

# 模拟水动力对湖泊生物群落演替的实验

陈伟民 陈宇炜 秦伯强 高锡芸  
高 光 季 江 许秋瑾

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

**提 要** 从静止状况到小水流、大水流的模拟水动力实验表明,水动力对湖泊生物群落演替起重要作用。藻类种类数以小水流时最高,其生物量也最高,这与  $\text{NO}_3^-/\text{TDN}$  比值相一致。由静止状态到大水流状态,藻类数量呈现递增趋势,这与相应的  $\text{TDN}/\text{TN}$ 、 $\text{TDP}/\text{TP}$  呈递减趋势相呼应。浮游动物的种类、数量的变化较之浮游植物更明显,尤其是枝角类的变化更大。动力作用通过增加水体中悬浮质、降低透明度、改变水下光照条件及理化与生物过程释放营养物质,致使浮游植物、浮游动物群落结构、数量发生改变。

**关键词** 模拟水动力 湖泊生物 演替 太湖

**分类号** Q145

湖泊的浮游生物在种群演替和数量变化方面都有极明显的周期性。浮游生物的周期性变化,除受湖泊环境温度、光照的周期性变化外,还受浮游生物本身生长的生理生态状态的影响<sup>[1]</sup>,同时还受到水体的水动力作用影响<sup>[2,3]</sup>。

水动力对浮游生物的数量多寡、分布的影响在浅水湖泊中较之于深水湖泊的影响更大。特别是在大型浅水湖泊中,水动力的作用更加明显。太湖蓝藻水华的主要种类微囊藻的分布,围隔实验显示:随风漂移外来的微囊藻数量大大地超过在该水域内生长的微囊藻。漂移微囊藻叶绿素 a 的浓度是该水域内生长的微囊藻叶绿素 a 的 5 倍<sup>[2]</sup>。太湖梅梁湾水动力作用过程的研究表明,当风与湖流状况变化时,浮游动物数量也随之而变<sup>[3]</sup>。

这些研究表明:大型浅水湖泊中,水动力过程与理化因子对水环境演化起着很重要的作用,但对湖泊水动力过程进行实地观测仍有较大的难度。

为了探明水动力对湖泊水环境的作用,利用大型生态模拟槽,研究不同水动力过程对浮游生物群落种类演替、浮游生物数量变动以及对湖泊初级生产力的影响,有助于对水体中水质和生物群落结构、功能变化的了解。

## 1 材料与方 法

本研究于 1999 年 5 月 8 日 - 6 月 22 日,在太湖湖泊生态系统研究站(太湖站)的生态实验室内生态槽中进行。生态槽长 6.3m、宽 1.2m、高 1.6m。槽底均匀铺设太湖淤泥,淤泥厚 10cm。淤泥用彼德森采泥器取自于太湖站旁吴塘门的太湖沉积物。淤泥上覆太湖水,高度为 1.2m。隔天将湖水用 33 $\mu\text{m}$  浮游生物网过滤,加入槽内,以补充被蒸发的水量。实验期间气温

\* KZ-T-04-04、KZ951-B1-205、KZ952-S1-220 课题共同资助。

收稿日期:2000-09-10。陈伟民,男,1943年生,研究员。

控制在 25℃.

实验分三个阶段连续进行. 第一阶段为静止阶段. 自铺好淤泥注入湖水静置 10d 后开始, 每天按采样点取样(图 1), 连续 5d. 第二阶段为小水流阶段. 用 QDX10-10-0.55 潜水泵(浙江, 台州生产)控制平均流速为  $0.124\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . 流速用 LS78 型低速流速仪测定(重庆水文仪器厂生产). 运作 10d, 使其由静止状态进入稳定的小水流状态, 按上述方法连续采样 5d, 期间小水流状况不变. 第三阶段为大水流阶段. 用 QY 油浸式潜水泵(上海龙水水泵机电水泵厂生产)控制平均流速  $0.319\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 同样运作 10d, 使其由小水流状态进入稳定的大水流状态. 按同样方法连续采样 5d, 期间大水流状况不变.

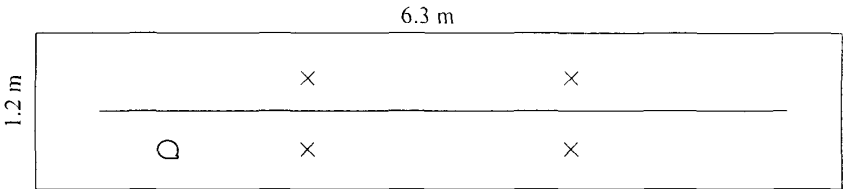


图 1 模拟生态槽示意图(Q 潜水泵; × 采样点)

Fig. 1 Diagram of ecological experiment tank

采样步骤如下: 用有机玻璃采水器采样, 在各采样点各取 5L 水样, 放入洗净的塑料桶内, 充分混合. 按“湖泊生态系统调查、监测规范”<sup>[4]</sup> 分取水化学、浮游植物、浮游动物水样.

分析项目有: pH、叶绿素 a、悬浮物、总氮(TN)、总可溶性氮(TDN)、硝酸根、总磷(TP)、总可溶性磷和磷酸根、浮游植物种类和数量、浮游动物种类和数量, 同时测定了流速、透明度和水下照度.

各阶段都测定初级生产力二次. 初级生产力用黑白瓶溶氧法测定, 曝光时间为 4h. 在各阶段稳定状态的第三、第四天分五层进行测定. 按表层 20cm、40cm、60cm 和 100cm 分层, 每层一个白瓶, 黑瓶挂在水下 20cm 和 100cm 处. 测定初级生产力的同时, 用 LI-COR 和 LI-192SA 水下光量子探头每小时一次测定水下光照.

## 2 结果

### 2.1 pH

静止状态时, pH 值变化范围为 8.38-8.52, 其均数为 8.49. 小水流状态时, pH 值变化范围为 8.37-8.72, 其均数为 8.57, 为实验过程中 pH 最高阶段. 大水流状态时, pH 值变化范围为 8.20-8.29, 其均数为 8.25(表 1).

### 2.2 悬浮质和透明度

静止状态时, 悬浮质变化范围为  $0.73-4.07\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 其均数为  $2.01\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 为实验过程中悬浮质最低, 因此其透明度清澈见底(1.2m).

小水流状态时, 悬浮质变化范围为  $11.17-14.37\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 其均数为  $12.04\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 其平均透明度为 65cm.

大小流状态时, 悬浮质变化范围为  $40.60-47.67\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 其均数为  $42.65\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 为实验过程中悬浮质最高. 其平均透明度仅为 25cm.

表 1 实验期间主要理化因子变化幅度及均数

Tab.1 Mean value and its range of physico-chemical factors during experiments

	pH	悬浮质 /mg·L <sup>-1</sup>	叶绿素 a /μg·L <sup>-1</sup>	TN /mg·L <sup>-1</sup>	TDN /mg·L <sup>-1</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /mg·L <sup>-1</sup>	TP /mg·L <sup>-1</sup>	TDP /mg·L <sup>-1</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> /mg·L <sup>-1</sup>
静 止 状 态	8.38-8.52 8.49	0.73-4.07 2.01	2.33-3.57 2.85	1.79-2.01 1.88	1.68-1.99 1.83	1.14-1.28 1.20	0.034-0.060 0.042	0.018-0.036 0.026	0.002-0.005 0.004
小水流 状 态	8.37-8.72 8.57	11.17-14.37 12.04	9.7-29.2 16.7	1.20-1.40 1.28	1.06-1.23 1.15	0.52-0.67 0.58	0.037-0.054 0.044	0.012-0.022 0.017	0-0.005 0.002
大水流 状 态	8.20-8.29 8.25	40.60-47.67 42.65	8.8-21.6 16.3	1.84-2.41 2.11	1.63-2.07 1.81	0.84-1.04 0.96	0.101-0.124 0.108	0.011-0.029 0.021	0.003-0.012 0.010

### 2.3 TDN 和 TN 的比值

静止状态时, TN 的变化范围为 1.79-2.01mg·L<sup>-1</sup>, 其均值是 1.88mg·L<sup>-1</sup>, 其 TDN 的变化范围是 1.68-1.99mg·L<sup>-1</sup>, 其均数为 1.83mg·L<sup>-1</sup>.

小水流状态时, TN 的变化范围为 1.20-1.40mg·L<sup>-1</sup>, 其均值是 1.28mg·L<sup>-1</sup>. 其 TDN 的变化范围为 1.06-1.23mg·L<sup>-1</sup>, 其均数为 1.15mg·L<sup>-1</sup>.

大水流状态时, TN 的变化范围为 1.84-2.41mg·L<sup>-1</sup>, 其均值是 2.11mg·L<sup>-1</sup>. TDN 的变化范围为 1.63-2.07mg·L<sup>-1</sup>, 其均数为 1.81mg·L<sup>-1</sup>. 平均 TDN/TN 的比值, 在静止状态时为 97%, 小水流状态时为 89.7%, 大水流状态时为 86.1%.

### 2.4 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 与 TDN 的比值

静止状态时, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的变化范围为 1.14-1.08mg·L<sup>-1</sup>, 其均值是 1.20mg·L<sup>-1</sup>. 小水流状态时, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的变化范围为 0.516-0.669mg·L<sup>-1</sup>, 其均数为 0.577mg·L<sup>-1</sup>. 大水流状态时, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的变化范围为 0.841-1.041mg·L<sup>-1</sup>, 其均数为 0.963mg·L<sup>-1</sup>. 平均 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/TDN 的比值分别为 65.6%、50.3% 和 53.1%.

### 2.5 TDP 与 TP 的比值

静止状态时, TP 的变化范围为 0.034-0.569mg·L<sup>-1</sup>, 其均数为 0.041mg·L<sup>-1</sup>. TDP 的变化范围为 0.018-0.036mg·L<sup>-1</sup>, 其均数为 0.026mg·L<sup>-1</sup>.

小水流状态时, TP 的变化范围为 0.037-0.054mg·L<sup>-1</sup>, 其均数为 0.044mg·L<sup>-1</sup>. TDP 的变化范围为 0.012-0.022mg·L<sup>-1</sup>, 其均数为 0.017mg·L<sup>-1</sup>.

大水流状态时, TP 的变化范围为 0.101-0.124mg·L<sup>-1</sup>, 其均值为 0.108mg·L<sup>-1</sup>. TDP 的变化范围为 0.011-0.029mg·L<sup>-1</sup>, 其均数为 0.021mg·L<sup>-1</sup>.

TP 随水流速度增加而增加, TDP/TP 的比值分别为 62.9%、39.4% 和 19.0%.

### 2.6 浮游植物

静止状态时, 见到浮游植物种类仅 7-8 种. 其中绿藻占 29.7%; 硅藻占 27.0%; 隐藻占 21.6% (各水样出现的藻类种数见表 2).

小水流状态时, 见到浮游植物为 12-24 种. 其中绿藻占 37.8%; 硅藻占 30.3%; 其它藻类约占 20% 以下.

表 2 各水样出现的藻类种数\*

Tab. 2 Species number in water samples

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19
蓝藻		1	1	1		2	1	1	1	1	1	2	3	2	1				
隐藻	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1
硅藻	2	2	2	2	2	5	5	5	3	4	4	4	4	4	6	6	6	5	5
裸藻	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
绿藻	2	2	2	2	3	4	5	5	5	5	5	5	6	6	4	4	4	4	4
合计	7	7	7	8	8	14	14	14	12	13	13	14	16	15	15	14	14	11	11

\* S1—S5 为静止状态水样; S8—S12 为小水流状态水样; S15—S19 为大水流状态水样;  
S6—S7 为静止状态过渡到小水流状态水样; S13—S14 为小水状态过渡到大水流状态水样。

大水流状态时,见到浮游植物为 11—15 种。其中硅藻占 43.1%;绿藻占 31.8%;其它各种藻类约占 20% 以下。

从静止状态过渡到小水流状态,硅藻占 35.7%,其次是绿藻占 32.1%。从小水流状态过渡到大水流状态,绿藻占 38.7,其次是硅藻占 25.3%。

藻类数量的平均值以大水流状态时最高,达  $3.4 \times 10^7 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ ,其相应的生物量平均值是  $1.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,次于小水流状态时的生物量。小水流状态时,生物量平均值为  $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,其相应的数量的平均值为  $2.9 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 。静止状态时,无论是藻类平均数量和平均生物量均最低,其数量的平

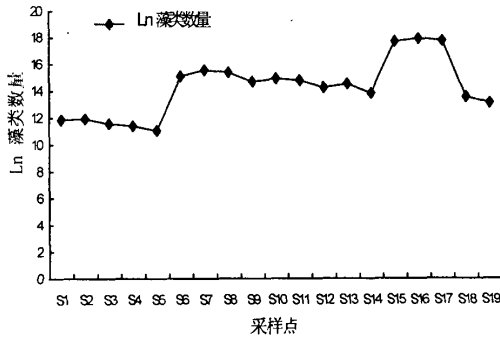


图 2 藻类数量的变化  
Fig. 2 Change of algae abundance

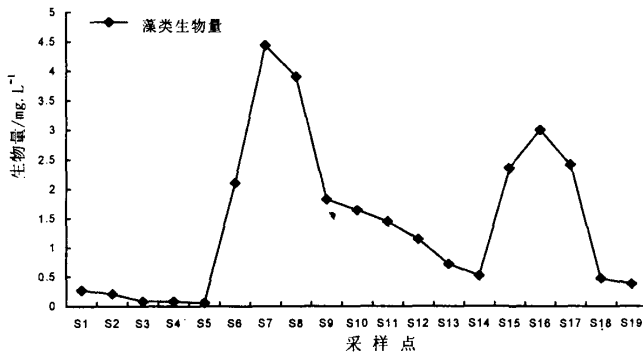


图 3 藻类生物量的变化  
Fig. 3 Change of algae biomass

均值为  $1.1 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ ,生物量平均值为  $0.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。从图 2、3 看,藻类的数量变化在三个状态有三个台阶,其曲线变化不如生物量变化大。

表 3 实验期间藻类数量净增长率  
Tab.3 Increase rate of algae abundance during experiments

		S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
微囊藻	<i>Microcystis sp.</i>		0.11	-0.69						
颤藻	<i>Oscillatoria sp.</i>						0.02	0.45	0.29	2.30
平裂藻	<i>Merismopedia sp.</i>						-2.96			
卵隐藻	<i>Cryptomonas ovata</i>									
嗜蚀隐藻	<i>Cryptomonas erosa</i>	-0.29	-1.10	0.00	-0.29	-0.14	0.17	-0.17	0.69	-2.58
尖尾蓝隐藻	<i>Chroomonas acuta</i>				0.69	0.00	0.00	0.00	0.69	-1.89
直链硅藻	<i>Melosira granulata</i>						0.29	-0.35	0.00	
小环藻	<i>Cyclotella sp.</i>						-0.69	-0.41		
脆杆藻	<i>Fragilaria sp.</i>						0.27	-0.07	-0.85	0.00
针杆藻	<i>Synedra sp.</i>	0.69	-0.69	0.00	-1.20	2.00	0.14	-0.04	-0.88	-0.24
舟形藻	<i>Navicula sp.</i>	0.00	0.41	-0.41	-0.69	1.65	0.06	-0.06	-0.54	0.00
双菱藻	<i>Surirella sp.</i>									
尖尾裸藻	<i>Englena oxyuris</i>	-1.09	0.69	-0.69		-2.96	0.30	0.10	0.00	0.00
斜生栅藻	<i>Scenedesmus obliquus</i>	-0.29	0.29	-0.69	-0.29	-0.08	0.23	-0.41	0.69	0.00
二型栅藻	<i>S. dimorphus</i>	0.41	0.29	-0.69	0.00	0.46	-0.06	0.00	-1.09	0.00
双对栅藻	<i>S. bijuga</i>					0.33	0.23	-0.23	0.00	-0.69
被甲栅藻	<i>S. armatus</i>							-0.33	0.00	0.41
单角盘星藻	<i>Pediastrum simplex</i>									
转板藻	<i>Mougeotia sp.</i>						0.07	0.40	-0.29	0.29
		S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19
微囊藻	<i>Microcystis sp.</i>			-1.23						
颤藻	<i>Oscillatoria sp.</i>	-0.11	-2.19	-0.10	-0.69	-0.28				
平裂藻	<i>Merismopedia sp.</i>				-0.35					
卵隐藻	<i>Cryptomonas ovata</i>						2.36	-1.20		
嗜蚀隐藻	<i>Cryptomonas erosa</i>	2.90	-0.69	0.00	0.00	0.35	1.61	-1.20	0.00	
尖尾蓝隐藻	<i>Chroomonas acuta</i>	-0.69	-0.69	-0.41	0.00	0.35	0.91	-1.20	-0.41	0.00
直链硅藻	<i>Melosira granulata</i>	0.69	-0.32	0.11	-0.08	0.92	-0.25	-0.84	0.69	0.00
小环藻	<i>Cyclotella sp.</i>						0.69	-1.38	-0.22	-0.29
脆杆藻	<i>Fragilaria sp.</i>	-0.18	-0.22	-0.46	-0.17	0.00	0.00	0.00	-1.20	0.51
针杆藻	<i>Synedra sp.</i>	-0.18	-0.22	0.00	-0.06	1.22	0.20	-0.12	-5.23	-0.41
舟形藻	<i>Navicula sp.</i>	0.10	-0.31	-0.15	-0.10	-0.10	0.41	-0.18	0.59	-0.59
双菱藻	<i>Surirella sp.</i>						0.69	-0.69		
尖尾裸藻	<i>Englena oxyuris</i>	0.15	-0.15	-0.14	-0.07	-0.68	2.71	-0.41	-1.20	-0.69
斜生栅藻	<i>Scenedesmus obliquus</i>	0.00	0.00	0.23	0.07	0.00	0.00	-0.40	0.00	
二型栅藻	<i>S. dimorphus</i>	0.69	-0.29	0.00	-0.27	0.10	0.29	-0.69	0.00	0.02
双对栅藻	<i>S. bijuga</i>	0.69	-0.69	0.00	-0.07	0.29	-0.29	-0.41	0.41	0.29
被甲栅藻	<i>S. armatus</i>	-0.41	0.00	0.33	-0.10	0.41	0.29	-0.69	0.00	0.69
单角盘星藻	<i>Pediastrum simplex</i>				0.22					
转板藻	<i>Mougeotia sp.</i>	-0.09	-0.61	0.00	-0.13					

藻类的数量是不断变化的,它的瞬时数量是藻类在瞬时区间内藻类细胞增加量和藻类细胞减少量(包括藻类的沉降和死亡等)的代数和.用藻类数量的净增长率( $r$ )来表示.

$$r = \frac{\ln N_1 - \ln N_0}{t_1 - t_0}$$

式中,  $r$  为藻类数量单位时间内的净增长率( $d^{-1}$ );  $N_1$  为单位时间末的藻类数量( $cells \cdot L^{-1}$ );  $N_0$  为单位时间初的藻类数量( $cells \cdot L^{-1}$ );  $t_1$  为单位时间末的时间( $d$ );  $t_0$  为单位时间初的时间( $d$ ).

在连续采样中  $r$  为正,表示单位时间末较时间初时藻类数量增加.  $r$  为负,表示单位时间末较时间初时藻类数量减少.根据实验数据分析,当  $r = 0.69d^{-1}$  时,表示这一天藻类的数量是前一天藻类数量的一倍.如果  $r > 0.69d^{-1}$  时,说明其净增长大于一倍.当  $r = -0.69d^{-1}$  时,表示这一天藻类的数量较前一天藻类数量减了一倍.如果  $r < -0.69d^{-1}$  时,说明其净减少大于一倍.表 3 是实验期间藻类数量净增长率.

在静止状态时,净增长率大于  $0.69d^{-1}$  的有尖尾隐藻 (*Chroomonas acuta*)、针杆藻 (*Synechra* sp.)、尖尾裸藻 (*Englena oxyuris*). 在小水流状态时,净增长率大于  $0.69d^{-1}$  的有颤藻 (*Oscillatoria* sp.)、啮蚀隐藻 (*Cryptomonas erosa*)、尖尾蓝隐藻、直链硅藻 (*Melosira granulata*)、斜生栅列藻 (*Scenedesmus obliquus*)、二型栅列藻 (*S. dimorphus*)、双对栅列藻 (*S. bijuga*). 大水流状态时,净增长率大于  $0.69d^{-1}$  的有卵隐藻 (*Cryptomonas ovata*)、啮蚀隐藻、尖尾蓝隐藻、直链硅藻、小环藻 (*Cyclotella* sp.)、针杆藻、双菱藻 (*Surirella* sp.) 和裸藻(表 3).

从表 3 看,静止状态时 + 值最少,大水流状态时 + 值较多,故藻类数量最多.  $r$  超过  $0.4d^{-1}$  的,静止状态时占 40%,小水流状态时占 41%,大水流状态时占 62%.  $r$  超过  $0.4d^{-1}$  表示藻类净增长速率快.

## 2.7 初级生产力

藻类初级生产力可分为毛生产力和净生产力.毛生产力的大小除受温度影响外,取决于光照强度、呼吸强度和藻类叶绿素的多寡与活性.

表 4 实验期间各分层水样光合作用率 单位:  $g(O_2) \cdot g(Chla)^{-1} \cdot h^{-1}$

Tab. 4 Photosynthetic rate of different water layer during experiments

水下深度	静止状态				小水流状态				大水流状态			
	5月 20日		5月 22日		6月 4日		6月 6日		6月 19日		6月 21日	
0-0.2m	5.02	15.5	4.86	30.88	3.64	25.28	4.41	27.38	4.93	46.41	4.06	57.02
0.2-0.4m	5.73	17.8	3.63	23.04	3.31	23.03	3.88	24.13	3.51	33.04	1.98	27.87
0.4-0.6m	6.36	19.7	2.18	13.82	2.67	18.54	2.91	18.10	1.35	12.73	0.63	8.79
0.6-1.0m	12.37	38.3	4.06	25.81	4.00	27.81	4.03	25.06	0.79	7.41	0.43	6.00
1.0-1.2m	2.82	8.74	1.02	6.45	0.77	5.34	0.86	5.34	0.04	0.40	0.02	0.32
0.0-1.2m	32.30	100	15.75	100	14.38	100	16.10	100	10.62	100	7.11	100
水柱毛生产力 $/gO_2 \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$	0.70		0.25		1.54		0.94		1.12		0.84	
$\Sigma PAR$ $/\mu E \cdot m^{-2}$	$6.98 \times 10^6$		$1.04 \times 10^6$		$3.75 \times 10^6$		$1.86 \times 10^6$		$2.41 \times 10^6$		$7.06 \times 10^5$	

表 4 是实验三个阶段,单位时间、单位叶绿素 a 的毛生产率的光合作用率、水柱生产力和

总有效辐射量.从光合作用率看静止状态时最高,特别是5月20日的总有效辐射量高、水下照度强,其水柱光合作用率高达  $32.30\text{g}(\text{O}_2) \cdot \text{g}(\text{Chla})^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ .小水流状态时,其水柱光合作用率为  $14.38\text{g}(\text{O}_2) \cdot \text{g}(\text{Chla})^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 和  $16.10\text{g}(\text{O}_2) \cdot \text{g}(\text{Chla})^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ .大水流状态时,其水柱光合作用率为  $10.62\text{g}(\text{O}_2) \cdot \text{g}(\text{Chla})^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 和  $7.11\text{g}(\text{O}_2) \cdot \text{g}(\text{Chla})^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ .

水柱生产力最高的是小水流状态,其次是大水流状态,静止状态最低.

## 2.8 浮游动物

在实验期间,共见到浮游动物(包括无节幼体与桡足幼体)33种.静止状态时,出现种类为11-13种.其中原生动物占13.5%、轮虫8.2%、枝角类40.7%、桡足类37.5%.长刺蚤(*Daphnia longispina*)、短尾秀体蚤(*Diaphanosoma brachyurum*)、裸腹蚤(*Moina* sp.)、和中华窄腹剑水蚤(*Limnoithona sinensis*)只出现在静止阶段.

小水流状态时,出现浮游动物种类有6-11种.其中原生动物占31%、轮虫30.5%、枝角类11.9%、桡足类26.2%.枝角类仅见到角突网纹蚤(*Ceriodaphnia cornuta*)、筒弧象鼻蚤(*Bosmina coregoni*)和卵形盘肠蚤(*Chydorus ovalis*),其数量不多.

大水流状态时,出现浮游动物种类为3-7种.其中原生动物占29.6%、轮虫29.6%、枝角类11.1%、桡足类29.6%.粉红粗毛蚤(*Macrothrix rosea*)和猛水蚤(*Harpacticoida*)仅在大水流阶段见到.表5是实验期间浮游动物的数量平均数.

表5 实验期间浮游动物数量平均数

单位:ind·L<sup>-1</sup>

Tab.5 Mean values of zooplankton abundance during experiments

	原生动物 + 轮虫	枝角类 + 桡足类	合 计
静止状态	460	138.4	598.4
小水流状态	4820	2.4	4822.4
大水流状态	800	0.7	800.7

## 3 讨论和结论

模拟实验表明,水动力对理化环境因子影响比较大.表现在悬浮物、透明度、pH、营养盐浓度都发生了变化.由静止状态到大水流状态,悬浮物均数由  $2.01\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增大到大水流状态的  $42.65\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,其透明度由静止状态时清澈见底(1.2m)降到大水流的平均透明度仅为25cm.悬浮质、透明度变化,引起水下光照的改变和营养盐浓度及相关比值的变化,引起浮游生物群落组成、数量等生物特征的变化.

藻类群落组成变化较大,静止状态时平均7种以上.小水流时,平均13种以上.大水流时,平均为13种.三个状态均出现的优势种为针杆藻、舟形藻、栅列藻.在静止状态时优势种还有啮齿隐藻和蓝隐藻,在小水流时还有脆杆藻,在大水流时还有直链硅藻.优势种属硅藻、绿藻和隐藻三大门类.

藻类数量以大水流状态时最高,这是因为水动力作用,使原位于底部的表层沉积物变成了水中的悬浮质.这些悬浮质的浓度及其在水中运动速度,随水流变大而增大.水动力作用也使原来悬浮质中的一些磷、氮营养元素,在机械等理化和生物作用下,释放到水体中.因此大水流状态下,水中的TP浓度是最高的,其均数达  $0.1076\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,TN浓度也是最高的,其均数为

2.11mg·L<sup>-1</sup>.

当水体中藻类周围环境营养元素增加时,其生长获取生存物质的机会就更多,加上水的搅动,使藻类细胞营养元素保持在较高的水平,促进藻类生长.表现在藻类细胞数越多,其 TDP/TP、TDN/TN 比值越小的现象.从表 3 看,静止状态时,藻类净增长值+值最少,大水流状态时+值较多,故藻类数量最多,这与大水流状态时,藻类细胞的营养物质吸收快,TDP/TP、TDN/TN 比值减小是相一致.藻类净增长率  $r$  超过  $0.4d^{-1}$  的共有 30 个,静止状态时占 16.7%、小水流状态时占 33.3%、而大水流状态时占 50%, $r$  值超过  $0.4d^{-1}$  值的比例高,表示藻类净增长快.蓝藻在三种状态时,均有  $r$  值超过  $0.69d^{-1}$ .

藻类的生物量以小水流时最高,其均数达  $2.0mg \cdot L^{-1}$ ,这与藻类的组成有关.静止状态时,藻类数量中有相当部分是蚀蚀隐藻、蓝隐藻和微囊藻,其数量均超过藻类细胞总数的 10%.而这些藻类的个体体积小,因此生物量也就低.在大水流状态时,藻类数量主要是由针杆藻组成的,小水流状态时,藻类数量主要是由舟形藻组成的.可能是舟形藻的个体体积较针杆藻个体体积大,故尽管大水流状态时藻类细胞数量较小水流状态时多,但其生物量仍较小水流状态时小.藻类平均生物量的变化与  $NO_3^-/TDN$  的比值变化趋势一致,说明个体大的藻类对  $NO_3^-$  的需要量大.

实验表明,受动力作用影响,光合作用率和水柱毛生产力变化明显.表 4 是实验期间各层水柱的光合作用率和水柱毛生产力.光合作用率为单位时间、单位叶绿素 a 的毛生产力,静止状态时,整个水柱的光合作用率达  $32.30g(O_2) \cdot g(Chla)^{-1} \cdot h^{-1}$  和  $15.75g(O_2) \cdot g(Chla)^{-1} \cdot h^{-1}$ ,平均为  $24.03g(O_2) \cdot g(Chla)^{-1} \cdot h^{-1}$ .小水流状态时,其平均光合作用率为  $15.24g(O_2) \cdot g(Chla)^{-1} \cdot h^{-1}$ .大水流状态时,其平均光合作用率为  $8.87g(O_2) \cdot g(Chla)^{-1} \cdot h^{-1}$ .这与测定期,水柱的总有效辐射量有关,静止状态时为  $4.01 \times 10^6 \mu E \cdot m^{-2}$ 、小水流状态时为  $2.81 \times 10^6 \mu E \cdot m^{-2}$ 、大水流状态时为  $1.56 \times 10^6 \mu E \cdot m^{-2}$ .各状态下分层最高光合作用率的水柱深度,由静止状态的 0.6m 到大水流状态时均在表层.这系动力作用使水体悬浮质增加,水下光照条件改变,补偿深度(水下光照强度为水表层光照强度 1% 的深度弥补补偿深度)变浅而呈向上移动的趋势.5 月 22 日虽处于静止状态,其分层最高光合作用率也移到表层,这是由于水下光照低所致.5 月 22 日多云、阴天,其水柱水下总有效辐射仅为 5 月 20 日的 1/3.5.说明光合作用率与水下的光照情况密切相关,而水下光照情况又与天气状况直接相关.

水柱毛生产力最高的是小水流状态,生产力大小除与光合作用率有关外,还与藻类生物量有关,小水流状态时,其藻类的生物量最高,故其毛生产力最高.这与 J. Rucker 等<sup>[5]</sup>认为:影响浮游植物的四个理化因子(光照,营养盐,浮游动物的摄食,起始藻类浓度)的观点是相一致的.

浮游动物的种类、数量与水流状态关系密切.在静止状态时,不但浮游动物的种类数多,而且枝角类和桡足类占的比例也大,尤其是枝角类的种类多.枝角类种类组成,从静止状态到大水流状态,受动力作用呈现:长刺溞、裸腹溞、角突网纹溞、筒弧象鼻溞—角突网纹溞、筒弧象鼻溞、卵形盘肠溞—粗毛溞的格式演化.由静止状态到小水流状态时,枝角类也变小型.静止状态下枝角类的平均数量达到  $87.9ind \cdot L^{-1}$ .静止状态下,枝角类以浮游单细胞藻类、有机碎屑、原生动物以及细菌为食物.在藻类中以绿藻最普遍,栅列藻、直链硅藻、隐藻、裸藻均为枝角类较为普遍的藻类食物.因此,当枝角类数量多时,藻类在以枝角类为主的浮游动物摄食作用下减



少,致使在食物静止实验过程中藻类数量和生物量都很低,而水质清澈透明.所以枝角类的种类多、数量大有很大的生态学意义<sup>[6]</sup>.

从静止状态进入水流状态时,浮游动物见到的种类随水流增大呈递减趋势,其种类数中原生动物、轮虫占的百分比增加,枝角类和桡足类占的百分比减少,枝角类种类减少更加明显.在大水流状态时见到的粗毛溞和猛水溞一类属底栖性的种类.浮游动物的数量,随水流状态改变而变动.原生动物和轮虫的数量在小水流时最高,达平均  $4820 \text{ind} \cdot \text{L}^{-1}$ ,其中轮虫  $1240 \text{ind} \cdot \text{L}^{-1}$ ,主要是臂尾轮虫(*Brachionus* spp.)、龟甲轮虫(*Keratella* spp.),它们属于无选择性的微型滤食者,食物的大小为  $0.5 - 2.0 \mu\text{m}$ <sup>[7]</sup>,食物较多.悬浮质亦常作为一些原生动物生长的基质,因此原生动物的数量也大.轮虫数量大,就恶化了枝角类的食物条件,从而使枝角类数量下降<sup>[8]</sup>.枝角类数量仅  $0.6 \text{ind} \cdot \text{L}^{-1}$ ,只占桡足类数量  $1.8 \text{ind} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $1/3$ .原生动物和轮虫数量在大水流时,达平均  $780 \text{ind} \cdot \text{L}^{-1}$ ,其中轮虫  $460 \text{ind} \cdot \text{L}^{-1}$ ,枝角类和桡足类数量仅  $0.7 \text{ind} \cdot \text{L}^{-1}$ (其中枝角类  $0.2 \text{ind} \cdot \text{L}^{-1}$ ).由此可见,水动力起着十分重要作用.水动力作用决不限于把浮游动物从这一水域带到另一水域,而主要是搅扰水底沉积物,使之上升,造成了大型浮游动物(枝角类和桡足类),特别是枝角类的食物条件恶化,其摄食的滤器堵塞引起死亡.与此同时,水体的营养物质增加、悬浮质增加引起藻类迅速生长和原生动物、轮虫这些生命周期短的小型浮游动物大量繁衍.

本实验研究表明动力作用对浮游生物的种类组成、数量变动、优势种的演替起重要作用,动力作用通过增加水体中的悬浮质、降低透明度,改变水下光照条件,有利于经过物理、化学、生物过程释放为生物能利用的营养物质.这些理化因子的改变,使生物体周围营养物质不断更新,保持平衡,有利于藻类生长,造成浮游动物结构变化明显,长刺溞等一类生活在澄清水体中的种类被一些小型的枝角类所替代,加之温度的变化形成生物群落的演替.

## 参 考 文 献

- 1 Ulrich. The role of r- and k- selection in the succession of phytoplankton in Lake Constance. *Acta Oecologica*, 1981, 2(4): 327 - 342
- 2 蔡后建, 陈伟民. 微囊藻水华的漂移和降解对太湖水环境的影响. 见: 蔡启铭编. 太湖环境生态研究(一). 北京: 气象出版社, 1998. 149 - 157
- 3 陈伟民, 秦伯强. 太湖梅梁湾冬末春初浮游动物时空变化及其环境意义. 湖泊科学, 1998, 10(4): 10 - 16
- 4 黄祥飞等. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 1999
- 5 J. Rucker, C. Wiedner & P. Zippel. Factor controlling the dominance of *Planktothrix agardhii* and *Limnithrix redekei* in eutrophic shallow lakes. *Hydrobiologia*, 1997, 342/343: 107 - 115
- 6 Chen Weimin & Guo Xiaoming. Annual change in zooplanktonic crustacea and their relationship with physico-chemical factors in Chonghu Lake. *Int J Ecol Environ Sci*, 1987, 13: 95 - 103
- 7 J Mayer, M Dokulil, M Salbrechter, et al. Seasonal successions and trophic relationship between phytoplankton, zooplankton, ciliate and bacteria in a hypertrophic shallow lake in Vienna, Austria. *Hydrobiologia*, 1997, 342/343: 165 - 174
- 8 蒋蔓治, 堵南山. 中国动物志, 节肢动物门, 甲壳纲, 淡水枝角类. 北京: 科学出版社, 1979

## Experimental Study on the Biological Community Succession Caused by Water Flow

CHEN Weimin    CHEN Yuwei    QIN Boqiang    GAO Xiyun  
GAO Guang    JI Jiang    XU Qiujing

(*Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China*)

### Abstract

The stimulate experiments show the water flow plays an important role in the succession of plankton community. The species number and biomass of algae under weak water flow ( $0.124\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) were highest in the experiments. This was coincided with the low ratio of  $\text{NO}_3/\text{TDN}$ . The algae abundance was increased from the stationary state to the strong water flow ( $0.319\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) state, the corresponding  $\text{TDN}/\text{TN}$ ,  $\text{TDP}/\text{TP}$  were decreased at the same time. The photosynthetic rates from the stationary state to the strong water flow state were also decreased. The change of zooplanktonic species composition and abundance were larger than that of phytoplankton. The change of cladoceran composition and abundance were extremely strong. The change of species composition and abundance of phyto-zooplankton were influenced by water flow through the change of substance solids, transparency, light condition under water and the release of nutrients caused by physico-chemico-biological processing.

**Key Words** Stimulate experiment, plankton, succession, Taihu Lake