J. Lake Sci.(湖泊科学),2010,**22**(4):557-562
http://www.jlakes.org. E-mail:jlakes@niglas.ac.cn
© 2010 by *Journal of Lake Sciences*

沉积物再悬浮对浮游动物群落结构影响的模拟实验*

蒋伟伟[1],刘正文[2**],郭　亮[1],陈非洲[2],宋晓兰[2]
(1:华中农业大学水产学院,武汉 430070)
(2:中国科学院南京地理与湖泊研究所,南京 210008)

摘　要:沉积物再悬浮是浅水湖泊的重要特征之一.通过模拟实验,比较不同再悬浮程度下浮游动物群落结构的变化,以探讨沉积物再悬浮对浮游动物的影响.结果显示,不同处理下总悬浮物与叶绿素 a 浓度差异显著.再悬浮组中枝角类简弧象鼻溞(*Bosmina coregoni*)、角突网纹溞(*Ceriodaphnia cornuta*)和轮虫占优势,而对照组中大型枝角类溞属(*Daphnia* sp.)占优势,再悬浮使浮游动物群落组成趋于小型化.不同再悬浮条件下隆线溞(*Daphnia carinata*)、简弧象鼻溞(*Bosmina coregoni*)和轮虫的丰度差异显著,角突网纹溞(*Ceriodaphnia cornuta*)和桡足类丰度差异不显著.总悬浮物浓度与轮虫和简弧象鼻溞丰度显著正相关,与隆线溞丰度显著负相关,与其它浮游动物种群丰度无显著相关性.本研究显示,沉积物再悬浮是决定浮游动物群落结构变化的重要过程之一.
关键词:沉积物再悬浮;浮游动物;群落结构;浅水湖泊

Experimental study on the effect of sediment resuspension on zooplankton community

JIANG Weiwei[1], LIU Zhengwen[2], GUO Liang[1], CHEN Feizhou[2] & SONG Xiaolan[2]
(1: *College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan* 430070, *P. R. China*)
(2: *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Science, Nanjing* 210008, *P. R. China*)

Abstract: Sediment resuspension is one of the important characteristics of hydrodynamic processes in shallow lakes. This experimental study was compared with the changes of zooplankton community in different levels of the resuspension to investigate the effect of sediment resuspension on zooplankton. The result shows significantly difference when using different treatments of concentrations of TSS and Chl. a. The cladoceran *Bosmina coregoni*, *Ceriodaphnia cornuta* and Rotifers are dominant in resuspended groups, but *Daphnia* sp. is dominant in no resuspended group. Resuspension produced an effect of deducing size of the composition of zooplankton communities. The abundances of *Daphnia carinata*, *Bosmina coregoni* and Rotifers are significant different in different resuspended levels, but *Ceriodaphnia cornuta* and Calanoidas show no significant different. The concentration of TSS is significant positive correlation with abundances of Rotifers and *Bosmina coregoni*, but significant and negative correlation with *Daphnia* sp. abundance, while there is none correlation with other populations. The research shows that the sediment resuspention is one of the important processes determining zooplankton community structure.
Keywords: Sediment resuspension; zooplankton; community structure; shallow lakes

由风浪导致的沉积物再悬浮是浅水湖泊的一个重要特征[1].沉积物再悬浮可直接或间接的对生态系统产生影响,如对水中透明度、营养盐释放或吸附产生影响[2],从而影响浮游植物[3-4].沉积物的再悬浮也会对湖泊中的浮游动物产生间接或直接的影响,包括干扰鱼类摄食[5]、悬浮物中一些碎屑和无机固体物质可以妨碍浮游动物对食物的摄取、或者稀释肠中的内容物从而减少对食物的吸收[6-7].Kirk 和 Gilbert[8]的研究表明悬浮的沉积物可以减少多种溞属(*Daphnia* sp.)和其它枝角类的摄食率、生长率和竞争能力.Hart[9]的研究认为,当悬浮的泥土或淤泥浓度 >50mg(DW)/L,就会显著减少溞属和网纹溞属(*Ceriodaphnia* sp.)种类

* 国家科技部支撑计划"应对太湖蓝藻水华的饮用水质保障应急技术研究与示范"项目资助.2010-01-04 收稿;2010-02-23 收修改稿.蒋伟伟,女,1984 年生,硕士研究生;E-mail:jww19840921@163.com.
** 通讯作者;E-mail:zliu@niglas.ac.cn.

对藻类的清除率,混浊度与溞属种类的清除率呈负相关关系[10].与枝角类相比,桡足类则能够通过选择性取食减少再悬浮的干扰[10-12].轮虫的摄食也比溞属有更多的选择性[13].因此,沉积物再悬浮有利于有选择性觅食能力的浮游动物(如桡足类和轮虫)的生存和发育,从而引起浮游动物群落结构的改变.

浮游动物在淡水生态系统中有着重要的作用,是生物操纵的关键因子之一.经典的生物操纵主要是通过调控食物链,减少滤食性鱼类的数量来增加浮游动物尤其是大型种类对藻类的牧食,从而控制水体中浮游藻类的密度,改善水质[14].但在浅水湖泊,除了滤食性鱼类对浮游动物的捕食影响,沉积物再悬浮对浮游动物的影响也很大.太湖平均水深2m,属于典型的浅水湖泊[15],而近年来太湖富营养化的生态修复已经成为研究热点.浮游动物在富营养化湖泊生态修复中有重要的作用,而了解沉积物再悬浮等浅水湖泊过程对浮游动物的影响,将有助于揭示浅水中浮游动物群落结构变化的机理,从而为浮游动物调控与富营养化湖泊修复提供依据.本研究通过春末夏初(5-6月)在太湖开展了小型模拟实验,在同样的外源营养盐输入条件下,研究了不同沉积物再悬浮程度对太湖浮游动物群落结构的影响,掌握沉积物再悬浮情况下浮游动物的变化规律与调控机理,以探索蓝藻水华治理方法,为太湖湖泊修复提供科学基础.

1 材料与方法

1.1 实验设计与采样方法

实验于2008年5月13日至6月30日(共47d)进行.取太湖表层底泥,混匀分装在9个250L的塑料桶中(上底直径60cm,下底直径45cm,高75cm),通过小型水泵的动力作用模拟三种不同程度的再悬浮(三个处理):(1)沉积物无再悬浮,即对照处理(C);(2)沉积物再悬浮程度较强(SR),每天扰动10h;(3)沉积物再悬浮程度较弱(WR),每天扰动5h.每个处理三个平行.用500目筛网滤除太湖水中的大型浮游动物,将湖水灌入桶内.加湖水后稳定12-16h.桶内安置小型潜水泵(8.5W)来模拟沉积物再悬浮.根据太湖外源营养盐负荷和常年平均N/P质量比为25,向桶内添加氮、磷营养盐(46.88mgN/L,1.88mgP/L)作为外源输入背景,氮采用硝酸钾(KNO_3),磷采用磷酸二氢钾(KH_2PO_4);之后每隔5d添加一次营养盐.实验期间每天用刷子刮除实验桶内壁生长的附着藻类,以去除附着藻的影响.

实验前采一次样为初始值,实验开始后每5d采一次样,采样时间为上午7:00,水泵每天上午8:00开始运行.现场测定光密度值.用长度50cm、直径6cm的有机玻璃柱状采水器取1L混合水样,分析总悬浮质浓度(TSS)、叶绿素a浓度和浮游藻类群落及数量;同时采集混合水样5-10L用浮游生物网过滤,用蒸馏水冲刷筛网上浮游动物并定容至50ml,用0.5ml福尔马林溶液固定后镜检.

1.2 统计分析方法

浮游动物计数与生物量换算参照《淡水浮游生物研究方法》[16].浮游植物鉴定参照《中国淡水藻类》[17].选择平均相对生物量或丰度超过1%的浮游动物种群进行单因素方差分析(one way ANOVA),因素为三个处理(C、WR、SR).分析中单因素方差分析(*Tukey's t*est多重比较法)及Spearman相关分析所用统计分析软件为SPSS.

2 结果

2.1 总悬浮质浓度及光密度变化

方差分析表明各处理间理化及浮游生物的初始条件差异不显著($P>0.05$).实验期间三个处理总悬浮物(TDS)浓度差异显著($P<0.001$),而且两两处理间的差异都显著(图1a).再悬浮程度越大,总悬浮物含量越高.强再悬浮、弱再悬浮和对照的总悬浮物浓度平均值分别为43、33、10mg/L.在水下20cm处测得的强再悬浮、弱再悬浮和对照组中光密度平均值分别为7098、8188、10524,分别是表面光密度的25%、35%和80%,与再悬浮程度趋势一致.

2.2 叶绿素a浓度及浮游植物群落变化

强再悬浮和弱再悬浮组中Chl.a浓度分别与对照组差异显著($P<0.001$,$P=0.003$),强再悬浮组与弱再悬组差异不显著($P=0.480$).再悬浮程度越大,Chl.a的浓度越高(图1b).不同处理浮游植物主要包括隐藻门(啮蚀隐藻 *Cryptomonas erosa* 和尖尾蓝隐藻 *Chroomonas acuta*)、硅藻门(颗粒直链硅藻 *Aulacoseira*

granulata、模糊直链藻 *Melosira ambigua*、小环藻 *Cyclotella* sp.、脆杆藻 *Fragilaria* sp.、舟形藻 *Navicula* sp.等）和绿藻门（空星藻 *Coelastrum* sp.、弓形藻 *Schroederia* sp.、新月藻 *Clostrium* sp.、卵囊藻 *Oocystis* sp.、小球藻 *Chlorella* sp.、衣藻 *Chlamydomonas* sp.、纤维藻 *Ankistrodesmus* sp.、丝藻 *Planctonema* sp.、栅藻 *Scenedesmus* spp.等）. 在强再悬浮与弱再悬浮过程中，隐藻门占优势，分别占浮游植物总生物量的 86.8% 和 56.3%，在第 33d 时达到最大值，生物量分别为 53.7 和 14.0mg/L. 在对照中绿藻门占优势，占浮游植物总生物量的 53.2%，在第 27d 达到最大值（1.4mg/L）（图 2）.

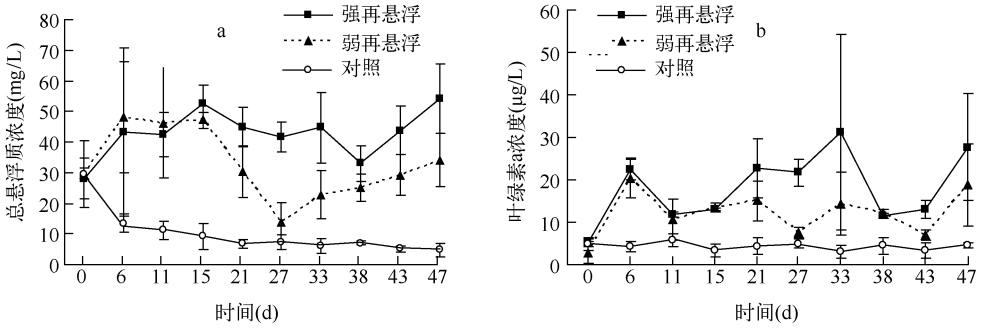


图 1 三个处理总悬浮物（a）和叶绿素 a（b）浓度随时间的变化（竖线代表标准差）

Fig. 1 Total suspended solids (a) and chlorophyll-a (b) concentrations among three treatments changed with time

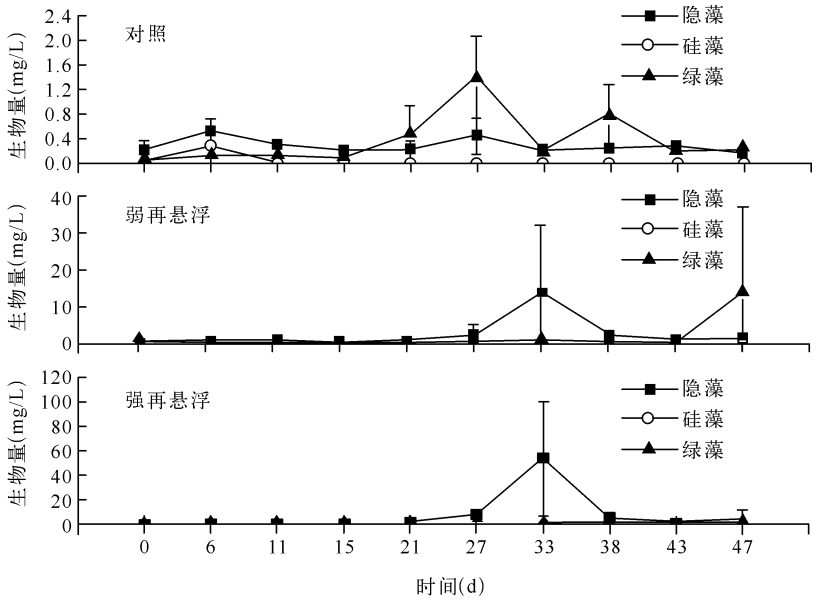


图 2 三个处理浮游植物生物量的变化

Fig. 2 Biomass of phytoplankton among three treatments changed with time

2.3 浮游动物群落结构的变化

浮游动物中枝角类出现四个种，分别为隆线溞（*Daphnia carinata*）、简弧象鼻溞（*Bosmina coregoni*）、角突网纹溞（*Ceriodaphnia cornuta*）和多刺裸腹溞（*Moina macrocopa*），其中前三个种占优势；轮虫为龟甲轮属（*Keratella* spp.）和臂尾轮属（*Brachionus* spp.），龟甲轮属占优势；桡足类主要种类为汤匙华哲水蚤（*Sinocalanus dorrii*）.

因实验刚开始时各处理组浮游动物群落组成及数量变化不明显，但随着实验进行，浮游动物群落结构变化显著，所以取实验最后 6 次采样的浮游动物数据进行分析. 在再悬浮组中，浮游动物各种类丰度随时间变化趋势是一样的. 枝角类先增多，后减少；轮虫逐渐增多；桡足类无明显变化. 在对照组中，枝角类丰度变

化最为明显,呈逐渐递减趋势,轮虫丰度低于再悬浮组(图3).

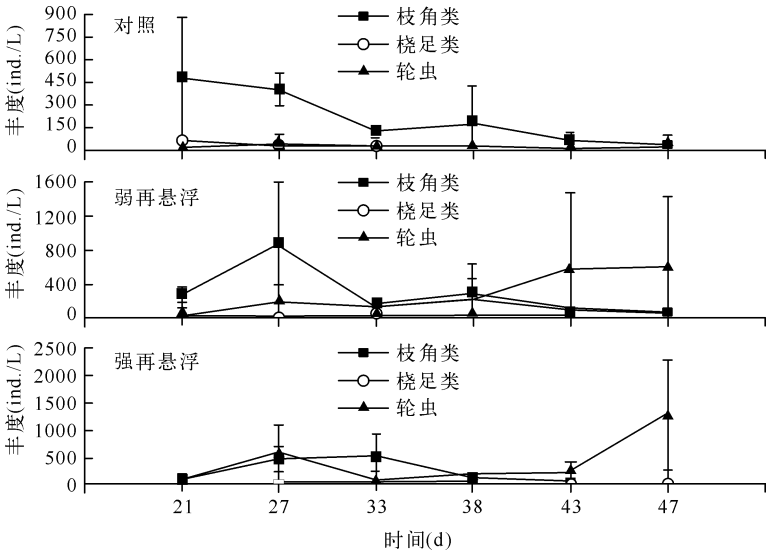


图3 从第21-47d不同处理中浮游动物丰度的变化

Fig. 3 Zooplankton abundance among treatments from the 21st to 47th day

通过单因素方差分析,轮虫丰度对于不同再悬浮处理的响应差异显著($P=0.046$),t-test进行两两分析,强再悬浮与对照差异显著($P=0.043$),强再悬浮与弱再悬浮、弱再悬浮与对照差异不显著($P=0.772$,0.183).桡足类对于不同悬浮处理差异不显著($P=0.880$).相关分析表明,TSS与轮虫丰度显著正相关(Pearson相关系数为0.609,$P=0.007$),与桡足类丰度相关性较弱.

在对照组中隆线溞为优势种;弱再悬浮中角突网纹溞为优势种,强再悬浮中简弧象鼻溞为优势种.可看出在对照组中大型枝角类占优势,而在再悬浮组中则是小型枝角类占优势(图4).

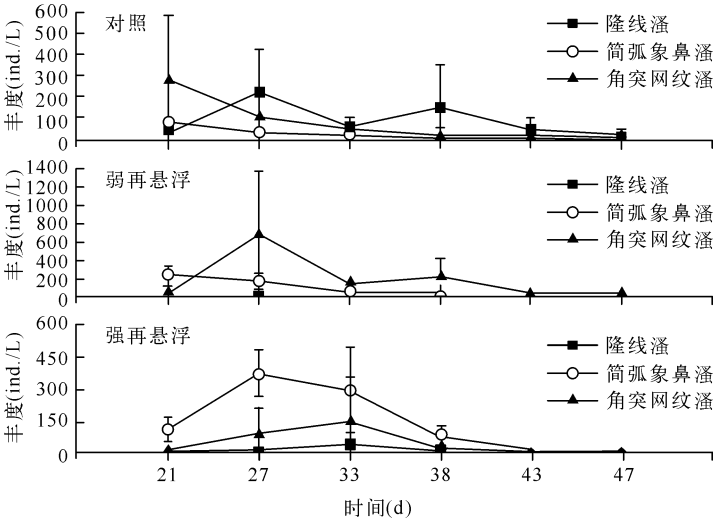


图4 从第21-47d不同处理中枝角类优势种的丰度

Fig. 4 Dominant cladoceran abundance among treatments from the 21st to 47th day

单因素方差分析,对于不同再悬浮处理隆线溞丰度差异显著($P=0.001$),其中强再悬浮与弱再悬浮分别与对照差异显著($P=0.005$,0.003).不同再悬浮处理下简弧象鼻溞丰度差异显著($P=0.009$),两两分

析，强再悬浮与对照差异显著（$P=0.007$）. 角突网纹溞的丰度对于不同处理无显著性差异（$P=0.110$）. 相关分析表明，TSS 与隆线溞丰度显著负相关（Pearson 相关系数为 -0.543，$P=0.020$），与简弧象鼻溞、角突网纹溞丰度相关性较弱. 浮游植物生物量与隆线溞丰度相关性较弱.

3 讨论

3.1 再悬浮对浮游植物的影响

沉积物再悬浮可通过改变光强、营养盐和浮游动物等来影响浮游植物，但浮游植物大量繁殖的主要原因是因为营养盐的变化. 沉积物再悬浮可使颗粒物进入上覆水体，同时把营养盐也带入上覆水体，使湖水中营养盐的浓度升高. 而营养盐的释放可使浮游植物大量繁殖，强再悬浮和弱再悬浮中浮游植物的生物量明显高于对照组，同样强再悬浮和弱再悬浮中 Chl. a 的浓度也显著高于对照组（图 2）. 同时再悬浮可降低浮游植物的沉降速率，所以沉积物再悬浮可间接或直接的影响浮游植物.

3.2 再悬浮对浮游动物群落结构的影响

沉积物再悬浮使浮游动物种群趋于小型化，从大型的溞属（枝角类）占优势变为小型浮游动物（轮虫、象鼻溞和网纹溞）占优势. 对桡足类影响不大.

3.2.1 *再悬浮对枝角类的影响* 隆线溞丰度在对照中明显高于再悬浮组，沉积物再悬浮对隆线溞的影响可能与浮游植物和悬浮物变化有关（图 4）. 藻类中栅列藻、直链硅藻、隐藻、裸藻均为溞属较为普遍的食物[18]. 虽然对照组中隆线溞与浮游植物生物量的变化趋势相似，均在第 27d 和 38d 时出现最大值（图 2，图 4），但经过相关分析，浮游植物生物量与隆线溞丰度相关关系较弱，TSS 与隆线溞显著负相关. 一些研究也证明混浊度与溞属和其它枝角类的丰度呈负相关[19]. 所以隆线溞丰度在对照中高于再悬浮组主要与悬浮物有关. 实验室[11]和野外[9,11]的一些研究发现混浊的水体对水生生物有害. 根据 Levine 等[10]对 Waihola 湖的研究，把沉积物的混浊度从 2 NTU（Nephelometric Turbidity Unit）提高到 10 NTU，使溞属对浮游植物、异养鞭毛虫和纤毛虫的清除率减少了 72% - 100%，而对变形虫和细菌的清除率减少了 21% - 44%. 如果在高混浊度时，清除率就进一步降低. 他们认为混浊度对于溞属的摄食是一个重要的影响因素. 所以沉积物浓度越高即再悬浮程度越大，对于溞属的摄食影响也越大. 底泥进入溞属的肠子后降低对食物的有效吸收[6-7]，且可以使浮游动物体重增加[20]. 因此部分能量用来对抗增加的下沉率. 低的食物吸收率和沉积物对外壳的磨损使得溞属呼吸所需要的能量增加[21]，可能导致溞属的状况不佳，降低怀卵率和存活率[7].

在再悬浮组中，枝角类主要是简弧象鼻溞和角突网纹溞. 方差分析简弧象鼻溞对于不同处理差异显著，而角突网纹溞差异不显著.

从以上分析可以看出，浮游动物枝角类的变化主要是由于不同再悬浮处理产生的. 而且趋势是从比较大型的枝角类溞属向小型枝角类（象鼻溞和网纹溞）演替的.

3.2.2 *再悬浮对桡足类的影响* 实验过程中桡足类丰度稳定，不同再悬浮处理对于桡足类丰度差异不显著，TSS 与桡足类无显著相关性. 同样 Levine 等[10]研究发现贝克蚤在沉积物中也消耗一部分的能量摄食，当浊度从 2.2NTU 上升到 5 - 15NTU 时它的清除率只降低 3% - 8%. 桡足类的镖水蚤、枝角类的短尾秀体溞和裸腹溞比起其它甲壳类浮游动物能够更好的适应混浊环境[9]. 桡足类也属于大型浮游动物，但沉积物再悬浮对桡足类的摄食影响却不大，主要因为桡足类的运动速度比较快，具有选择性摄食能力，可减少再悬浮的影响[12]. 因此，桡足类不会因为沉积物再悬浮而发生很大的变化，再悬浮对桡足类的影响不如溞属明显.

3.2.3 *再悬浮对轮虫的影响* 实验结果表明轮虫的丰度在再悬浮组中明显高于对照组，而且与总悬浮物浓度显著正相关，对于不同再悬浮处理的响应显著. 国外也有相应的研究，Kirk&Gilbert[8]提出轮虫在混浊水体中要比溞属更有优势，在沉积物再悬浮的自然生态环境中，像混浊的湖泊和水库，轮虫比枝角类更加适合环境，有更多的选择性[13]，因为轮虫的选择性摄食能够摄食藻类而不是泥土[5]. 所以轮虫对于沉积物再悬浮环境有较强的适应能力，使竞争优势从枝角类转向轮虫，从而影响到浮游动物的群落结构.

浮游动物之间的相互关系对其群落组成也有一定影响. 轮虫、枝角类和桡足类都可摄食 5 - 20μm 的颗粒，它们之间会产生食物竞争，而浮游动物之间也会产生捕食压力. 枝角类（如透明薄皮溞）个体较大，可摄食桡足类和轮虫；桡足类会选择个体小的轮虫，而对枝角类的密度影响不大；近邻剑水溞成体捕食轮虫、象

鼻溞、溞类、桡足幼体和无节幼体等[22].但在湖水再悬浮情况下,浮游动物群落结构的变化主要是底泥再悬浮造成的,而浮游动物之间的相互影响较小.

4 结论

浮游动物群落结构的变化主要是由于不同再悬浮处理产生的,而且趋势是从比较大型的枝角类溞属向小型浮游动物(轮虫、象鼻溞和网纹溞)演替.因为沉积物再悬浮对于不同种类浮游动物的影响不同,所以,沉积物再悬浮是决定浮游动物群落结构的重要因子之一.在沉积物再悬浮剧烈的湖泊,即使降低了食浮游动物鱼类的数量,大型枝角类可能还是难以恢复.因此,在应用以食物网调控为主要手段进行湖泊生态修复时,除了考虑鱼类对浮游动物的控制作用时,也必须考虑沉积物再悬浮的影响.

5 参考文献

[1] Hamilton DP, Mitchell SF. Wave-induced shear stresses, plant nutrients and chlorophyll in seven shallow lakes. *Freshwater Biology*, 1997, **38**(1): 159-168.

[2] Ogilvie BG, Mitchell SF. Does sediment resuspension have persistent effects on phytoplankton? Experimental studies in three shallow lakes. *Freshwater Biology*, 1998, **40**(1): 51-63.

[3] Lind OT, Doyle R, Vodopich DS *et al*. Clay turbidity: regulation of phytoplankton production in a large, nutrient rich tropical lake. *Limnology and Oceanography*, 1992, **37**(3): 549-565.

[4] Lind OT. Suspended clay's effect on lake and reservoir limnology. *Archiv für Hydrobiologie Supplement*, 2003, **139**(3): 327-360.

[5] Kirk KL. Suspended clay reduces *Daphnia* feeding rate: behavioural mechanisms. *Freshwater Biology*, 1991, **25**(2): 357-366.

[6] Arruda JA, Marzolf GR, Faulk RT. The role of suspended sediments in the nutrition of zooplankton in turbid reservoirs. *Ecology*, 1983, **64**(5): 1225-1235.

[7] McCabe GD, O'Brien WJ. The effects of suspended silt on feeding and reproduction of *Daphnia pulex*. *American Midland Naturalist*, 1983, **110**: 324-337.

[8] Kirk KL, Gilbert JJ. Suspended clay and the population dynamics of planktonic rotifers and cladocerans. *Ecology*, 1990, **71**(5): 1741-1755.

[9] Hart RC. Zooplankton feeding rates in relation to suspended sediment content: potential influences on community structure in a turbid reservoir. *Freshwater Biology*, 1988, **19**(1): 123-139.

[10] Levine SN, Zehrer RF, Burns CW. Impact of resuspended sediment on zooplankton feeding in Lake Waihola, New Zealand. *Freshwater Biology*, 2005, **50**: 1515-1536.

[11] Gardner MB. Effects of turbidity on feeding rates and selectivity of bluegills. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1981, **110**(3): 446-450.

[12] Thorpe JH, Covich AP. Ecology and classification of north American freshwater invertebrates. In: Williamson CE, Reid JW eds. Copepoda. San Diego CA: Academic Press, 2001: 915-954.

[13] Pourriot R. Food and feeding habits of Rotifers. *Archiv für Hydrobiologie, Beihefte Ergebnisse der Limnologie*, 1977, **8**: 243-260.

[14] Perrow MR, Meijer ML, Dawidowicz P *et al*. Biomanipulation in shallow lake: state of the art. *Hydrobiologia*, 1997, **342/343**: 355-356.

[15] 张 路,范成新,秦伯强等.模拟扰动条件下太湖表层沉积物磷行为的研究.湖泊科学,2001,**13**(1):35-42.

[16] 章宗涉,黄翔飞.淡水浮游生物研究方法.北京:科学出版社,1991.

[17] 胡鸿钧,李尧英,魏印心等.中国淡水藻类.上海:上海科学技术出版社,1980.

[18] 陈伟民,秦伯强,许秋瑾.模拟水动力对湖泊浮游动物群落演替的实验研究.海洋科学集刊,2002,**44**:43-51.

[19] Hart RC. Population dynamics and production of five crustacean zooplanktons in a subtropical reservoir during years of contrasting turbidity. *Freshwater Biology*, 1987, **18**(2): 287-318.

[20] Zurek R. Effect of suspended materials on zooplankton, 2. Laboratory investigations of *Daphnia hyalina* Leydig. *Acta Hydrobiologia*, 1982, **24**: 233-251.

[21] Löffler H. Neusiedlersee: the limnology of a shallow lake in central Europe: Monographiae Biologicae 37. In: Illies J ed. The zooplankton of the open lake. The Hague-Boston-London: Dr. W. Junk Publ. 1979: 281-335.

[22] 杨宇峰,黄翔飞.浮游动物生态学研究进展.湖泊科学,2000,**12**(1):81-89.