

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0627

赵洪,丛海兵,倪金春,等.2014.周村水库藻类在混合胁迫条件下的生长衰亡规律[J].环境科学学报,34(10):2520-2525

Zhao H, Cong H B, Ni J C, et al. 2014. Growth and decay of algae in Zhoucun reservoir under the hybrid stress conditions [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(10): 2520-2525

## 周村水库藻类在混合胁迫条件下的生长衰亡规律

赵洪,丛海兵\*,倪金春,朱宸

扬州大学环境科学与工程学院,扬州 225127

收稿日期:2013-12-28 修回日期:2014-02-21 录用日期:2014-02-21

**摘要:**为了探明表层藻类被混合到下层水体中受到环境条件胁迫作用后的生长衰亡规律,并为混合控藻技术提供技术依据,通过实验室模拟和现场实验研究了周村水库藻类在不同水深条件下,受光照、温度、压力等胁迫条件影响后的生长衰亡规律.结果表明,以蓝绿藻为主的周村水库藻类,在光强为 32500 lx 时生产速率最大,约对应于水库水深 1~2 m 处;温度在 26 °C 左右比较适合藻类生长;当光照和温度一定时,随着压力的增大,藻类生长受到抑制,压力超过 0.2 MPa 时,藻类衰亡加速.综合水库不同水深条件下的光照、温度和压力,藻类在 2.5 m 水深以上净增长,2.5 m 水深以下负增长,6 m 水深处负增长最大,12 m 水深以下负增长减小.

**关键词:**藻类;光照;温度;压力;生产速率

文章编号:0253-2468(2014)10-2520-06 中图分类号:X524 文献标识码:A

## Growth and decay of algae in Zhoucun reservoir under the hybrid stress conditions

ZHAO Hong, CONG Haibing\*, NI Jinchun, ZHU Chen

School of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127

Received 28 December 2013; received in revised form 21 February 2014; accepted 21 February 2014

**Abstract:** In order to explore the growth and decay of algae in surface water under environmental stress conditions when it was mixed into the deep water, the algae in Zhoucun reservoir was studied on the growth and decay under the stress of the different water depth conditions with different light, temperature and pressure through laboratory and field experiment. The results showed that Zhoucun reservoir was dominated by cyanobacteria and green algae. The algae growth rate reached maximum at 32500 lx, which was approximately corresponding to the light intensity in 1~2 m water depth of the reservoir; The temperature at 26 °C was suitable for the growth of algae; with certain light and temperature, the growth of algae was inhibited by the increasing pressure. The decay of algae was accelerated when the pressure exceeded 0.2 MPa. The field experiment combining light, temperature and pressure in different reservoir water depths showed that the growth of algae in water depth was positive above 2.5 m while negative in water depth below 2.5 m. The maximal negative growth was in 6m water depth, and the negative growth decreased in water depth below 12 m.

**Keywords:** algae; light; temperature; pressure; production rate

### 1 引言(Introduction)

水库水体透明度大、流动性小,藻类容易停留在表层水体得到光照而大量繁殖(孙晓庆等,2007).研究表明,光照和温度是影响藻类生长的重要因素,在表层水体中,光照和温度适宜,藻类光合作用大于呼吸作用,藻类净生长;而在下层水体中,几乎没有光照,温度也较低,压力大,呼吸作用大于光合

作用,藻类净衰亡(贾含帅等,2011;刘玉生等,1995;刘春光等,2005;于萍等,2006).为了控制水库表层藻类的生长,可采用混合技术混合上下水层,将下层水体提升到表层,而表层水体循环到下层,使得藻类被迁移到下层水体中,受到弱光、低温、高压作用而衰亡(丛海兵等,2005;2006;Cong et al., 2009;2011).

周村水库位于东经 117°41',北纬 34°57',在枣

**基金项目:**国家自然科学基金(No.51178408);国家科技支撑计划项目(No.2012BAC04B02)

**Supported by** the National Natural Science Foundation of China (No. 51178408) and the National Key Technology R&D Program (No.2012BAC04B02)

**作者简介:** 赵洪(1989—),女,E-mail: zhaohong891207@126.com; \* 通讯作者(责任作者),E-mail: chb9903@126.com

**Biography:** ZHAO Hong (1989—), female, E-mail: zhaohong891207@126.com; \* **Corresponding author**, E-mail: chb9903@126.com

庄市市中区孟庄镇周村南,流域面积 121 km<sup>2</sup>,总库容 8404 万 m<sup>3</sup>,水面面积 8.54 km<sup>2</sup>,最大水深 19 m.周村水库建成于 1960 年,主要功能有防洪、灌溉和城市供水,是枣庄市城市供水水源地.1990—2008 年期间,周村水库曾大量网箱养鱼,造成了严重的水污染,水库富营养化问题严重.近年来,政府部门取缔了网箱养鱼,水库水质好转,但库底沉积的高污染底泥持续向水体释放营养盐,使水库仍处于富营养化状态.为了在短期内改善城市供水水源水质,课题组研究人员准备在取水口附近采用混合控藻技术抑制藻类生长.本文主要研究在混合条件下,表层藻类被混合到不同水深处受到不同光照、温度、压力胁迫作用后的生长衰亡规律,以期为混合控藻技术提供理论技术依据.

## 2 材料与方法 (Materials and methods)

### 2.1 水样

在周村水库坝前 200 m 处,用水下取样器取得指定水深处水样,带回实验室混合均匀备用.每一组实验水样需当天现取现用,实验过程为 2 d.

### 2.2 实验装置

藻类在不同光照、温度条件下的培养装置为 5 L 的玻璃瓶,瓶口加塞橡胶塞,塞中间开孔,溶解氧探头从孔中伸入瓶内.藻类在压力条件下的培养装置如图 1 所示,装置由密闭压力罐、加压泵及管路组成,压力罐为透明有机玻璃柱制成,容积为 5 L,耐压 1.0 MPa,加压泵为奥力康 YU7124 型滑片泵.其中,图 1a 为溶解氧测定装置,溶解氧仪探头伸入压力罐中.图 1b 为叶绿素和藻类活性培养测定装置,压力罐内安装气球,气球嘴与加压泵出水管连通.玻璃瓶和压力罐放入 MGC-250 型光照培养箱中.

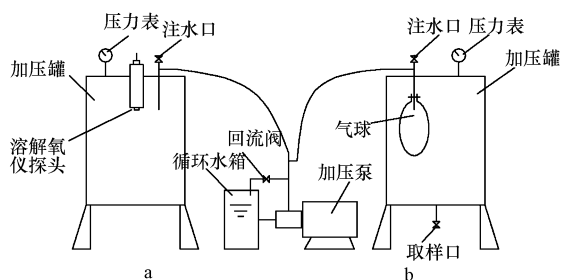


图 1 藻类压力条件下的培养装置

Fig.1 Algae culture device under pressure

### 2.3 实验方法

#### 2.3.1 水库藻类及环境条件竖向分布测定 用定

水深取样器从水库的不同水深处取样,放入塑料瓶中带回实验室,测定藻类的种类、个数、叶绿素浓度,每周测定 1 次.1 d 中选择几个特定时间,用照度计和溶解氧仪测定水库不同水深处光强和水温,半个月测定 1 次.用透明度盘测量水体透明度.

2.3.2 不同光照下藻类生长速率及活性 从水库 2 m 水深处取样,分别放入 2 个 5 L 透明玻璃瓶中,其中一个玻璃瓶用于测定溶解氧变化,玻璃瓶口加盖橡皮塞,橡皮塞中心开圆孔,插入溶解氧仪探头,瓶内不留空气.另一个玻璃瓶用于测定藻类叶绿素浓度和藻类活性变化,不加盖.将玻璃瓶放入光照培养箱中,设置光照培养箱的温度为 26 °C,调节光照强度为所需值,分别为 52500、32500、17500、5350、1566.0 lx.培养时间 24 h,光照和黑暗转换规律与当地自然光照同步,其中,光照 14 h,黑暗 10 h,一般前 8 h 光照,中间 10 h 黑暗,最后 6 h 光照.每隔 2 h 测定溶解氧,从玻璃瓶中取样测定叶绿素和藻类活性.

2.3.3 不同温度条件下藻类生长速率及活性 取样及培养方法同上,将 2 个玻璃瓶放入光照培养箱中,控制培养箱温度为需要值,分别为 30、26、20、15 °C.光照条件为藻类光合作用最适宜的光强 32500 lx.取样测定方法同上.

2.3.4 不同压力条件下藻类生长速率及活性 从水库 2 m 水深处取样,分别放入如图 1a 和图 1b 所示的压力罐中.调节回流阀,控制压力罐中的压力为所需的压力,分别为 0.1、0.2、0.3 MPa.将压力罐放入培养箱中,培养条件为藻类光合作用适宜的光照 32500 lx 和温度 26 °C.取样测定方法同上.

2.3.5 现场水深综合条件下藻类生长衰亡特性 从 2 m 水深处取样倒入桶内混匀,测定初始叶绿素和藻类活性,再将溶解氧白瓶和黑瓶注满水样,测定每个瓶中初始溶解氧,盖好瓶塞,不留气泡.白瓶为透明玻璃瓶,黑瓶为包裹了黑布的玻璃瓶,瓶内无光.在水库不同水深处悬挂一对白瓶和黑瓶,24 h 后取回黑白瓶,测定溶解氧、叶绿素、藻类活性.

### 2.4 测试方法

藻类叶绿素 a 按照《藻类叶绿素测试新方法》测定(丛海兵等,2007),孔径 1 μm 的醋酸纤维滤膜过滤水样,90% 乙醇萃取叶绿素,采用上海精科 UV759S 型分光光度计测定提取液吸光度.

藻类活性用 FDA 二乙酸荧光素荧光法测定(王佳佳等,2012),取 2 mL 水样加入 15 mL (pH=7.9) 浓度为 60 mmol·L<sup>-1</sup> 的磷酸盐缓冲液,摇晃均匀,再

加入 400  $\mu\text{L}$  的荧光素 FDA (0.3 mg 的二乙酸荧光素溶于 100 mL 的丙酮), 摇匀, 放入恒温水浴锅内, 水浴温度为 30  $^{\circ}\text{C}$ , 反应 30 min, 将样品放入仪器中测量其荧光值. 采用上海棱光 F97 荧光光度计测定荧光值.

溶解氧采用哈希公司 HQ30d 便携式溶解氧仪测定, 光强采用上海嘉定学联仪表 ZDS-10 水下照度计测定.

### 3 结果与讨论 (Results and discussion)

#### 3.1 水库藻类及环境条件竖向分布测定结果

水库竖向环境条件及藻类浓度如图 2 所示. 从图中可见, 7、8 月份是藻类高发期, 水库主要以蓝藻为主 (占藻类总数 80% 左右), 绿藻和硅藻所占比例相近. 其中, 蓝藻以鞘丝藻居多, 绿藻主要有浮球藻、水溪绿球藻、肾形藻, 而硅藻则以小环藻和针杆藻

为主. 水库水体的透明度一般在 95~100 cm 之间. 水库表层水体太阳光较强, 中午时分光强为 1400~85000 lx, 随着水深的增加光强呈指数递减, 在水深 4 m 以下光强小于 100 lx. 表层水温较高, 夏季在 25~30  $^{\circ}\text{C}$  左右, 随着水深的增加水温逐渐减小, 到 14 m 以下水温恒定, 约为 14  $^{\circ}\text{C}$ .

由藻类竖向分布图可以看出, 表层 4 m 水深内藻类较多, 叶绿素 a 浓度为 22~30  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 这与光强的竖向分布是一致的. 在 2 m 水深出现藻类浓度峰值, 此处约为 2 倍透明度. 4~6 m 水深内藻类含量锐减, 以下浓度基本恒定, 叶绿素 a 浓度为 10  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  左右.

蓝藻由于浮力调节机制, 其浓度峰值位于 2~3 倍透明度处 (黄廷林等, 2009), 对本水库应该在 2~3 m 水深处. 绿藻的浓度峰值一般位于 0.5 m 水深处 (黄廷林等, 2009). 周村水库上层水体中蓝藻和绿藻均是优势藻种, 因而其浓度峰值介于蓝藻峰值和绿藻峰值水深之间的 2 m 水深处.

上层 4 m 水深以上水体中主要是蓝藻门的鞘丝藻, 占藻类总数的 81%, 绿藻门的浮球藻占 11%, 硅藻针杆藻占 8%. 下层 7 m 水深以下水体中蓝藻比例减小, 硅藻和绿藻比例增加, 其中, 蓝藻比例占 58%, 硅藻占 25%, 绿藻占 17%.

#### 3.2 胁迫条件下藻类生长规律及其活性

3.2.1 不同光照强度对藻类生长衰亡的影响 不同光照强度下藻类生长衰亡规律见图 3. 从图 3a 可见, 前 8 h 和后 6 h 光照期溶解氧均上升, 中间 10 h 黑暗期溶解氧小幅下降. 不同光强下溶解氧上升速率不同, 将前 10 h 溶解氧变化量除以各自初始叶绿素浓度, 得到单位浓度叶绿素生产力 ( $\text{mg}\cdot\mu\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ , 以每  $\mu\text{g}$  Chla 每小时产生的  $\text{O}_2$  (mg) 计), 结果如图 3d 所示. 从图中可见, 在光强 32500 lx 时生产速率最大, 达到  $0.0185 \text{ mg}\cdot\mu\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ , 增大或减小光强生产速率均减小, 其中, 零光强时生产速率为  $-0.0022 \text{ mg}\cdot\mu\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ .

从图 3b 可见, 前后光照期单位浓度叶绿素荧光值均上升, 即藻细胞活性增强, 中间黑暗期细胞活性减弱. 不同光强条件下细胞活性变化速率不同, 藻细胞活性一般在 6~8 h 达到最大, 将单位浓度叶绿素荧光值变化量除以各自达到最大值所需培养时间, 得到单位时间藻细胞活性变化速率, 结果如图 3d 所示. 从图中可见, 在光强 32500 lx 时细胞活性变化速率最大, 达到  $2.0308 \text{ h}^{-1}$ , 其他光强下细胞活性

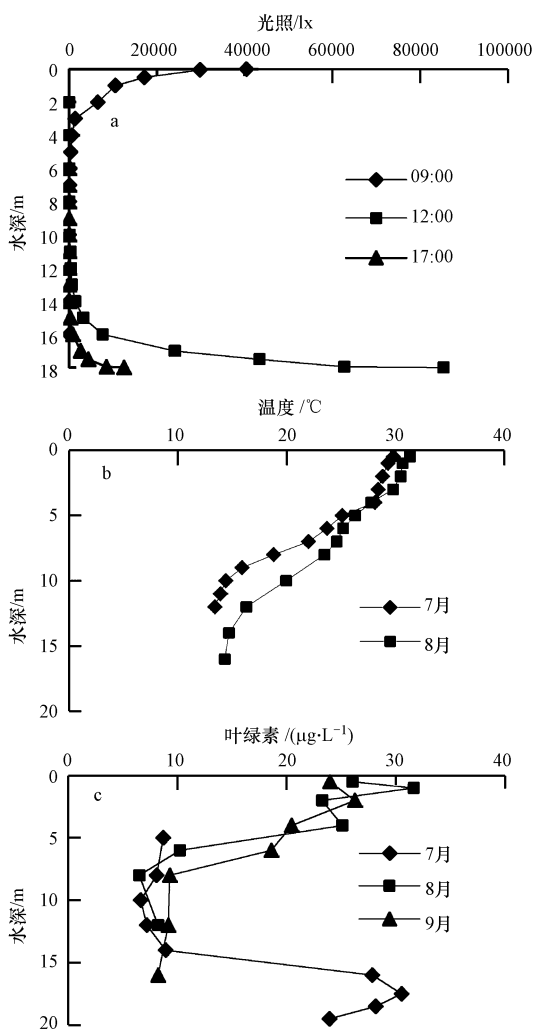


图 2 藻类及环境条件竖向分布

Fig.2 Vertical distribution of algae and environmental conditions

变化速率均减小,在零光强时细胞活性变化速率为  $-1.049 \text{ h}^{-1}$ .藻类叶绿素变化规律如图 3c 所示,从图中可见,藻类生物量的变化规律与生产力变化规律

相似,在 32500 lx 光强时增加最多,其他光强下增加较少.

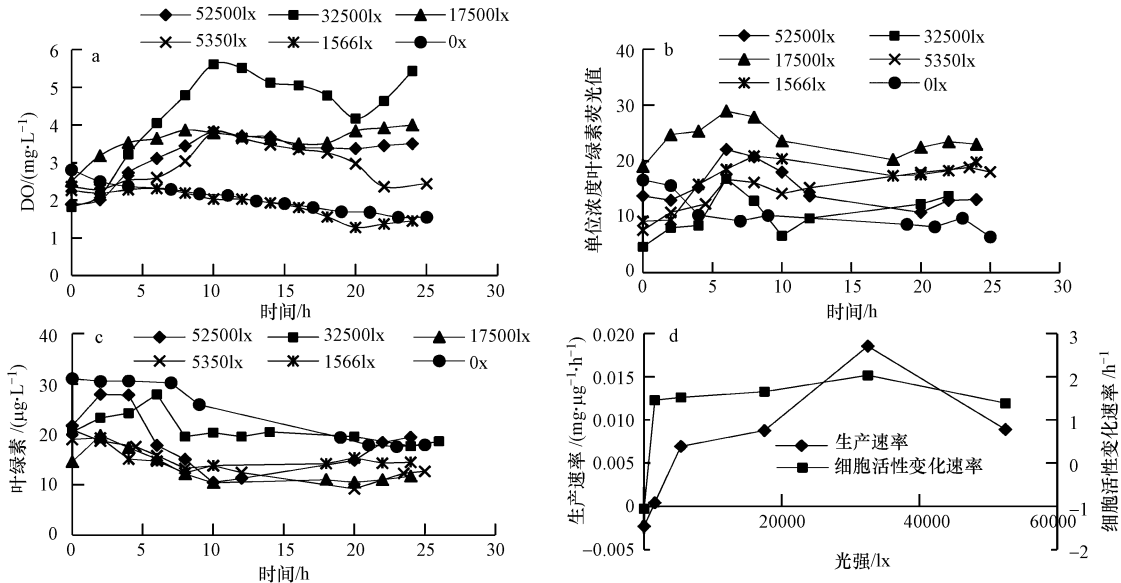


图 3 不同光照条件下藻类生长衰亡规律

Fig.3 Growth and decay of algae under different light conditions

在实际水库中,藻类主要聚集于 0~4 m 水深范围内,此范围内中午光强为 85000~1400 lx,均适合于藻类进行光合作用,其它时分水中光强将减弱.蓝藻将会根据水中光强的变化自动调节其所处的位置,当光强减弱时蓝藻会上浮到水面,以获得适宜的光照强度(刘建康,1999).

3.2.2 不同温度条件对藻类生长衰亡的影响 不同温度条件下藻类生长衰亡规律见图 4.从图 4a 可见,前后光照期溶解氧均上升,中间黑暗期溶解氧小幅下降.不同温度下溶解氧上升速率不同,前期 8~10 h 内溶解氧达到最大,计算增长期单位浓度叶绿素生产力,结果如图 4d 所示.从图中可见,在温度

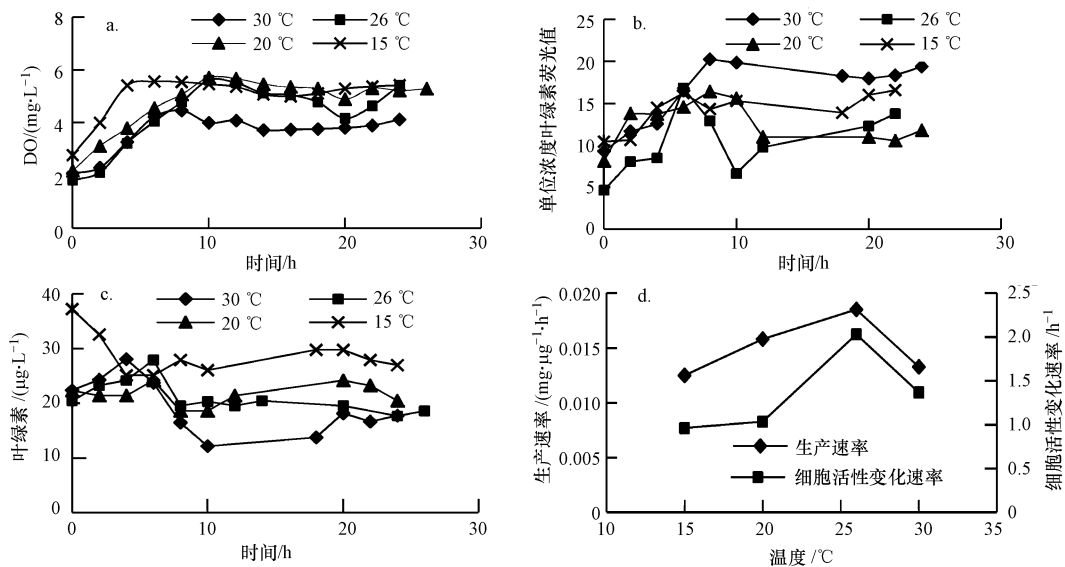


图 4 不同温度条件下藻类生长衰亡规律

Fig.4 Growth and decay of algae under different temperature conditions



26 °C时生产速率最大,达到 $0.0185 \text{ mg} \cdot \mu\text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ,增加或减小温度生产速率均减小,其中,15 °C时生产速率为 $0.0125 \text{ mg} \cdot \mu\text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ,30 °C时生产速率为 $0.0132 \text{ mg} \cdot \mu\text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ,两温度下生产速率相近。

从图4b可见,前后光照期藻细胞活性均增大,中间黑暗期活性减弱.各温度下细胞活性变化速率不同,计算增长期细胞活性变化速率,结果如图4d所示.由图可见,在温度26 °C时细胞活性变化速率最大,其他温度下细胞活性变化速率均减小.在15 °C时,温度过低,酶钝化活性变低,细胞处于休眠状,细胞活性变化小.藻类叶绿素变化规律如图4c

所示,从图中可见,温度在20 °C以上藻类生物量增加,低温时基本不增加。

3.2.3 不同压力条件对藻类生长衰亡的影响 不同压力条件下藻类生长衰亡规律见图5.从图5a可见,前后光照期溶解氧均上升,中间黑暗期溶解氧小幅下降.不同压力下溶解氧上升速率不同,计算增长期单位浓度叶绿素生产力,结果如图5d所示.从图中可见,在压力0 MPa即常压时生产速率最大,为 $0.0185 \text{ mg} \cdot \mu\text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ,增大压力生产速率减小,0.3 MPa时生产速率为 $0.0093 \text{ mg} \cdot \mu\text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ,减小了50%。

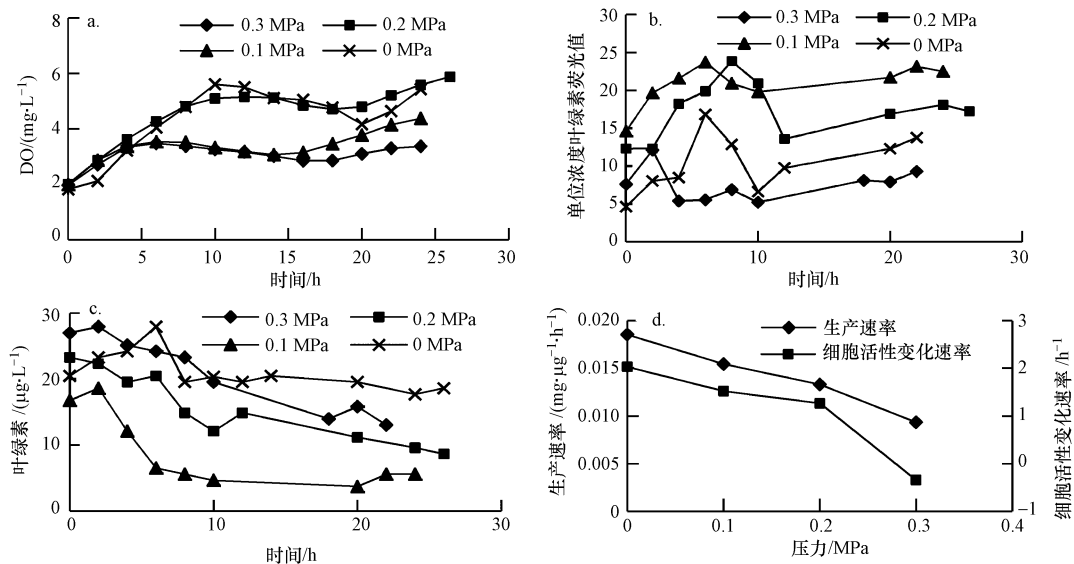


图5 不同压力条件下藻类生长衰亡规律

Fig.5 Growth and decay of algae under different pressure conditions

由图5b可见,在0~0.2 MPa时,前期光照内藻细胞活性均增强,在0.3 MPa时藻细胞活性2 h后开始下降,活性明显低于常压下.藻细胞气囊有散射性,使外界光强进入细胞内后变强,当压力达到0.3 MPa即水深达到30 m时,藻细胞气囊变小,细胞内光强减弱,光合作用下降,当压力继续增大,水深增加,气囊破裂,藻类下沉(丛海兵等,2014).计算前期6 h藻细胞活性变化速率,结果如图5d所示.由图可见,随着压力增加藻细胞活性增加速率减小,常压时增长速率为 $2.0308 \text{ h}^{-1}$ ,而0.3 MPa时为 $-0.3432 \text{ h}^{-1}$ .说明即使给予相同的温度和光照,压力对藻类生长有很强的抑制作用.藻类叶绿素变化规律如图5c所示,从图中可见,常压以下藻类生物量增加,0.1 MPa以上压力藻类生物量减小。

3.2.4 水库现场水深综合条件下藻类生长衰亡的特性 从2 m水深处取样悬挂到不同水深后,藻类

的生长衰亡规律如图6所示.由图6a可见,藻类光合作用总生产力随着水深的增加呈线性减小,6 m水深以下为零,这与图2中光照竖向分布是一致的,在6 m水深处光照为零.藻类呼吸作用在6 m水深以上均较大,6 m水深向下逐步减小,12 m以下基本不变.将总生产力和呼吸作用叠加,得到藻类净生产力.藻类在2.5 m水深以上净增长,2.5 m水深以下负增长,6 m水深处负增长最大,12 m水深以下负增长减小.由图6b可见,在2 m水深处藻细胞活性最大,8 m水深以下活性基本恒定.藻类生产力及活性的变化与温度和光照随水深的变化有关,表层6 m以上水温较高,有光照,6 m以下水温降低,无光照,12 m以下低温且恒定.由图6c可见,3 m水深以上的白瓶内叶绿素浓度均大于初始值,4 m水深以下白瓶内叶绿素浓度轻微减小。

将一定水深范围内单位叶绿素净生产量曲线

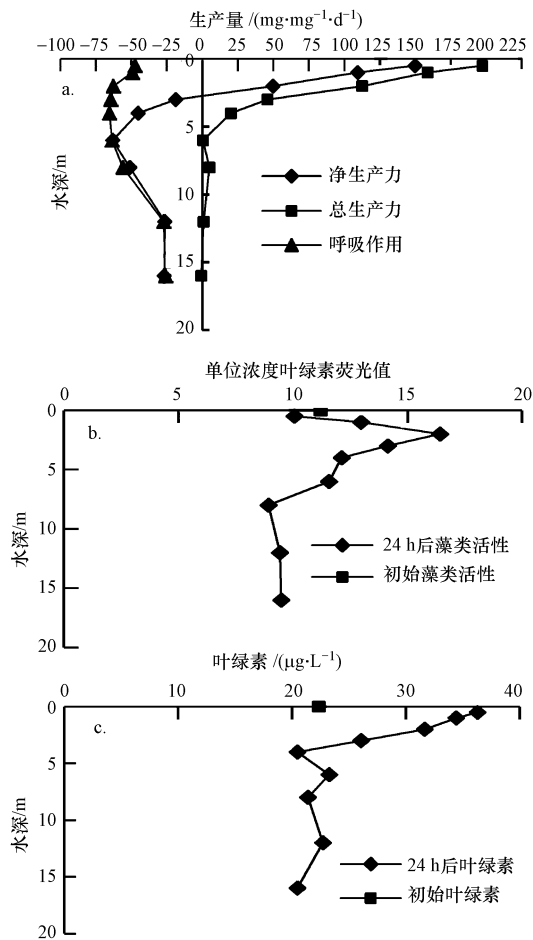


图6 现场水深综合条件下藻类生长衰亡规律

Fig.6 Growth and decay of algae under field depth comprehensive conditions

与竖轴围成的面积相加,得出整个柱状水体的净生产力总量,此净生产力总量表示当上下层水体被充分混合,水中藻类浓度相同且为  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时柱状水体的净生产力.若该净生产力总量为正,说明藻类净增长,反之为负增长,藻类将得到控制.通过计算得出,当混合深度小于  $6.5 \text{ m}$  时,净生产力总量为正,大于  $6.5 \text{ m}$  时净生产力总量为负.当采用混合上下水层的方法控藻时,一方面要控制混合强度,使得藻类上下混合均匀,研究表明,当下向流速为  $1.65 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$  大于藻类上浮速度,藻类上下分布已基本均匀(丛海兵等,2009);另一方面要具有一定的水深,尽可能延伸下部黑暗区的深度.

#### 4 结论 (Conclusions)

1) 在光强  $32500 \text{ lx}$  时,周村水库水体中的藻类生产速率最大,达到  $0.0185 \text{ mg} \cdot \mu\text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ,增大或减小光强生长速率均减小,其中,零光强时生产速率

为  $-0.0022 \text{ mg} \cdot \mu\text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ .

2) 在温度  $26 \text{ }^\circ\text{C}$  时,水库藻类的生产速率最大,说明该温度比较适合藻类生长.

3) 常压时藻类的生产速率最大,增大压力生长速率减小,压力超过  $0.3 \text{ MPa}$  时,藻类呈负增长.说明即使给予相同的温度和光照,压力对藻类生长有很强的抑制作用.

4) 在水库水体中,藻类在  $2.5 \text{ m}$  水深以上净生长,  $2.5 \text{ m}$  水深以下藻类净衰亡,  $6 \text{ m}$  水深处衰亡量最大.当采用混合上下水层的方法控藻时,混合深度必须达到一定水深,尽可能延伸下部黑暗区的深度.

责任作者简介:丛海兵(1968—),男,教授,工学博士,研究方向为水处理、微污染控制.E-mail: chb9903@126.com.

#### 参考文献 (References):

- 丛海兵,黄廷林,缪晶广,等.2005.水体修复装置—扬水曝气器的开发[J].中国给水排水,21(3): 41-45
- 丛海兵,黄廷林,赵建伟,等.2006.扬水曝气技术在水源水质改善中的应用[J].环境污染与防治,28(3): 215-218
- 丛海兵,黄廷林,周真明,等.2007.藻类叶绿素测试新方法[J].给水排水,33(6): 28-32
- 丛海兵,黄廷林,周真明.2009.于桥水库铜绿微囊藻上浮运动规律及其控制[J].给水排水,35(11): 140-145
- Cong H B, Huang T L, Chai B B *et al.* 2009. An new mixing-oxygenating technology for water quality improvement of urban water source and its implication in a reservoir [J]. *Renewable Energy*, 34 (9): 2054-2060
- Cong H B, Huang T L, Chai B B. 2011. Research on applying a water-lifting aerator to inhibit the growth of algae in a source-water reservoir [J]. *International Journal of Environment and Pollution*, 45 (1/3): 166-175
- 丛海兵,高郑娟,孙秀秀.2014.压力作用后太湖蓝藻沉淀性能及其去除研究[J].中国给水排水,30(1): 43-47
- 黄廷林,段婷婷,卢金锁.2009.水源水中蓝藻生长悬浮特性及生长抑制试验研究[J].中国科技论文在线
- 贾含帅,刘汉湖,胡舒,等.2011.4种环境因子对景观水体绿藻生长繁殖的影响[J].中国城市林业,9(6): 52-54
- 刘春光,金相灿,邱金泉,等.2005.光照与磷的交互作用对两种淡水藻类生长的影响[J].中国环境科学,25(1): 32-36
- 刘建康.1999.高级水生生物学[M].北京:科学出版社.182-185
- 刘玉生,韩梅,梁占彬,等.1995.光照、温度和营养盐对滇池微囊藻生长的影响[J].环境科学研究,8(6): 7-11
- 孙晓庆,董树刚.2007.藻类的生理生态学研究进展[J].海洋湖沼通报,(增刊): 195-205
- 王佳佳,周桦,张进,等.2012.土壤样品中微生物活性的荧光分析方法[J].环境化学,31(10): 1637-1643
- 于萍,张前前,王修林,等.2006.温度和光照对两株赤潮硅藻生长的影响[J].海洋环境科学,25(1): 38-40