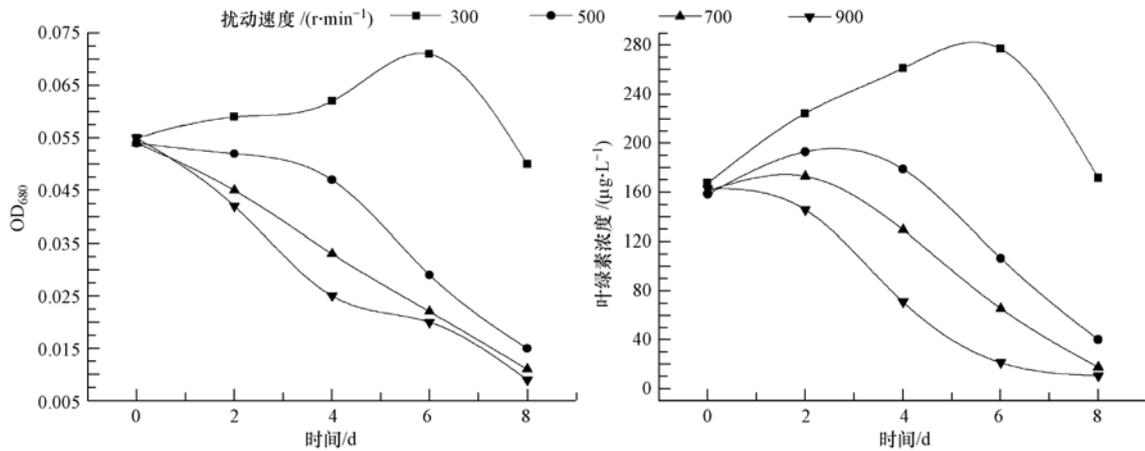


图3 高扰动强度下铜绿微囊藻的生长曲线

Fig. 3 Growth curve of *Microcystis aeruginosa* under high disturbance

表2 高扰动强度实验组的最大表征量

Table 2 Some properties of high speed disturbance group

| 扰动速度<br>/( $r \cdot \min^{-1}$ ) | 最大光密度 | 最大叶绿素浓度<br>/( $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | 最大比增长率 | 达到最大比增长率的时间<br>/d |
|----------------------------------|-------|---|--------|-------------------|
| 300                              | 0.071 | 277   | 0.24   | 4                 |
| 500                              | 0.054 | 193   | 0.15   | 2                 |
| 700                              | 0.054 | 173   | 0.10   | 2                 |
| 900                              | 0.055 | 163   | 0.04   | 2                 |

本组实验结果表明,高扰动速度对铜绿微囊藻的生长表现为抑制作用.结合低扰动的实验结果可知,扰动速度为0—900  $r \cdot \min^{-1}$ 时,藻比增长率呈开口向下的抛物线状,即先增大后减少.扰动速度为300  $r \cdot \min^{-1}$ 的实验组具有最大的生物量和最大比增长率.

### 3 结论

藻类生长与繁殖在营养盐、光照和温度等条件均充分时,其它因素对其光合作用和呼吸作用的影响将起到决定作用.通过本实验的研究,得到以下的结论:

(1) 扰动对藻的生长同时存在促进和抑制作用,当低扰动强度时,促进作用占主导地位;当高扰动强度时,抑制作用占出主导地位.本实验中,中营养条件下300  $r \cdot \min^{-1}$ 的扰动速度是铜绿微囊藻生长的临界速度,即小于300  $r \cdot \min^{-1}$ 时,随着扰动强度的增大,藻生长得越好;大于300  $r \cdot \min^{-1}$ 时,随着扰动强度的增大,铜绿微囊藻的生长曲线呈递减趋势.

(2) 扰动对铜绿微囊藻生长的促进作用之一是扰动可以为铜绿微囊藻的光合作用提供充足的二氧化碳.

#### 参 考 文 献

- [1] 陈晓江. 我国城市湖泊富营养化状况与监测[J]. 科教前沿, 2010(5):416,465
- [2] 范天瑜, 吴青文, 胡柯, 等. 城市湖泊富营养化治理的新思路[J]. 中国环境科学学会学术年会论文集, 2009:38-41
- [3] 郑怀礼, 袁宗宣, 郑泽根, 等. 论三峡库区的水环境问题和环境保护对策[J]. 重庆建筑大学学报, 1999, 21(4):91-95
- [4] 国家环保总局. 1999 中国环境状态公报[J]. 环境保护, 2000(7):3-9
- [5] 董昌华. 水体富营养化发生的原因分析及植物修复机理的研究[D]. 杭州: 浙江大学硕士学位论文, 2004, 11
- [6] 方志慧. 环境因素对微囊藻毒素基因表达量的影响及水生植物对微囊藻毒素的抗性机制[D]. 武汉: 华中师范大学硕士学位论文, 2008
- [7] 李辉, 潘学军, 史丽琼, 等. 湖泊内源氮磷污染分析方法及特征研究进展[J]. 环境化学, 2011, 30(1):281-292
- [8] 阚灵佳, 万红友, 武燕杰. 太湖富营养化的外源污染及其控制对策[J]. 江苏环境科技, 2007, 20(2):136-139

- [ 9 ] Choudhury A K, Pal R. Phytoplankton and nutrient dynamics of shallow coastal stations at Bengal, Eastern Indian coast [ J ]. *Aquatic Ecology*, 2010, 44 :55-71
- [ 10 ] 王丽燕, 张永春, 蔡金傍. 水动力条件对藻华的影响 [ J ]. *水科学与工程学报*, 2008 :61-62
- [ 11 ] YANG Zhengjian, LIU Defu. Influence of the impounding process of the Three Gorges Reservoir up to water level 172.5 m on water eutrophication in the Xiangxi Bay [ J ]. *Technological Sciences*, 2010, 53(4) :1114-1125
- [ 12 ] Ferris J A, Lehmann J T. Interannual variation in diatom bloom dynamics: Roles of hydrology, nutrient limitation, sinking, and whole lake manipulation [ J ]. *Water Research*, 2007, 41(12) :2551-2562
- [ 13 ] 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
- [ 14 ] 王婷婷, 朱伟, 李林. 不同温度下水流对铜绿微囊藻生长的影响模拟 [ J ]. *湖泊科学*, 2010, 22(4) :563-568
- [ 15 ] 廖平安, 胡秀琳. 流速对藻类生长影响的实验研究 [ J ]. *北京水利*, 2005, 2 :12-14
- [ 16 ] 刘凤丽, 金峰. 富营养化水体中流速对藻类生长的调控作用研究 [ J ]. *节水灌溉*, 2009, 9 :52-54
- [ 17 ] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准 [ J ]. *中国环境监测*, 2002, 18(5) :47-49
- [ 18 ] 颜润润, 逢勇, 陈晓峰, 等. 不同风等级扰动对贫富营养下铜绿微囊藻生长的影响 [ J ]. *环境科学*, 2008, 29(10) :2149-2153
- [ 19 ] 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, 88

## Growth of *Microcystis aeruginosa* under different disturbance

JIANG Linyan      JIANG Cheng      ZHOU Wei      HE Yiliang

(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

### ABSTRACT

The growth rate of *Microcystis aeruginosa* at different hydrodynamic condition was studied. The results showed the flow disturbance had either inhibitory or stimulating effect on the growth of *Microcystis aeruginosa* depending on the flow speed. When the speed of flow disturbance was low, growth was enhanced. At high speed, the inhibitory action played the leading role. It was observed that  $300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  was the critical speed at  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , light intensity 4000 lx, light/dark 12 h:12 h in middle nutrient water. One of the possible reasons for the enhancement of the growth of *Microcystis aeruginosa* is that the flow disturbance provides sufficient carbon dioxide for the photosynthesis of *Microcystis aeruginosa*.

**Keywords:** *Microcystis aeruginosa*, disturbance, critical speed, carbon dioxide.