

水动力对浮游生物影响的围隔研究

朱宜平, 张海平*, 李飞鹏, 陈玲

(同济大学环境科学与工程学院, 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要 利用 3 个围隔装置, 于 2007 年 8 月 ~ 2008 年 7 月间研究了 0.002、0.10、0.15 和 0.30 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 共 4 种表面流速对围隔内浮游植物和浮游动物生长的影响。结果表明, 0.15、0.30 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 这 2 种表面流速下围隔内壁附着水绵生物量分别是对应静止条件下的 2.3 倍和 31.3 倍, 0.10、0.15 和 0.30 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 这 3 种表面流速下围隔内 Chl-a 浓度分别为对应静止围隔中的 45%、54% 和 26%, 浮游动物生物量分别为对应静止围隔中的 38%、27% 和 6%。这些现象的作用机制可能在于水动力产生的剪切力促进水绵的营养生殖、紊动强制裹挟浮游植物破坏其光生境、水绵繁殖抑制浮游植物生长和水动力扰动降低浮游甲壳动物捕食成功率。

关键词 水动力 浮游植物 浮游动物 围隔 叶绿素 a

中图分类号 X52; X174 **文献标识码** A **文章编号** 0250-3301(2010)01-0069-07

Enclosure Experiments About the Hydrodynamics Effects on the Plankton

ZHU Yi-ping, ZHANG Hai-ping, LI Fei-peng, CHEN Ling

(Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education, School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract To explore the effects of hydrodynamics on plankton, four kinds of surface flow enclosure experiments were done from August, 2007 to July, 2008. The flow velocity were 0.002, 0.10, 0.15 and 0.30 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ respectively. Under 0.15 and 0.30 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ surface velocity conditions, it was revealed that *Spirogyra* biomasses were 2.3 times and 31.3 times of the ones under static state respectively. Under 0.10, 0.15 and 0.30 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ conditions, Chl-a concentrations were 45%, 54% and 26% of the ones under static state while zooplankton biomasses were 38%, 27% and 6% respectively. The mechanism is that a certain flow velocity stimulates *Spirogyra* growth may be for the shear stress generated by the surface flow can help the vegetative reproduction. Shear stress and turbulence may also bring the phytoplankton to the light limited area by force. Besides, as *Spirogyra* grows well, it can inhibit the phytoplankton growth by excretion or some symbiotic microorganism. When shear stress or water turbulence exceeds a certain value, crustacean zooplankton successful grazing rate may also be depressed.

Key words hydrodynamics; phytoplankton; zooplankton; enclosure; chlorophyll-a

长期以来, 研究者认为水动力对浮游生物的影响主要表现为冲刷效应、稀释效应、遮蔽效应和再悬浮效应。如 Hilton 等^[1]总结认为, 对于河流和湖泊而言, 当水力停留时间是浮游植物倍增时间的 2 ~ 3 倍以上时, 浮游植物能够充分生长; 反之, 则难以良好生长。水动力引起的水体紊动, 既可能造成水体底泥起浮, 悬浮颗粒物含量增大^[2~4], 水体光合有效辐射 (PAR) 衰减加强^[5], 从而不利于浮游植物生长, 并引起浮游动物滤食器官堵塞, 不利于浮游动物生长^[6], 还可能使浮游植物在水体垂向重新分布^[7]。另外一些研究表明, 水动力条件还可能对浮游植物和浮游动物生命活动产生直接影响。如 Peters 等^[8]总结发现, 中低强度的紊动既能增大藻细胞营养盐吸收速率, 但也会增加藻细胞自身的能量消耗, 并增大与浮游动物相遇及被捕食的几率, 且这种负面影响效应对甲藻特别显著。Thomas 等^[9]对典型赤潮甲藻 *Gonyaulax polyedra* 研究表明, 雷诺数 (Re) > 200 时能

抑制甲藻 *Gonyaulax polyedra* 细胞增殖和叶绿素 a (Chl-a) 浓度上升。Huisman 等^[10]对微囊藻和硅藻之间竞争的理论分析表明, 当用 Péclet 数 (Pe) 来表示的水体紊动强度 < 1 时, 微囊藻能够获得竞争优势; 而当 $Pe > 10$ 时, 硅藻能获得竞争优势。Visser 等^[11]则总结认为, 随着紊动强度的增大, 浮游植物和浮游动物浓度都会呈现先上升再下降的趋势。水动力条件对浮游生物生长影响的直接效应尚缺乏足够的实验事实来证明, 也没有形成系统的理论, 因此进一步开展这方面的研究就显得十分必要。

现有的有关水动力对藻类和浮游动物影响的研究, 主要是基于理论分析^[9~11], 室内搅拌实验^[8], 水

收稿日期 2009-02-16 修订日期 2009-06-13

基金项目 中俄国际合作项目 (2007DFR90050); 上海市科技攻关计划项目 (2007dz12051)

作者简介 朱宜平 (1982 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为区域水污染控制及环境模拟, E-mail: zyp0420050067@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: hpzhang@tongji.edu.cn

槽实验^[6]、某一水体多年对比^[12,13]、同时间段多个水体对比^[14]等方法,在自然水体中的水动力围隔实验还比较少,这可能是由于在野外自然水体条件下,要人为改变流速而不对原有水体生态产生显著影响是很困难的,且在围隔后的水体水动力条件调控上存在很多难题.但是,室内实验、水槽实验都脱离了原来的众多生态因子,而某一河流多年对比、同时间段多条河流对比又难以控制其它生态因子的变化,这样得到的实验结果都难以说明是由水动力条件引起.本实验将基于国内外相关研究,利用围隔实验来讨论水动力对浮游植物、浮游动物相关生命活动的影响.

1 材料与方法

1.1 围隔实验装置

围隔实验在上海市崇明县前卫村中心湖进行,该湖紧邻长江水环境教育部重点实验室崇明野外实

验基地.为了区别水动力扰动引起的底泥起浮对浮游生物生长影响和水动力对浮游生物直接影响,本研究设置了 2 组围隔实验:含底泥围隔和浅水围隔.含底泥围隔又分为工况Ⅰ和工况Ⅱ,浅水围隔实验分为工况Ⅲ和Ⅳ.详细工况介绍见 1.2 节.

含底泥围隔装置由大小完全相同的 2 个 PVC 板箱 A、B 组成,长为 1.5 m,宽 0.4 m,高 1.5 m,2 个板箱均放置在中心湖中,且底部没有底板,插入底泥中 15 cm,上覆水体与底泥直接接触. A 中间用 PVC 板隔开,隔板长为 1.1 m,距两端距离分别为 0.2 m,两端各挂置一台 RS-12000 型水族箱用潜水泵,该泵流量为 $12\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$,以便满足工况 1 和 2 的需求. B 不设隔板,也不设水泵,在整个实验过程中保持静止状态,作为对比参照. A、B 围隔装置于 2007 年 8 月 24 日放置入中心湖中,并静置 5 d,开始工况Ⅰ、Ⅱ实验研究,其初始状态如图 1 所示.

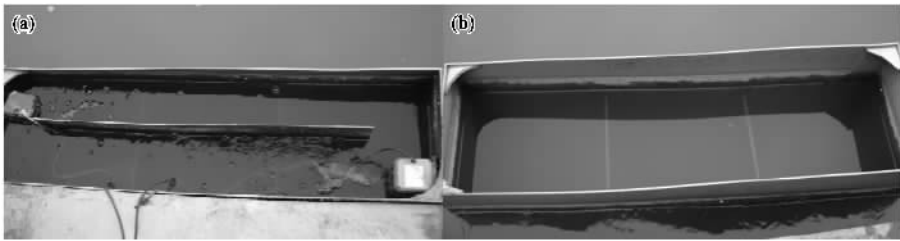


图 1 含底泥围隔装置在实验初始时情形
Fig.1 View of the newly installed enclosures

浅水围隔装置 C 平面大小同围隔 A 完全相同,但深度仅为 0.35 m,且底部有底板.同 A 类似,C 内亦挂置 RS-8000 型和 RS-200 型水族箱用潜水泵各一台,分别满足工况Ⅲ和工况Ⅳ需求.工况Ⅲ和工况Ⅳ开始前从中心湖内取水加入 C,并使初始水深为 0.3 m,工况Ⅲ完成后将 C 内水放干,并将内表面刷洗干净,晾晒 3 d 后再进行工况Ⅳ实验研究.工况Ⅲ、Ⅳ运行过程中不向 C 内补水.

1.2 围隔实验工况

围隔实验所进行的 4 个工况详细情况如表 1 所示.其中,表面平均流速是指水面下 0.1 m 内平均流速.同时为了保证围隔实验过程中氮磷营养盐不对

藻类生长产生抑制,在工况Ⅰ、Ⅱ运行过程中还根据营养盐监测结果适当添加氮、磷营养盐,工况Ⅲ、Ⅳ由于运行时间较短,在运行前一次性加入适当营养盐,同时根据每天的蒸发情况适当补入蒸馏水,维持围隔 C 内水深基本不变.

1.3 分析方法

实验过程中主要关注围隔装置内浮游植物(以水体 Chl-a 浓度来表示)浓度、氮磷营养盐浓度、浮游植物种类、轮虫和甲壳动物生物量随时间变化;另外,实验过程中记录每天气象台公布的天气实况,包括云量、气温、降雨量.由于工况Ⅰ和Ⅱ运行时间较长,实验过程中根据天气状况,不定期采集围隔装置

表 1 实验工况详细情况
Table 1 Schemes of the experiments

工况名称	使用装置	时间	表面平均流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
工况Ⅰ	A、B	2007 年 8 月 29 日 ~ 2007 年 11 月 18 日	0.15
工况Ⅱ	A、B	2008 年 3 月 24 日 ~ 2008 年 6 月 22 日	0.30
工况Ⅲ	C	2008 年 7 月 2 日 ~ 2008 年 7 月 14 日	0.10
工况Ⅳ	C	2008 年 7 月 22 日 ~ 2008 年 8 月 1 日	0.002

表层 0.3 m 和底层 0.3 m 这 2 个水层水样并混合后分析相关各参数,工况Ⅲ和Ⅳ运行时间都较短,装置 C 也仅为 0.35 m,取样分析时不再分层进行.每次取样时间均固定为 16 00.

氨氮、硝酸盐氮、总氮、磷酸盐和总磷测定方法按照国家标准^[15]进行,Chl-a测定按照陈宇炜等^[16,17]提出的方法进行.浮游植物种类鉴定、轮虫和浮游甲壳动物丰度或生物量按照章宗涉等^[18]提出的方法进行.工况Ⅰ~Ⅲ流速的测定采用南京水科院研制的 OA 型直读式多功能测速仪进行,而工况Ⅳ则根据工况Ⅲ测定的平均流速与潜水泵上标注的流量推算得到.实验结果的统计分析利用 SPSS13.0 进行.

2 结果与分析

2.1 各工况条件下水温

温度对水体相关过程影响显著,实验过程中测定了工况Ⅰ和Ⅱ运行下 A、B 内的水温变化,以及工况Ⅲ和Ⅳ运行下 B、C 内水温变化,结果如图 2 所示.

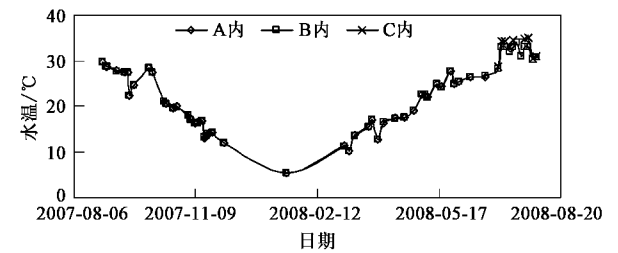


图 2 各工况运行下水温变化

Fig.2 Variation of the temperature under the four experiments' schemes

从图 2 可以发现,A 和 B 内的水温自 2007 年 8 月~2008 年 6 月在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 情况下无显著性差别.这就表明在工况Ⅰ和工况Ⅱ条件下,A 与 B 之间由于水温差异引起的相关参数差别不明显;而在工况Ⅲ和Ⅳ运行下,C 内水温波动也很小.

2.2 工况Ⅰ运行结果

2.2.1 工况Ⅰ运行期间的营养盐变化

工况Ⅰ运行过程中围隔装置内氮、磷营养盐变化情况如图 3 所示.由于亚硝态氮浓度很低,图 3 中无机氮为氨氮和硝态氮浓度之和,从中可以看出,藻类易于吸收的无机氮浓度在 $0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,无机磷浓度在 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,都满足藻类生长营养盐需求^[19].对比 A、B,发现在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 情况下,A 中的氮浓度显著大于 B 中的浓度,而磷两者没有显著差别.

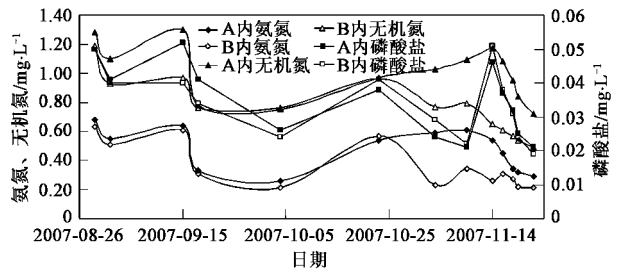


图 3 工况Ⅰ运行期间围隔内营养盐浓度变化

Fig.3 Variation of the nitrogen and phosphorus concentration under the experiment scheme I

2.2.2 工况Ⅰ运行期间优势藻类及 Chl-a 浓度变化

镜检表明,A、B 内优势藻类同一时段存在不一致,在各个时间段内也存在不同,详细情况如表 2 所示.在工况Ⅰ运行前,A、B 内优势藻类均相同,主要是蓝藻门中的微囊藻属 (*Microcystis*) 和平裂藻属 (*Merismopedia*),绿藻门中的纤维藻属 (*Ankistrodesmus*)、栅藻属 (*Scenedesmus*)、弓形藻属 (*Schroederia*) 和十字藻属 (*Crucigenia*).装置 A 形成表面流动后,蓝藻消失,在随后的实验过程中一直未明显观察到,但 2007 年 9 月 8 日观测时 B 内蓝藻依然存在,这说明是表面流动造成了 A 内蓝藻消失.该工况整个运行期间 A 内优势藻类是绿藻,11 月出现了一定数量的硅藻门中曲舟藻属 (*Pleurosigma*),而 B 内优势藻类则随着季节变化是:蓝藻和绿藻→绿藻→硅藻和绿藻,这也表明表面流动对 A 内一些藻类生长形成了抑制.

表 2 工况Ⅰ运行期间优势藻类

Table 2 Dominant phytoplankton genus under the experiment scheme I

时间点	A 内	B 内
工况Ⅰ运行前	微囊藻属、平裂藻属、纤维藻属、栅藻属、弓形藻属、十字藻属	微囊藻属、平裂藻属、纤维藻属、栅藻属、弓形藻属、十字藻属
2007 年 9 月 8 日	纤维藻属、栅藻属、弓形藻属、	微囊藻属、平裂藻属、纤维藻属、栅藻属、弓形藻属
2007 年 10 月 4 日	纤维藻属、弓形藻属	纤维藻属、栅藻属、弓形藻属
2007 年 11 月 14 日	纤维藻属、曲舟藻属	纤维藻属、栅藻属、曲舟藻属

工况Ⅰ运行期间Chl-a浓度变化如图4所示,从中可以看出,10月25日之前A、B内的Chl-a浓度范围均为 $5 \sim 45 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,整体上A内Chl-a浓度比B内要低,10月末由于硅藻繁殖,A、B内Chl-a浓度都有一个明显的上升过程,B内Chl-a浓度比之前增加了1倍多,两国隔内Chl-a浓度差也显著增大,这证明A内浮游植物生长受到了一定抑制,图2表明此阶段A、B水温不存在显著差异,而图3表明此阶段A内的氮营养盐浓度甚至高于B内,在营养盐、光照、水温等条件相近的情况下,这种抑制应该是水动力造成。

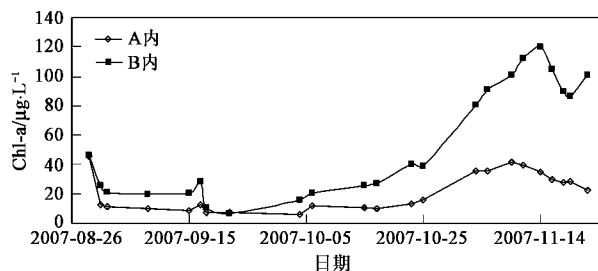


图4 工况Ⅰ运行期间围隔内Chl-a浓度变化

Fig.4 Variation of the Chl-a concentration under the experiment scheme I

2.2.3 工况Ⅰ运行期间浮游动物生物量变化

轮虫和浮游甲壳动物的生物量占据了水体浮游动物生物量的主要部分,也是分析水动力对浮游生物影响的重要方面.工况Ⅰ运行期间主要观测以了轮虫和浮游甲壳动物为代表浮游动物生物量变化,详细情况如图5所示,从中可以明显发现,在工况Ⅰ运行期间,A内的浮游动物生物量要明显小于B内.对比图4可以认为,围隔A内浮游动物生物量小于围隔B内既可能是浮游动物生长受到了水动力抑制,也可能是浮游动物缺乏足够的食物而生长受到抑制.

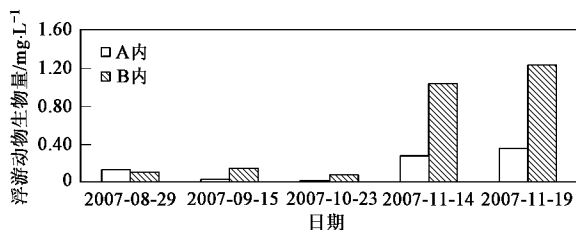


图5 工况Ⅰ运行期间轮虫及浮游甲壳动物的生物量变化

Fig.5 Biomass variation of the rotifers and crustacean zooplankton under the experiment scheme I

2.2.4 工况Ⅰ运行期间围隔内水体表现变化

在工况Ⅰ运行前笔者曾推测围隔A可能将出现底泥起浮并造成水体PAR衰减加剧、不利于浮游植物生长的现象,在工况Ⅰ运行之初确实出现了A内底泥起浮现象,但运行数天后又逐渐恢复澄清状态,且边壁上开始有附着藻类生长,B边壁亦在1个多月后开始出现明显的附着藻类,但密度明显要比A低.镜检发现,A、B围隔边壁附着藻类均为水绵(*Spirogyra*).在整个工况Ⅰ运行期间,并未清除围隔边壁上的附着藻类,待工况Ⅰ运行结束后刮取A、B一定面积边壁上的附着藻类分析发现,A内获得的附着藻类藻丝之间有大量泥沙颗粒.将刮取获得的附着藻用蒸馏水反复漂洗后烘干称重,得到A和B的附着藻类生物量密度分别为 $2.13 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $1.16 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$.按照这样的密度,可以估算出围隔内壁附着藻类生物量分别为2.98 g和0.88 g,围隔A是围隔B的2.3倍.

2.3 工况Ⅱ运行结果

2.3.1 工况Ⅱ运行期间的营养盐变化

工况Ⅱ运行期间围隔内营养盐浓度变化如图6所示.同工况Ⅰ一样,此阶段氮磷营养盐浓度也是满足浮游植物生长需求的,且在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 情况下,A中的营养盐浓度要大于B中的营养盐浓度.

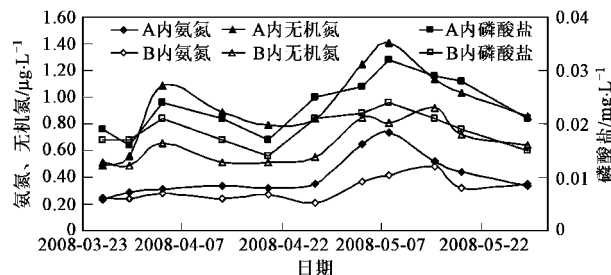


图6 工况Ⅱ运行期间围隔内营养盐浓度变化

Fig.6 Variation of the nitrogen and phosphorus concentrations under the experiment scheme II

2.3.2 工况Ⅱ运行期间优势藻类及Chl-a浓度变化

镜检表明,此工况下A内优势藻类主要是纤维藻属、曲舟藻属和小环藻属,而B内优势藻类主要有纤维藻属、栅藻属、弓形藻属、直链硅藻属、曲舟藻属、小环藻属.A内出现的藻属类数目是要明显少于B内,表明了水动力的影响,这同工况Ⅰ是一样的.

为了排除工况Ⅰ运行期间围隔内Chl-a差异对此阶段实验的影响,在3月初用中心湖水置换了围隔内水,并静置了一段时间.此工况运行前的3次Chl-a浓度测定均表明,A内的Chl-a浓度与B内均很

接近,工况运行后的Chl-a浓度变化如图 7 所示,从中可以发现工况运行过程中 A 内Chl-a浓度要小于 B 内,而 A 内水温与 B 内不存在显著差异($\alpha = 0.05$),再次表明表面流动可能对浮游植物生长存在的抑制效应.

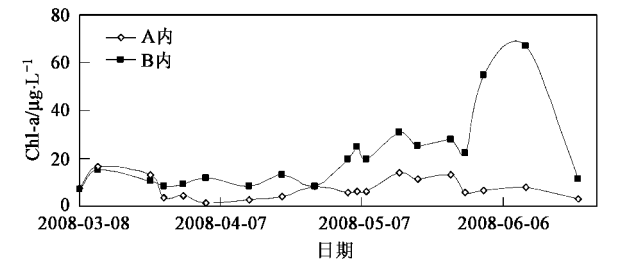


图 7 工况 II 运行期间围隔内Chl-a浓度变化
Fig.7 Variation of the Chl-a concentration under the experiment scheme II

2.3.3 工况 II 运行期间浮游动物生物量变化

此阶段以轮虫和浮游甲壳动物为代表的浮游动物生物量变化情况如图 8 所示.从中可以发现,在该工况运行后,A 内浮游动物生物量下降非常明显,4 月之后的 3 次测定已经很难找到轮虫和浮游甲壳动物.从图 7 中 A 内Chl-a浓度可以发现此工况下浮游动物仍然具有一定的食物来源,因此可以认为此表面流速条件下浮游动物难以有效捕食,严重抑制了它们的生长^[11].

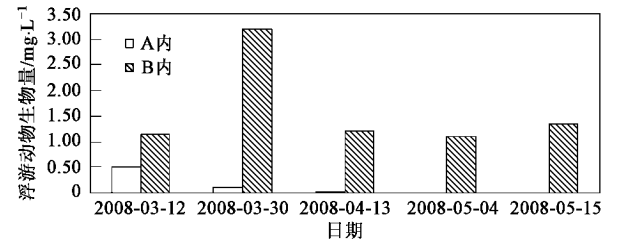


图 8 工况 II 运行期间轮虫及浮游甲壳动物的生物量变化
Fig.8 Biomass variation of the rotifers and crustacean zooplankton under the experiment scheme II

2.3.4 工况 II 运行期间围隔内水体表现变化

基于工况 I 的运行经验,在该工况运行前清除了围隔内壁上的附着藻类.但 A 内水泵运行后,附着藻类在一周内又长出,后分别于 2008 年 4 月 13 日、18 日、27 日,5 月 6 日、26 日清除 A 内壁附着藻类,但每次清除后附着藻类又能在很短时间内重新生长出.5 月 26 日至该工况运行结束间未清理附着藻类,结果生长的附着藻类已经几乎将水面遮蔽.整个工况运行期间,估算得到 A 内产出的附着藻类

高达 33.56 g,要远远高于工况 I 运行末期围隔内壁附着藻类生物量.B 内附着藻类表现变化同工况 I 下相似,生长比较缓慢,工况 II 运行结束时估算 B 内壁附着藻类生物量为 1.07 g.由此可以发现,此工况下 A 内附着藻类生长速率要远大于工况 I 下.此工况运行下的 3 次镜检均表明,附着藻类依然是水绵.

对比工况 I 和 II 运行下的营养盐、水温、光照等条件,以及 2 个工况下 B 内附着藻类生长情况可以判断,可能是 2 个工况下的流速差异造成了水绵生长速率差异.

同工况 I 运行初始时一样, A 在工况 II 开始运行时以及每次清除附着藻类后都会呈现非常明显的浑浊状态,但在附着藻类繁殖之后水体逐渐澄清.清除得到的附着藻丝之间肉眼可以看到大量的泥沙颗粒,每次都需要经过数十遍清洗才能将清除得到的藻丝洗清.这表明 A 内表面流动确实能够造成底泥起浮,但由于附着藻类能够有效吸附、拦截以及凝聚这些悬浮颗粒,水体没有一直呈现浑浊状态.

2.4 工况 III 和工况 IV 运行结果

2.4.1 工况 III 运行结果

工况 III 运行时间仅为 13 d,运行期间以多云天气为主,仅仅有一场 1.5 mm 的降雨发生,运行结束时围隔 C 内剩余水深为 0.32 m,因此可以忽略水位变化对水体相关参数的影响.从图 2 可以发现,此阶段 C 内水温变化在 2℃ 以内,因此讨论浮游生物相关变化时可以忽略水温的影响.

工况 III 初始时一次性加入营养盐,运行结束后无机氮浓度从最初的 1.5 mg·L⁻¹ 下降到 0.3 mg·L⁻¹,磷酸盐浓度从 0.05 mg·L⁻¹ 下降到 < 0.01 mg·L⁻¹;Chl-a 浓度在初始时为 55 µg·L⁻¹,3 d 后降到 35 µg·L⁻¹,从第 7 d 至运行结束一直保持在 30 µg·L⁻¹ 左右.运行初始和结束后轮虫丰度没有显著变化,但浮游甲壳动物从运行初始时的 5 个·L⁻¹ 到 7 d 后已经难以找到;C 内水绵依然能在 13 d 内从 0 增长到 1.03 g·m⁻².这些现象表明,营养盐浓度下降主要是水绵生长吸收引起,而此工况下浮游植物和浮游甲壳动物生长依然受到了抑制,但浮游植物受到的抑制程度较前 2 个工况减轻,水绵依然能够快速增殖.

2.4.2 工况 IV 运行结果

工况 IV 运行期间没有出现降雨过程,运行过程中由于不断补充蒸馏水也没有出现显著的水位波动,因此进行相关参数分析时可以忽略这方面的影

响.从图2亦可以发现,讨论本工况相关变化时可以忽略水温变化的影响.

该工况运行仅3 d后就发现水体中有大量枝角类动物生长,丰度达到了 $110 \text{个} \cdot \text{L}^{-1}$,主要种类为秀体溞属(*Diaphanosoma*)和溞属(*Daphnia*),水体表现呈现清澈透明状,在显微镜下甚至已经很难找到藻细胞,也没有附着性藻类生长;运行7 d后水体完全澄清透明,此时枝角类丰度也下降到 $7 \text{个} \cdot \text{L}^{-1}$,依然没有附着性藻类生长;工况运行结束时,显微镜下仅能看到少量原生动物和轮虫,枝角类、挠足类和藻都很难观察到,表层没有附着性藻类,但水体底部有极少量,水体澄清透明.此工况表明,在运行3 d内枝角类大量生长将很多浮游藻细胞捕食殆尽,后续运行中由于缺乏足够的食物来源,枝角类自身也逐渐死亡.相对于前3个工况,工况Ⅳ流速极低,从表观上甚至不能察觉到水体流动,附着藻细胞可能在这种流动条件下难以快速分裂生殖,因此在初始阶段也易受到浮游甲壳动物的滤食,生长受到抑制.

工况Ⅰ、工况Ⅱ中的围隔B与此工况相比,虽然B处于静止状态,但由于底泥的存在,B内浮游动物食物来源更丰富些,B中可能还一些存在能够摄食轮虫、枝角类和挠足类的其它动物,因此B中并没有出现浮游动物过度增殖、浮游植物和附着藻类被摄食殆尽的情况.

2.5 表面流速对浮游生物影响效应比较

在工况Ⅰ和Ⅱ中,分别以对应围隔B内(即 $v = 0.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)Chl-a浓度、浮游动物生物量为参照(假定为1),计算表面流速 $v = 0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $v = 0.30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 工况下围隔A内多日平均Chl-a浓度、浮游动物生物量相对值,结果如图9所示.工况Ⅲ和Ⅳ运行时没有安排静止对照围隔,但基于工况Ⅳ的运行经验,即使设置静止对照围隔,也会出现类似工况Ⅳ的情况,因此分析表面流速 $v = 0.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 对Chl-a浓度、浮游动物生物量影响时,以初始Chl-a浓度、浮游动物量为参照(假定为1)来计算(即 $v = 0.00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的参照值为工况初始值),结果如图9所示.由于工况Ⅳ形成的表面流速极小,且实验结果与其它3个工况均显著不同,图9中不将其列出分析,从中可以看出,在表面流速为 0.10 、 0.15 、 $0.30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,Chl-a浓度分别为静止状况下的45%、54%和26%,浮游动物生物量分别为静止状况下的38%、27%和6%,表明随着表面流速的增大,浮游植物和浮游动物均表现出被更强烈地抑制趋势.

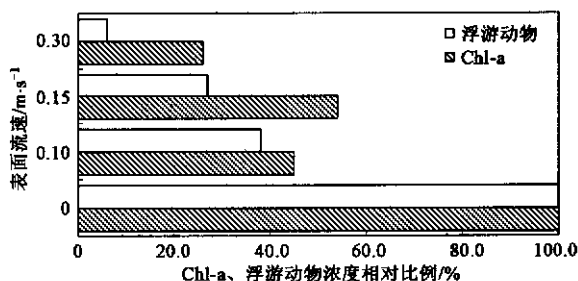


图9 不同表面流速对浮游生物的效应比较

Fig.9 Results cooperation under different surface flow velocities

3 讨论

从上文给出的围隔实验结果可以发现,即使在完全没有底泥起浮的工况Ⅲ中,也出现了浮游植物和浮游动物生长受到抑制的现象,这表明本围隔实验中水力确实对浮游生物生命活动存在影响,具体作用机制讨论如下.

(1)流动使浮游植物光生境遭受破坏.水体表层紊动,不断产生向水体底层扩散水团,这些水团挟带浮游植物向水体下层方向运动,但浮游植物在下层难以获得理想的光照条件;而水面的附着性藻类大量生长又进一步对表面光照起了遮蔽作用,使得向下传播的可见光进一步减弱.因此,流动条件下浮游植物不能获得所需的充分光照,增殖有限,并且有限的生物量又面临浮游动物的摄食压力,浮游动物也因为附着性藻类不适口,缺乏足够的食物而生物量逐渐下降,最终系统在低生物量水平平衡.

(2)一定的流速能够刺激水绵生长,而水绵对浮游植物有抑制作用.水体流动产生剪切力,而剪切作用在一定范围内有助于水绵接头处的折断分离,促进水绵营养生殖,产生更多的水绵体. Townsend等^[20]在澳大利亚的Daly河研究发现,当流速为 $0.15 \sim 0.55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,对应的水体剪切力为 $0.0004 \sim 0.004 \text{ N} \cdot \text{s}^{-2}$ 时,水体水绵生物量易达到最高值.经计算,本研究的围隔实验中流动对围隔边壁形成的剪切应力范围在 $0.01 \sim 0.09 \text{ N} \cdot \text{s}^{-2}$,虽比文献^[20]报道值要大,但依然能促进水绵快速生长.马军等^[21]的最新研究表明,水绵能够有效抑制蓝藻中的铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)、绿藻中的栅藻,抑制的机理在于水绵的代谢分泌物或共生微生物.工况Ⅲ实验结果与这种机制比较吻合的,因为工况Ⅲ中水深仅为 0.35 m ,实验进行期间光照充分,可能正是水绵的抑制效应导致工况Ⅲ运行结束时浮游植物Chl-a浓度不同运行之前的50%.

(3) 某一临界流速以上浮游甲壳动物的捕食成功率会受到抑制. 根据 Visser 等^[11]的理论, 超过某一临界流速后, 水体产生的紊动能够大大减小浮游甲壳动物成功捕食的几率, 浮游甲壳动物生长会受到抑制. 这也是众多河流中浮游动物对浮游植物的捕食量在浮游植物损失量中所占比例很小的主要原因^[14,22]. 目前, 这一临界值报道还很少. 本研究的围隔实验中, 3 种表面流速可能已经产生了这种效应, 从而抑制了浮游甲壳动物的生长.

4 结论

(1) 0.15、0.30 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 这 2 种表面流速下围隔内壁附着水绵生物量分别是对应静止条件下的 2.3 倍和 31.3 倍, 其作用机制可能在于一定的流速产生的剪切力能够促进水绵营养生殖.

(2) 0.10、0.15 和 0.30 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 这 3 种表面流速下围隔内 Chl-a 浓度分别为对应静止围隔中的 45%、54% 和 26%, 其抑制机制可能在于水体紊动产生的强制裹挟破坏光生境以及附着藻类水绵的抑制效应.

(3) 0.10、0.15 和 0.30 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 这 3 种表面流速下围隔内浮游动物生物量分别为对应静止围隔中的 38%、27% 和 6%, 其抑制机制可能在于水体紊动产生的强制裹挟破坏光生境以及附着藻类水绵的抑制效应.

参考文献:

- [1] Hilton J, O'Hare M, Bowes M J, *et al.* How green is my river? A new paradigm of eutrophication in rivers [J]. *Sci Total Environ*, 2006, **365**(1-3): 66-83.
- [2] 逢勇, 庄巍, 韩涛, 等. 风浪扰动下的太湖悬浮物实验与模拟[J]. *环境科学*, 2008, **29**(10): 2743-2748.
- [3] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民, 等. 太湖水环境演化过程与机理[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 143-160.
- [4] Scheffer M. Ecology of Shallow lakes [M]. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Press, 2004. 31-47.
- [5] 张运林. 太湖水体生物-光学特性及其生态学意义[D]. 南

- 京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2005. 90-100.
- [6] 陈伟民, 陈宇炜, 秦伯强, 等. 模拟水动力对湖泊生物群落演替的实验[J]. *湖泊科学*, 2000, **12**(4): 343-352.
- [7] Schelske C L, Carrick H J, Aldridge F J. Can wind-induced resuspension of meroplankton affect phytoplankton dynamics? [J]. *J North Am Benthol Soc*, 1995, **14**(4): 616-630.
- [8] Peters F, Marrasé C. Effects of turbulence on plankton: an overview of experimental evidence and some theoretical considerations[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 2000, **205**: 291-306.
- [9] Thomas W H, Gibson C H. Effects of small-scale turbulence on microalgae[J]. *J Appl Phycol*, 1990, **2**(1): 71-77.
- [10] Huisman J, Matthijs H C P, Visser P M. Harmful Cyanobacteria [M]. Dordrecht: Springer, 2005. 156-161.
- [11] Visser A W, Stips A. Turbulence and zooplankton production: insights from PROVESS[J]. *J Sea Res*, 2002, **47**(3-4): 317-329.
- [12] Lung W S, Pearl H W. Modeling blue-green algal blooms in the lower Neuse River[J]. *Water Res*, 1988, **22**(7): 895-905.
- [13] Mitrovic S M, Oliver R L, Rees C, *et al.* Critical flow velocities for the growth and dominance of *Anabaena circinalis* in some turbid freshwater rivers[J]. *Freshw Biol*, 2003, **48**(1): 164-174.
- [14] Basu B K, Pick F R. Factors regulating phytoplankton and zooplankton biomass in temperate rivers[J]. *Limnol Oceanogr*, 1996, **41**(7): 1572-1577.
- [15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 243-281.
- [16] 陈宇炜, 高锡云. 浮游植物叶绿素 a 含量测定方法的比较测定[J]. *湖泊科学*, 2000, **12**(2): 185-188.
- [17] 陈宇炜, 陈开宁, 胡耀辉. 浮游植物叶绿素 a 测定的‘热乙醇法’及其测定误差的探讨[J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(5): 550-552.
- [18] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991. 333-388.
- [19] Rast W, Thornton J A. Trends in eutrophication research and control [J]. *Hydrol Process*, 1996, **10**(2): 295-313.
- [20] Townsend S A, Padovan A V. The seasonal accrual and loss of benthic algae (*Spirogyra*) in the Daly River, an oligotrophic river in tropical Australia[J]. *Mar Freshw Res*, 2005, **56**(3): 317-327.
- [21] 马军, 雷国元. 水绵 (*Spirogyra*) 的除磷特性及其对微藻生长的抑制作用[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(3): 476-483.
- [22] Reynolds C S, Descy J P. The production, biomass and structure of phytoplankton in large rivers[J]. *Arch Hydrobiol*, 1996, **10**(1-4): 161-187.