

模拟水动力对湖泊浮游动物 群落演替的实验研究 *

陈伟民 秦伯强 许秋瑾

(中国科学院南京地理与湖泊研究所)

湖泊的浮游动物在种群演替和数量变化方面都有极明显的周期性 (Chen *et al.*, 1987)。浮游动物的周期性变化,除受湖泊环境温度、光照的周期性变化等因素外,同时还受到水体的水动力作用影响 (陈伟民等, 1998)。

王家楫等 (1965) 对东湖的轮虫数量进行了研究, 陈受忠 (1965) 阐述了东湖近邻剑水蚤 (*Cyclops vicinus*)、广布中剑水蚤 (*Mesocyclops leuckarti*)、汤匙华指水蚤 (*Sinoialanub dorrii*)、特异荡镖水蚤 (*Neutrodiaptomus incongreus*) 等都有显著昼夜垂直移动。Evans (1988) 等在有关浮游动物的数量变动与水环境关系方面做了研究。但就水动力作用对浮游动物群落演替的实验研究较少见报道。

为研究水动力作用对浮游动物群落的种类数量变化, 利用大型生态模拟槽, 探讨不同水动力过程对浮游动物种类组成, 数量变化过程和作用途径等, 本文作者用模拟水动力的方法对湖泊浮游动物群落演替进行了实验研究, 为今后的湖泊生态修复提供了科学依据。

一、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, 淤泥上复太湖水, 高度为 1.2m。隔天将湖水用 33 μ m 浮游生物网过滤, 加入槽内, 以补充被蒸发的水量。实验期间气温控制在 25 $^{\circ}$ C。

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 0.124m/s, 流速用 LS78 型低速流速仪测定 (重庆水文仪器厂生产), 运作 5d, 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

* 本课题为中国科学院资助项目 KZCX2-311、KZ-T-04-04 号。

收稿日期: 2000 年 12 月 25 日。

水泵机电水泵厂生产)控制,平均流速为 0.319m/s,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。

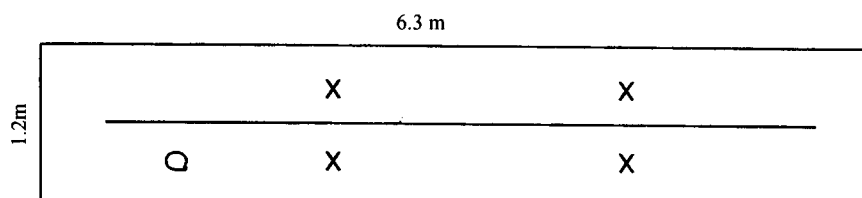


图 1 模拟生态槽示意图

采样步骤 用有机玻璃采水器采样,在各采样点分别取 5L 水样,放入洗净的塑料桶内,充分混合。按“湖泊生态调查、观测与分析”一书提供的方法(黄祥飞等,1999)分取水化学、浮游植物、浮游动物水样。

分析项目 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(TDP)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。用 LI-COR 和 LI-192SA 水下光量子探头每小时一次测定水下光照。

二、结 果

1. pH 值

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)。

表 1 实验期间主要理化因子变化幅度及均数

	pH	悬浮质 (mg/L)	叶绿素 a ($\mu\text{g/L}$)	TN (mg/L)	TDN (mg/L)	NO_3^- (mg/L)	TP (mg/L)	TDP(mg/L)	PO_4^{3-} (mg/L)
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	0.034~0.056 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	0.516~0.669 0.577	0.037~0.058 0.044	0.012~0.022 0.017	0~0.005 0.002
大水流 状态	8.20~8.29 8.25	40.6~47.67 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. 悬浮质和透明度

静止状态时,悬浮质变化范围为 0.73~4.07mg/L,其均数为 2.01mg/L,为实验过程中悬浮质最低,因此其透明度为清澈见底(1.2m)。

小水流状态时,悬浮质变化范围为 11.17~14.37mg/L,其均数为 12.04mg/L,其平均透明度为 65cm。

大水流状态时,悬浮质变化范围为 40.60~47.67mg/L,其均数为 42.65mg/L,为实验过程中悬浮质最高,其平均透明度仅为 25cm。

3. TDN 和 TN 的比值

静止状态时, TN 的变化范围为 1.79~2.01mg/L, 其均值是 1.88mg/L; TDN 的变化范围是 1.68~1.99mg/L, 其均数为 1.83mg/L。

小水流状态时, TN 的变化范围为 1.20~1.40mg/L, 其均值是 1.28mg/L; TDN 的变化范围为 1.06~1.23mg/L, 其均数为 1.15mg/L。

大水流状态时, TN 的变化范围为 1.84~2.41mg/L, 其均值是 2.11mg/L; TDN 的变化范围为 1.63~2.07mg/L, 其均数为 1.81mg/L。

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%。

4. NO_3^- 与 TDN 的比值

静止状态时, NO_3^- 的变化范围为 1.14~1.28mg/L, 其均值是 1.20mg/L。小水流状态时, NO_3^- 的变化范围为 0.516~0.669mg/L, 其均数为 0.577mg/L。大水流状态时, NO_3^- 的变化范围为 0.84~1.04mg/L, 其均数为 0.96mg/L。平均 NO_3^- /TDN 的比值分别为 65.6%、50.3% 和 53.1%。

5. TDP 与 TP 的比值

静止状态时, TP 变化范围为 0.034~0.056mg/L, 其均数为 0.042mg/L。TDP 变化范围为 0.018~0.036mg/L, 其均数为 0.026mg/L。

小水流状态时, TP 变化范围为 0.037~0.054mg/L, 其均数为 0.044mg/L。TDP 变化范围为 0.012~0.022mg/L, 其均数为 0.017mg/L。

大水流状态时, TP 变化范围为 0.101~0.124mg/L, 其均值为 0.108mg/L。TDP 变化范围为 0.01~0.029mg/L, 其均数为 0.021mg/L。

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%。

6. 浮游植物

各种状态下, 见到的各门浮游植物种类数见表 2。

表 2 各水流状态水样出现的藻类种数

	静止状态					静止状态到 小水流状态		小水流状态				小水流状态到 大水流状态		大水流状态					
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

藻类数量的平均值以大水流状态时最高, 达 3.4×10^7 个细胞/L; 小水流状态时, 其数量的平均值为 2.9×10^6 个细胞/L; 静止状态时, 藻类平均数量最低为 1.1×10^5 个细胞/L (藻类的数量变化见图 2)。

表 3 各水样出现的浮游动物及其数量(个/L)

种名(Species Name)	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
尖顶砂壳虫(<i>Diffugia acuminata</i>)	200	100	-	-	-	100	100	-	-	-
圆钵砂壳虫(<i>D. pyriiformis</i>)	-	-	-	-	-	-	300	-	-	-
四膜虫(<i>Tetrahymena</i> sp.)	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-
板壳虫(<i>Coleps</i> sp.)	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-
草履虫(<i>Paramecium</i> sp.)	-	-	-	-	-	-	-	200	-	-
刀口虫(<i>Spathidium</i> sp.)	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-
筒壳虫(<i>Tintinnidium</i> sp.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
侠盗虫(<i>Strobilidium</i> sp.)	300	200	300	300	200	700	800	600	-	-
急游虫(<i>Strombidium</i> sp.)	-	-	-	100	-	200	200	200	300	100
钟形虫(<i>Vorticella</i> sp.)	-	-	-	-	-	-	-	5200	3800	3600
尖毛虫(<i>Oxytricha</i> sp.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
角突臂尾轮虫(<i>Brachionus angularis</i>)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
萼花臂尾轮虫(<i>B. calyciflorus</i>)	100	-	-	-	-	-	-	100	-	-
花夹臂尾轮虫(<i>B. quadridentatus</i>)	-	-	-	-	-	-	200	600	600	100
剪形臂尾轮虫(<i>B. farfcula</i>)	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-
螺形龟甲轮虫(<i>Keratella cochlearis</i>)	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-
矩形龟甲轮虫(<i>K. quadrata</i>)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
腔轮虫(<i>Lecane</i> sp.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
月形单趾轮虫(<i>Monostyla luna</i>)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
独角聚花轮虫(<i>Concochiloilus unicornis</i>)	200	-	-	100	-	200	100	-	100	-
长刺溞(<i>Daphnia longispina</i>)	0.6	0.4	0.4	0.4	1.4	-	-	-	-	-
短尾秀体溞(<i>Diaphanosoma brachyurum</i>)	1.6	-	0.8	0.4	0.6	-	-	-	-	-
角突网纹溞(<i>Ceriodaphnia cornuta</i>)	3.4	8.2	8.4	17.8	50.6	1.6	0.4	0.2	-	-
裸腹溞(<i>Moina</i> sp.)	0.6	0.4	1.2	4.4	1.4	0.2	-	-	-	-
筒弧象鼻溞(<i>Bosmina coregoni</i>)	62.6	66.4	64.8	65	77.8	7	2.8	1.8	0.2	-
卵形盘肠溞(<i>Chydorus ovalis</i>)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.4
粉红粗毛溞(<i>Macrothrix rosea</i>)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
镖水蚤(<i>Calanoida</i>)	0.4	2	0.4	2	1.8	-	0.2	-	-	-
剑水蚤(<i>Cyclopoida</i>)	-	0.2	-	-	0.6	0.2	0.2	-	-	0.2
中华窄腹剑水蚤(<i>Limnithona sinensis</i>)	31.8	31.8	31	20.4	33.6	0.6	-	-	-	-
猛水蚤(<i>Harpacticoida</i>)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
桡足幼虫(<i>Copepodite</i>)	15.4	11.2	11.2	7	15.8	1.8	2.6	0.4	-	-
无节幼虫(<i>Nauplius</i>)	5.2	4.2	7.8	5	11.8	2.4	1.6	2.4	1.4	1.4

续表

种名(Species Name)	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19
尖顶砂壳虫(<i>Diffugia acuminata</i>)	-	-	-	300	300	-	-	-	-
圆钵砂壳虫(<i>D. pyriformis</i>)	-	-	-	-	-	200	200	200	100
四膜虫(<i>Tetrahymena</i> sp.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
板壳虫(<i>Coleps</i> sp.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
草履虫(<i>Paramecium</i> sp.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
刀口虫(<i>Spathidium</i> sp.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
筒壳虫(<i>Tintinnidium</i> sp.)	-	-	100	-	-	-	-	-	-
侠盗虫(<i>Strobilidium</i> sp.)	-	200	-	200	300	100	-	-	-
急游虫(<i>Strombidium</i> sp.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
钟形虫(<i>Vorticella</i> sp.)	1700	1800	100	-	-	-	-	-	-
尖毛虫(<i>Oxytricha</i> sp.)	-	-	-	-	-	200	-	-	-
角突臂尾轮虫(<i>Brachionus angularis</i>)	200	900	200	400	200	500	300	-	-
萼花臂尾轮虫(<i>B. calyciflorus</i>)	100	-	-	-	-	-	-	-	-
花夹臂尾轮虫(<i>B. quadridentatus</i>)	1200	2000	600	-	-	-	-	-	-
剪形臂尾轮虫(<i>B. farficula</i>)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
螺形龟甲轮虫(<i>Keratella cochlearis</i>)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
矩形龟甲轮虫(<i>K. quadrata</i>)	-	100	-	-	-	-	-	-	-
腔轮虫(<i>Lecane</i> sp.)	-	-	-	-	-	200	100	500	400
月形单趾轮虫(<i>Monostyla luna</i>)	100	-	-	-	-	-	-	-	-
独角聚花轮虫(<i>Conochiloides unicornis</i>)	-	100	300	200	-	-	100	-	-
长刺蚤(<i>Daphnia longispina</i>)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
短尾秀体溞(<i>Diaphanosoma brachyurum</i>)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
角突网纹溞(<i>Ceriodaphnia cornuta</i>)	-	-	-	-	0.4	-	-	-	-
裸腹溞(<i>Moina</i> sp.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
筒弧象鼻溞(<i>Bosmina coregoni</i>)	-	-	0.2	-	-	-	-	-	-
卵形盘肠溞(<i>Chydorus ovalis</i>)	0.2	-	0.4	-	-	-	-	-	-
粉红粗毛溞(<i>Macrothrix rosea</i>)	-	-	-	0.2	0.6	0.4	-	-	-
镖水蚤(<i>Calanoida</i>)	0.6	0.2	-	-	-	-	-	-	-
剑水蚤(<i>Cyclopoida</i>)	-	-	-	-	-	-	-	0.2	-
中华窄腹剑水蚤(<i>Limnithona sinensis</i>)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
猛水蚤(<i>Harpacticoida</i>)	-	-	2.6	2.2	0.4	0.4	0.2	0.4	0.2
桡足幼虫(<i>Copepodite</i>)	0.2	0.6	2.6	-	-	-	0.2	-	-
无节幼虫(<i>Nauplius</i>)	1	0.6	0.2	-	0.2	-	-	-	-

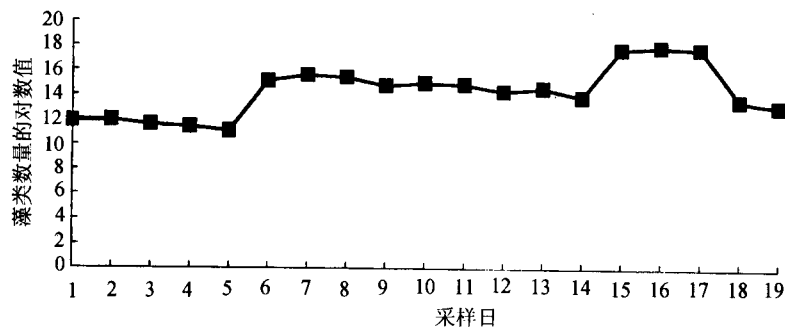


图2 藻类的数量变化

7. 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(表3)。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%,长刺溞(*Daphnia longisina*)、短尾秀体溞(*Diaphanosoma brachyurum*)、裸腹溞(*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,出现浮游动物种类为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溞(*Ceriodaphnia cornuta*)、简弧象鼻溞(*Bosmina coregoni*)和卵形盘肠溞(*Chydorus ovalis*),其数量不多。

大小流状态时,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%。粉红粗毛溞(*Macrothrix rosea*)和猛水溞(*Harpacticoida*)仅在大水流阶段见到。表4是实验期间浮游动物的数量平均数。

表4 实验期间浮游动物数量平均数(个/L)

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

三、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。表现在悬浮质、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2.01mg/L增大到大水流状态的42.65mg/L,其透明度由静止状态时清澈见底(1.21m)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。

实验中藻类群落组成变化较大,静止状态时藻类种类数平均为7种以上。小水流时,平均为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

(*Synedra* sp.)、舟形藻(*Navicula* sp.)、栅列藻(*Scenedesmus* sp.)。在静止状态时优势种还有嗜蚀隐藻(*Cryptomonas erosa*)和尖尾蓝隐藻(*Chroomonas acuta*);在小水流时还有脆杆藻(*Fragilaria* sp.);在大水流时还有直链硅藻(*Melosira granulata*)。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力运动速度,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、TN 浓度是最高的,其均数分别为 0.108mg/L 和 2.11mg/L。

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。大水流状态时,藻类数量最多。与其 TDP/TP、TDN/TN 比值减小是相一致。

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,且枝角类和桡足类占的比例也大。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(*Daphnia longispina*)、短尾秀体溞(*Diaphanosoma brachyurum*)、裸腹溞(*Moina* sp.)、角突网纹溞(*Ceriodaphnia cornuta*)、筒弧象鼻溞(*Bosmina coregoni*)到角突网纹溞、筒弧象鼻溞、卵形盘肠溞(*Chydorus ovalis*)再到粗毛溞(*Macrothrix rosea*)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 88 个/L,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(Chen *et al.*, 1987)。

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蚤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。小水流时原生动物和轮虫的数量最高,平均达 4820 个/L,其中轮虫 1240 个/L,主要是臂尾轮虫(*Brachionus* spp.)、龟甲轮虫(*Keratella* spp.)。悬浮质含量增加,恶化了枝角类的食物条件,从而使枝角类数量下降(蒋燮治等,1979)。枝角类数量仅 0.6 个/L,只占桡足类数量 1.8 个/L 的 1/3。大水流时原生动物和轮虫数量平均达 780 个/L,其中轮虫 460 个/L,枝角类和桡足类数量仅 0.7 个/L(其中枝角类 0.2 个/L)。水动力作用不仅仅局限于把浮游动物从这一水域带到另一水域,而更重要是搅扰水底沉积物,增加悬度,使大型浮游动物(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,特别是悬浮质增加将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动物的种类组成、数量变动、优势种的演替起重要作用,水动力对水体浮游生物的作用通过直接、间接两个方面。一方面水动力作用通过

增加水体中的悬浮质、降低透明度,从而改变水下光照条件,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。另一方面水动力引起的悬浮质增加等物理因子的改变影响到浮游动物的摄食等,改变浮游动物的组成和数量。从静止状态到水流状态时,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。通过微食物链作用,促使藻类大量繁殖。因此,水动力作用是造成大型浅水湖泊富营养化的重要原因之一。

参 考 文 献

- 王家楫、伍卓田、戈敏生,1965,武昌东湖轮虫种类与数量季节变动的初步观察,水生生物学集刊,5(2):181~201。
陈伟民、秦伯强,1998,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,10(4),10~16。
陈受忠,1965,武昌东湖桡足类数量的周年资料,水生生物学集刊,5(20):202~219。
黄祥飞等,1999,湖泊生态调查观测与分析,中国标准出版社。
蒋燮治、堵南山,1979,中国动物志,节肢动物门,甲壳纲,淡水枝角类,科学出版社。
Chen Weimin and Guo Xiaoming, 1987, Annual change in zooplanktonic crustacea and their relationship with physical-chemical factors in Chonghu Lake. *Int. J. Ecol. Environ. Sci.*, 13:95~103.
Evans, M. S., 1988, Lake Huron crustacean and rotifer zooplankton, factors affecting community structure with an evaluation of water quality status. Great Lake Research Division, special publication, No. 98.

SIMULATED EXPERIMENTAL STUDY ON SUCCESSION OF ZOOPLANKTON CAUSED BY WATER FLOW

Chen Weimin, Qin Boqiang, Xu Qiujin
(Nanjing Institute of Geography and Laminology, CAS)

ABSTRACT

Simulation experiments showed that the change of zooplanktonic species composition and abundance were larger than those of phytoplankton. In the stationary state, cladoceran and copepod comprised 23.1% of zooplankton abundance. The water was transparent to the bottom, and mean suspended solids was 2.85 mg/L. These conditions were favorable for cladoceran and copepod because they could freely filter food. The low abundance of protozoa and rotifera was probably caused by feeding pressure from cladoceran.

From stationary state to low-flow state, the abundance of protozoa and rotifera reached 1250 and 250 ind./L, respectively. Cladoceran and copepod abundance decreased to 6 and 4.8 ind./L, respectively. At the low-flow state, zooplankton abundance reached the maximum value in the experiment. Water column transparency was 65 cm, and mean concentration of suspended solids was 12.04 mg/L. This provided sufficient food items for protozoa and rotifera and allowed their populations to increase dramatically. However, the suspended particles caused clogging of the mouth of the cladocera, and they died within 3 days.

Zooplankton abundance decreased during the period from low-flow to high-flow. Water column

transparency decreased to 25 cm. When the suspended solids increased to 42.65 mg/L. The dominant species of protozoa were *Diffugia acuminata* and *D. Pyriiformis*. Their shells were composed of chitin adhered to by inorganic particles. The high-flow conditions forced the benthic cladoceran *Macrothrix rosea* and harpacticoid copepods into the water column. These were the dominant cladocerans and copepods, respectively.

This experiment showed that wind-driven physical forces play an important role in plankton community structure. Wave action has direct effect on community structure by forcing benthic cladocerans and copepods into the water column. Indirect effects included clogging of the mouths of cladocerans leading to their death. Wind-driven wave action increases suspended solids in large, shallow lakes with soft sediments and decreases water column transparency. At the same time, wave action causes nutrients to be released from the sediments into the water column. This allows an increase in algae abundance. Under certain conditions like the low-flow state, an increase in suspended solids can stimulate population growth of protozoa and rotifera, but decrease the fraction of cladoceran and copepods which are important in controlling algal abundance via grazing. This could contribute to eutrophication in the lake. When wind-driven wave action is too high, photosynthesis is inhibited by increased turbidity and algal abundance decreases.

This simulation experiment showed that wind-driven wave action affected transparency, nutrient concentration and population structure of lake plankton communities. These factors could have an important role in lake eutrophication.

附表:实验期间出现的藻类

	种 名	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19
微囊藻	<i>Microcystis</i> sp.	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-
颤藻	<i>Oscillatoria</i> sp.	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
平裂藻	<i>Merismopedia</i> sp.	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-
卵形隐藻	<i>Cryptomonas ovata</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-
嗜蚀隐藻	<i>Cryptomonas erosa</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-
尖尾蓝隐藻	<i>Chroomonas acuta</i>	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
直链硅藻	<i>Melosira granulata</i>	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
小环藻	<i>Cyclotella</i> sp.	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+
脆杆藻	<i>Fragilaria</i> sp.	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
针杆藻	<i>Synedra</i> sp.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
舟形藻	<i>Navicula</i> sp.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
双菱藻	<i>Surirella</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-
尖尾裸藻	<i>Euglena oxyuris</i>	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
斜生栅藻	<i>Scenedesmus obliquus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+
二型栅藻	<i>S. dimorphus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
双对栅藻	<i>S. bijuga</i>	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
被甲栅藻	<i>S. armatus</i>	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
单角盘星藻	<i>Pediastrum simplex</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-
转板藻	<i>Mougeotia</i> sp.	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-