

苏玉萍 李艳芳 钟厚璋 等. 2012. 山仔水库沉积物蓝藻复苏试验研究[J]. 环境科学学报, 32(2): 341-348

Su Y P ,Li Y F ,Zhong H Z , et al. 2012. Recruitment of cyanobacteria from sediment of the Shanzai Reservoir[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 32(2): 341-348

## 山仔水库沉积物蓝藻复苏试验研究

苏玉萍<sup>1,2</sup> 李艳芳<sup>1</sup> 钟厚璋<sup>1</sup> 林慧<sup>1</sup> 汪婷<sup>1</sup> 游雪静<sup>1</sup>

1. 福建师范大学环境科学与工程学院 福州 350007

2. 厦门大学近海与海洋环境国家重点实验室 厦门 361005

收稿日期: 2011-06-06

修回日期: 2011-09-22

录用日期: 2011-09-29

**摘要:** 采用正交试验考察了温度、光照、营养盐和物理扰动 4 个因素对山仔水库冬季沉积物中蓝藻复苏的影响,每个因素设置两个水平,培养周期为 6 d,并以蓝藻复生量为考察指标。结果表明,温度和光照为蓝藻复苏的主要影响因子,上覆水体的营养盐、物理扰动对沉积物中蓝藻门复苏的影响作用不显著,不同的蓝藻种属对温度和光照条件的响应程度不完全一致,蓝藻门微囊藻属(*Microcystis*)对温度和光照的复苏响应显著,颤藻属(*Oscillatoria*)仅对温度的复苏响应显著。同时,通过设置 6.0~16.0 °C 之间 6 个温度梯度及 50 和 2000 lx 两个光照梯度,进行了沉积物柱状样复苏模拟实验。结果显示,山仔水库冬季沉积物微囊藻属和颤藻属在 10 °C 左右开始复苏,微囊藻属对光的敏感性使其更容易处于优势地位。

**关键词:** 沉积物; 微囊藻属; 颤藻属; 复苏; 温度; 光照

文章编号: 0253-2468(2012)02-341-08

中图分类号: X171

文献标识码: A

## Recruitment of cyanobacteria from sediment of the Shanzai Reservoir

SU Yuping<sup>1,2</sup> ,LI Yanfang<sup>1</sup> ,ZHONG Houzhang<sup>1</sup> ,LIN Hui<sup>1</sup> ,WANG Ting<sup>1</sup> ,YOU Xuejing<sup>1</sup>

1. Environmental Science and Engineering College of Fujian Normal University ,Fuzhou 350007

2. State Key Laboratory of Marine Environmental Science ,Xiamen University ,Xiamen 361005

Received 6 June 2011;

received in revised form 22 September 2011;

accepted 29 September 2011

**Abstract:** The effects of four environmental factors ,including temperature ,light ,nutrient and physical disturbance ,on the cyanobacteria recruitment from the winter sediment in the eutrophic Shanzai Reservoir were investigated using an orthogonal experiment. Two levels were designed for each factor and the experiments lasted for six days. The results showed that temperature and light were the most important for the recruitment of *Microcystis* and *Oscillatoria*. Increasing temperature would promote the recruitment of *Microcystis* and *Oscillatoria* which would make the cyanobacteria to dominate. The effects of the overlying water nutrient status and the physical disturbance on the recruitment of *Microcystis* and *Oscillatoria* from sediments were not obvious. Based on the results ,different temperatures and light intensities were designed in the simulation experiment. The incubation temperatures were increased from 6.0 to 16.0 °C with six levels while each temperature level was kept for four days under 2000 and 50 lx light intensities ,respectively. Recruitment was calculated by the diminution of benthic cyanobacteria abundance ,and moreover ,by the increase of cyanobacteria abundance in the water column. It is shown that the recruitment of *Microcystis* and *Oscillatoria* started at about 10 °C. It was also demonstrated that the migration of *Microcystis* from the sediments was more pronounced at higher light intensity (2000 lx) than in dark (50 lx) treatments.

**Keywords:** sediment; *Microcystis*; *Oscillatoria*; recruitment; temperature; light

### 1 引言( Introduction)

我国是人均水资源较为短缺的国家之一,不少城市的供水越来越依赖于水库供水(韩博平,

2010)。随着全球经济的快速增长和人类开发活动的加剧,大量营养物通过工业、农业和生活污水输入到水库中,导致水库水质明显下降,近 10 年来我国约有 1/3 的重要供水水库达到富营养化水平(韩

基金项目: 国家自然科学基金项目( No. 41101060);福建省自然科学基金( No. 2010J01250);福建省教育厅科学研究基金( No. JA10085);厦门大学近海与海洋环境国家重点实验室青年学者访问基金项目( No. MELRS1103)

Supported by the National Natural Science Foundation of China ( No. 41101060) ,the Natural Science Foundation of Fujian Province ( No. 2010J01250) ,the Research Foundation of Education Bureau of Fujian Province ( No. JA10085) and the Youth Visitor Foundation from the State Key Laboratory of Marine Environmental Science ,Xiamen University ( No. MELRS1103)

作者简介: 苏玉萍(1972—)女,副教授(博士),E-mail: ypsu@fjnu.edu.cn; \* 通讯作者(责任作者)

Biography: SU Yuping(1972—) female ,associate professor ( Ph. D. ) ,E-mail: ypsu@fjnu.edu.cn; \* Corresponding author

博平, 2010). 当前越来越多的水体富营养化问题通过蓝藻“水华”暴露出来, 特别是作为饮用水源的水库, 产毒素藻类如蓝藻门中微囊藻 (*Microcystis*) 的暴发直接威胁到人们的饮水安全.

目前, 人们对蓝藻水华的形成机理还处在深入探索阶段. 孔繁翔等 (2005) 提出蓝藻生长和水华的形成分为相互区别而又连续的 4 个过程, 即下沉和越冬 (休眠)、复苏、生物量增加、上浮聚集并形成水华, 并认为影响每个阶段的主导因子不同. 在不适宜生长的条件下蓝藻可以在沉积物表层积累, 环境条件适宜时便从底部上升到水体中, 这便是所谓的“复苏”现象. 藻类在春季复苏是水体中藻类重新生长的起点, 为蓝藻水华贡献了重要的“种源”. 模拟实验显示, 如果不考虑底泥中微囊藻的贡献, 夏季的微囊藻水华会减少 50% (孔繁翔等, 2010). 诸多研究表明, 蓝藻的复苏与温度、光照、营养盐、溶解氧、物理及生物扰动等因素有着密切的联系 (Katja *et al.*, 2010; Verspagen *et al.*, 2004; Brunberg *et al.*, 2002; 李阔宇等, 2004). Reynolds 等 (1976) 研究发现, 当野外深水湖泊水体的温度达到 7~8 °C 时, 沉积物中微囊藻群体便开始缓慢的生长; 当温度达到 15 °C 时, 微囊藻群体生长速率逐步增大, 并上浮至水体中; 李阔宇、陶益等的研究也表明, 高温有利于蓝藻复苏, 在低光照沉积物环境下, 蓝藻休眠体虽然仍保持着光合作用, 但休眠细胞的光化学效率与电子转移速率处于较低水平 (李阔宇等, 2004; 陶益等, 2005); Tsujimura 等 (2000) 研究认为, 光照可以刺激沉积物中微囊藻群体的生长. 蓝藻休眠复苏的生存策略不仅会影响水体中蓝藻的种群变动, 也为其后的生长、繁殖提供了潜在的“种源”. 迄今为止, 对于

蓝藻水华, 人们主要是在水华暴发之后采取一系列的急救措施, 但未从根源上解决问题. 在条件适宜时, 其“种源”依旧会再次迅速繁殖并形成水华.

近年来, 福建省主要饮用水源地水库均呈现不同程度的富营养化趋势, 在春末、夏季和秋初常发生以蓝藻门水华微囊藻 (*Microcystis* sp.) 为优势种属的水华, 严重影响了水质安全 (苏玉萍等, 2006; 王菲凤等, 2011). 目前的研究主要关注蓝藻水华特征及暴发后的应急控制措施, 对于这样一个平均水深 25~30 m, 丰水期坝前断面可以达到 60~70 m 的富营养化深水库, 是否在沉积物中存在蓝藻门的“种源”? 如果存在蓝藻门的“种源”, 其是在何种条件下以何种方式挣脱出沉积物上浮, 并在短时间内通过长距离的迁移到达水体上层, 最终发生水华? 休眠期保存的这些“种源”复苏之后对水体中浮游种群是否有贡献, 贡献有多大? 这些问题均需明确. 基于此, 本研究通过采集山仔水库冬季沉积物进行正交试验, 探究环境因子对山仔水库沉积物中蓝藻复苏的影响, 确定影响沉积物中蓝藻复苏的关键因子. 同时通过柱状样复苏模拟实验, 探究关键因子的影响阈值, 以揭示山仔水库水华的发生机理, 预警水华的发生, 进而采取有针对性的“源头”控制措施, 为合理的水源地水资源管理目标提供科学的依据.

## 2 实验方法 (Experiment methods)

### 2.1 研究对象概况

山仔水库位于福建省敖江流域福州市连江县境内, 其地理位置如图 1 所示. 水库中心的地理坐标是北纬 26°17′51″, 东经 119°21′35″. 该水库于

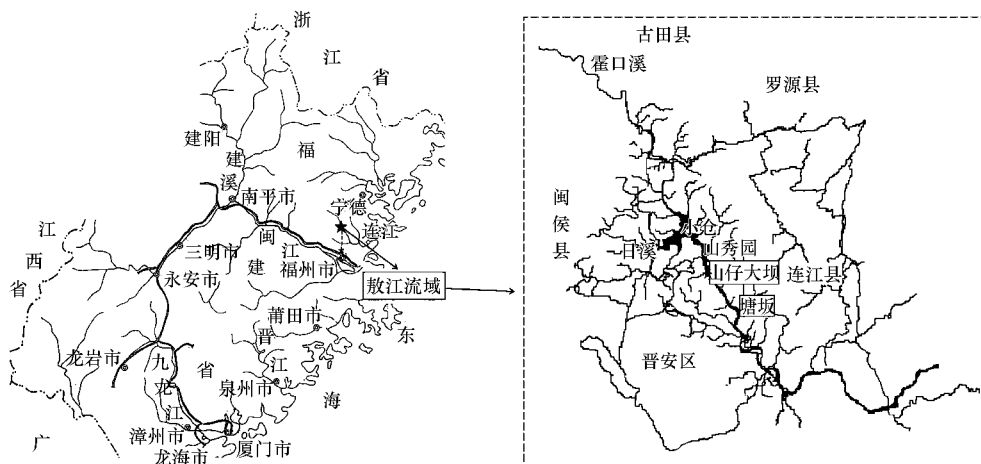


图 1 山仔水库地理位置图

Fig. 1 The location of Shanzai Reservoir

1994年11月蓄水发电,水库调节库容1.06亿 $\text{m}^3$ ,水面面积6.639 $\text{km}^2$ ,平均水深25~30 m,坝头最深处约50 m,上游集水面积1646 $\text{km}^2$ ,多年平均径流量18.57亿 $\text{m}^3$ ,是一座具有灌溉、发电、供水和防洪等综合利用功能的水利枢纽工程。但从2001年以来,水库每年春末、夏季、秋初常常爆发蓝藻水华,虽然通过搬迁上游各类工、农业污染源,加强流域的综合治理等措施,水质得到了一定的改善,但目前仍处于富营养化状态(周亮进等 2008)。

## 2.2 样品采集与处理

2010年11月21日在便携式全球定位系统(GPS)导航下,于山仔水库大坝断面(26°20'22"N, 119°19'48"E)(图1中★位置)进行采样。利用奥地利进口不锈钢柱状采泥器采集10管柱状沉积物,其中2管用于沉积物中微藻的定性与定量分析:现场将每管沉积物分5层切割,分别为0~1 cm、1~3 cm、3~5 cm、5~7 cm、7~9 cm,并分别保存于密封袋中。另2管用于正交试验:现场将沉积物柱样的0~5 cm表层切割后并分别保存于密封袋中;其余6管用于沉积物柱状样原位复苏模拟:现场将各柱状样0~10 cm表层切割后装入到自制的复苏装置(底面直径6 cm,高25 cm的有机玻璃管)中。将所有底泥样品贴好标签,带回实验室后置于冰箱中4℃保存。现场同步采集水库沉积物上层0~20 cm上覆水,回实验室后,立即经0.45 $\mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤,并将抽滤的水样置于4℃冰箱保存。

## 2.3 正交试验

2.3.1 正交试验条件设置 本实验主要考虑了不同水平的温度、光照、营养盐与物理扰动4种影响因素对蓝藻复苏的影响,每个因素设置2个水平,采用 $L_8(2^7)$ 正交设计,实验方案选取了4因素2水平的 $L_8(2^4)$ 正交表。具体各因素条件设置如下。①温度:山仔水库不同季节沉积物上覆水的温度变化范围为7~15℃,本实验设计既要使温度在此范围,又要便于观察,因此,设置了10℃与20℃两个水平。②光照:微光照与光照条件。微光照条件即将模拟柱用牛皮纸遮住,上端开口用纱布包裹(50 lx);光照条件为2000 lx,光暗比为12 h:12 h。③营养盐:分别采用经0.45 $\mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤后的水库底层原水及BG11蓝绿藻选择性培养基,BG11培养基采用中科院水生生物研究所淡水藻种库培养基配方(<http://algae.ihb.ac.cn/MediumShow>)。④物理扰动:不扰动即静置培养;扰动为每天分早、中、晚3

次,利用摇床扰动0.5 h(60 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )。将采集切割的两根柱状沉积物样品充分混匀后,分别称取15 g注入到自制的柱状玻璃管模拟装置中,按表1中各因素加入25 mL原水或BG11培养液到相应的实验组中,每组实验设置3个平行样,放入PGX-350B(上海福玛)和PGX-160C智能生化培养箱(上海福玛)中进行培养。

2.3.2 复苏微藻的定性和定量分析 6 d后,将上覆水移出,同时补加25 mL的培养液继续培养6 d。微藻的种属鉴定是在福建师范大学生命科学学院浮游生物分类老师的指导下,使用生物显微镜(Motic, BM-1000, 广州),依据《淡水浮游生物研究方法》图谱进行种属鉴定。上覆水加入适量Lugols碘液(15 $\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$ )浓缩至5 mL,使用0.1 mL计数框(规格为20 mm $\times$ 20 mm)镜检计数(章宗涉等, 1991),最后再换算为单位面积沉积物中的微藻数量( $\text{cells}\cdot\text{cm}^{-2}$ )。每个水样镜检3次,取平均值计算复苏微藻的细胞量。

## 2.4 沉积物柱状样复苏模拟

2.4.1 实验条件设置 通过正交试验探究得出温度和光照是沉积物蓝藻复苏的关键影响因子,因此,设置了6个温度梯度与2个光照梯度进行复苏实验,设定4 d为培养周期。其中,微光照条件即将模拟柱用牛皮纸遮住,上端开口用纱布包裹(50 lx);光照条件为2000 lx,光暗比为12 h:12 h。实验的温度梯度设置为6、8、10、12、14、16℃。

2.4.2 实验方法 分别将抽滤后的上覆水沿着玻璃棒缓缓加入到6个自制的复苏模拟柱状器中,每个注入200 mL。将6个复苏柱状装置分为两组,一组微光,一组光照,每组3个平行样。之后同时置于PGX-160C智能生化培养箱(上海福玛)中开始实验。按照实验设置的温度梯度均连续培养4 d。在每一实验温度周期结束时,分别将各培养装置中的200 mL上覆水虹吸出,使用Lugols碘液固定(15 $\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$ ),并用0.1 mL的计数框进行视野法计数,观察微藻的形态和大小,取3个平行样的平均值来计算单位面积沉积物复苏的蓝藻细胞数量( $\text{cells}\cdot\text{cm}^{-2}$ )。

2.4.3 沉积物微藻定性和定量分析 分别从0~1 cm、1~3 cm、3~5 cm、5~7 cm、7~9 cm切割分层中称取1 g新鲜沉积物样品,置于干净的小烧杯中,加100 mL蒸馏水充分搅匀,静置1 min后取上层液体30 mL于标记好的试剂瓶中,加入适量Lugols碘

液(15 mL·L<sup>-1</sup>)和甲醛溶液(最终浓度4%,V/V)进行固定,并在细胞计数测定前4℃避光保存.沉积物柱状样复苏模拟实验结束后,将复苏装置中的沉积物分5层进行切割,分别是0~1 cm、1~3 cm、3~5 cm、5~7 cm、7~9 cm,切割完的样品分别保存于密封袋中,用于沉积物微藻的定性与定量分析.

微藻的种属鉴定同样是在福建师范大学生命科学学院浮游生物分类老师的指导下,使用生物显微镜(Motic, BM-1000)依据《淡水浮游生物研究方法》图谱进行种属鉴定,固定液中微藻的计算公式如公式(1)所示(章宗涉等,1991),最后再换算为单位面积沉积物中的微藻数量(cells·cm<sup>-2</sup>).

$$N = \left( \frac{A}{A_0} \times \frac{1}{V} \right) \times n \quad (1)$$

式中  $N$  为每毫升固定液中微藻数量(cells·mL<sup>-1</sup>),

$A$  为计数框的面积(mm<sup>2</sup>),  $A_0$  为计数面积(mm<sup>2</sup>),即视野数×视野面积,  $V$  为计数框体积(mL),  $n$  为视野内镜检的微藻数目.

### 3 实验结果(Experiment results)

#### 3.1 正交试验

3.1.1 蓝藻试验结果 沉积物中蓝藻门复苏的种属主要有微囊藻属与颤藻属.本次试验比较分析了微囊藻与颤藻两种不同的蓝藻,表1试验结果表明,影响沉积物中微囊藻复苏的环境因素主次顺序是:温度>光照>物理扰动>营养盐;与微囊藻相比,影响沉积物中颤藻复苏的环境因素主次顺序是:温度>光照>营养盐>物理扰动.

表1 沉积物微囊藻属与颤藻属复苏正交试验结果

Table 1 Orthogonal experiment result of *Microcystis* and *Oscillatoria* recruitment from the sediment

试验号	温度(A) /°C	光照(B) /lx	物理扰动(C)	营养盐(D)	空列	实验结果/(cells·cm <sup>-2</sup> )	
						微囊藻属	颤藻属
1	10	50	无扰动	原水	1	252 ± 15	252 ± 10
2	10	50	无扰动	BG11	2	1007 ± 50	168 ± 8
3	10	2000	扰动	原水	1	2768 ± 138	252 ± 12
4	10	2000	扰动	BG11	2	1258 ± 58	662 ± 35
5	20	50	扰动	原水	2	2013 ± 101	1258 ± 50
6	20	50	扰动	BG11	1	4529 ± 182	1258 ± 65
7	20	2000	无扰动	原水	2	9934 ± 397	1325 ± 68
8	20	2000	无扰动	BG11	1	7285 ± 219	1987 ± 97
$K_1$ (微囊藻属)	5284	7801	18478	14967	14834		
$K_1$ (颤藻属)	1334	2936	3731	3086	3749		
$K_2$ (微囊藻属)	23762	21246	10569	14079	14212		
$K_2$ (颤藻属)	5828	4225	3430	4075	3413		
$k_1$ (微囊藻属)	1321	1950	4619	3742	3709		
$k_1$ (颤藻属)	333	734	933	772	937		
$k_2$ (微囊藻属)	5941	5311	2642	3520	3553		
$k_2$ (颤藻属)	1457	1056	858	1019	853		
极差 $R$ (微囊藻属)	4619	3361	1977	222	156		
极差 $R$ (颤藻属)	1123	322	75	247	84		
因素主次(微囊藻属)			A > B > C > D				
因素主次(颤藻属)			A > B > D > C				
优水平(微囊藻属)	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>			
优水平(颤藻属)	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	-	D <sub>2</sub>			
优组合(微囊藻属)			A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub>				
优组合(颤藻属)			A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> D <sub>2</sub>				

注:  $K_{im}$  为第  $i$  列因素第  $m$  水平所对应的试验指标和  $k_i$  为  $K_{im}$  平均值.

3.1.2 影响因素显著性检验 根据以上计算,列出方差分析表,对本次正交试验各因素进行方差分析,结果见表2.方差分析结果显示,温度和光照对沉积物微囊藻复苏影响显著,但物理扰动与营养盐

对其影响并不显著,这与极差分析显示的因素主次顺序结果一致;与微囊藻相比,温度对沉积物中颤藻复苏的影响更显著,而光照、物理扰动、营养盐对颤藻复苏影响不显著.

表 2 沉积物微囊藻属和颤藻属复苏方差分析  
Table 2 ANOVA table of *Microcystis* and *Oscillatoria*

蓝藻	变异来源	SS( × 10 <sup>4</sup> )	df	MS( × 10 <sup>4</sup> )	F	F <sub>α</sub>	显著水平
微囊藻属	A	4152.4	1	4152.4	435.2	F <sub>0.05</sub> (1,1) = 161.4	*
	B	2175.86	1	2175.86	228	F <sub>0.01</sub> (1,1) = 4052	*
	C	832.5	1	832.5	87.3		
	D	16.23	1	16.23	1.7		
	误差 e	9.54	1	9.54			
颤藻属	A	252.43	1	252.43	198.59	F <sub>0.05</sub> (1,2) = 18.51	**
	B	20.77	1	20.77	16.34	F <sub>0.01</sub> (1,2) = 98.50	
	C	1.13	1	1.13			
	D	12.23	1	12.23	9.62		
	误差 e	1.41	1	1.41			
	误差 e <sub>Δ</sub>	2.54	2	1.27			

注: SS 为离差平方和, df 为自由度, MS 为均方; \* 表示显著相关, \*\* 表示极显著相关; 修正误差 e<sub>Δ</sub> 为误差 e 与因素 C 离差平方和之和。

### 3.2 沉积物柱状样复苏模拟实验

3.2.1 蓝藻对温度和光照的复苏响应 从实验室复苏模拟实验中发现,山仔水库沉积物中多种藻类的休眠体都能复苏和上浮到水体中,包括蓝藻、绿藻、硅藻等。沉积物中的绿藻门、硅藻门在 8 °C 时已经明显复苏,蓝藻门从 8 °C 时开始有复苏的迹象,蓝藻门的复苏滞后于绿藻门和硅藻门,10 °C 左右开始明显复苏,而绿藻门和硅藻门的数量迅速减少,高温和光照条件有利于蓝藻复苏。沉积物中蓝藻门复苏的种属主要有微囊藻属和颤藻属,且微囊藻属占

优势。10 °C 时,光照和微光照条件下微囊藻复苏的细胞数目无差别,但温度高于 10 °C 后,细胞复苏量在光照条件下比在微光照条件下增长得快。高温和光照共同促进着沉积物中微囊藻的复苏,微囊藻属对光的敏感性,使其更容易处于优势地位(图 2a)。颤藻属在 8 °C 左右有复苏迹象,10 °C 后明显复苏,但光照和微光照条件下的复苏量差别始终不大,也说明了光照对沉积物中颤藻属的复苏影响不大(图 2b)。

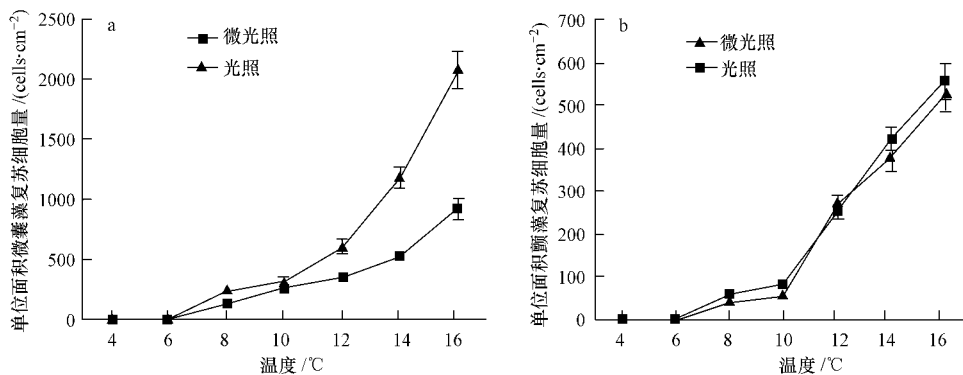


图 2 冬季沉积物中微囊藻(a)和颤藻(b)在不同温度和光照下复苏模拟结果

Fig. 2 *Microcystis* (a) and *Oscillatoria* (b) abundance recruited from sediment in winter under exposure to a temperature gradient under light and dark conditions

3.2.2 复苏模拟实验前后沉积物中的微藻比较 冬季水温开始降低,光照逐渐减弱,此时环境条件不利于蓝藻存活,蓝藻为了度过恶劣环境,便下沉到底部沉积物表层通过“休眠”进行越冬(吴晓东等,2008)。这可能是冬季沉积物表层(0~1 cm)藻类数量较多的原因。从复苏后垂向沉积物镜检结果

来看(图 3) 在光照条件下,蓝藻数量下降的趋势比较明显,约为 65.4%,硅藻减少约 11.2%;在避光条件下,蓝藻减少的数量大约为 32.6%,而硅藻减少数量比光照条件下多,约为 31.2%,绿藻数量变化情况不明显。总体上看,表层(0~1 cm)微藻数量减少的较多,底层藻数量保持比较平衡,说明沉积物

表层藻类较易复苏上浮到水体中. 沉积物中其他种类微藻与蓝藻的种间竞争也影响着蓝藻的复苏.

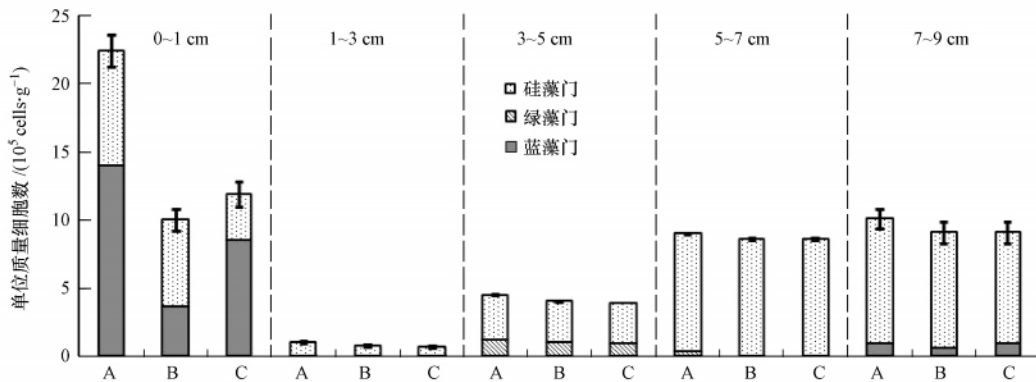


图3 冬季沉积物模拟复苏前后镜检分析(A. 复苏前, B. 复苏后(光照), C. 复苏后(微光照))

Fig. 3 Microscopic analysis of the winter sediment before and after simulative recruitment (a. before recruitment, b. after recruitment (2000 lx), c. after recruitment (50 lx))

#### 4 讨论 (Discussion)

本研究结果显示,山仔水库沉积物中多种藻类的休眠体都能复苏和上浮到水体中,包括蓝藻、绿藻、硅藻等. 蓝藻门的复苏滞后于绿藻门和硅藻门, 10 °C左右开始逐渐成为优势藻类,沉积物中其他种类的微藻与蓝藻的种间竞争影响着蓝藻的复苏.

沉积物中复苏的蓝藻门种属主要有微囊藻属与颤藻属,温度是影响沉积物中蓝藻复苏的主要因子,光照次之,而物理扰动和营养盐则对沉积物中蓝藻复苏影响作用不显著. 高温和光照更有利于沉积物中微囊藻属的复苏,对于颤藻属而言,温度是影响其复苏的主要因子,其余3个因子的影响作用不显著. 微囊藻属对光的敏感性使其更容易处于优势地位,微囊藻属与颤藻属之间除了竞争关系是否还有其他关系,有待进一步深入研究. 本研究得出的结果是基于将沉积物上覆水经 0.45 μm 微孔滤膜过滤,暂时不考虑水体底层生物对蓝藻复苏的影响,所以,野外冬季沉积物蓝藻实际复苏的温度阈值可能高于 10 °C.

温度成为影响沉积物中蓝藻复苏的重要因素可能是通过影响蓝藻的浮力和垂直迁移能力而实现的. 研究表明,温度低于一定水平时,微囊藻的细胞生长速率大幅减小,但光合作用速率仍维持在较高水平,导致细胞内糖的大量积累,降低了细胞浮力,使微囊藻进入底部沉积物中“休眠”;温度升高至一定水平,微囊藻的细胞恢复生长,消耗糖分,使得细胞浮力增大开始上浮至水体,则表现为微囊藻的“复苏”(谭啸等,2009;金相灿等,2008;曹焕生

等,2006). 另一方面,山仔水库水体垂向水温属于单对流型(苏玉萍等,2007),从春季-夏季-秋季(3月到11月)形成稳定的热分层,冬季(12月到次年1月、2月)水温热分层消失,垂向水体接近均匀混合,将使底层水体上翻,带动沉积物释放的营养物和复苏的蓝藻上翻至表层,对水体表层浮游植物群落的组成和演替产生重要影响,至于对水体暴发蓝藻水华的贡献还有待进一步研究.

蓝藻细胞体内除了含有叶绿素外,还含有特异的藻胆蛋白,使其能够利用其他藻类所无法利用的绿、黄、橙光(500~600 nm),从而在底泥中仍保持着光合作用,维持细胞活性(赵倩等,2009;Valentina *et al.*, 2010;万能等,2010). 但沉积物中的蓝藻复苏仍需要通过一定的光照条件进行光合作用提供足够的能量才能实现. 因此,光照强度能够影响沉积物中蓝藻的复苏. 本研究结果显示,颤藻的复苏与光照强度关系不紧密,这可能是由于颤藻休眠时,细胞内糖类含量足够使它复苏.

实验结果显示, BG11 溶液和底层原水对沉积物中蓝藻复苏影响无显著差异,经 0.45 μm 滤膜过滤后的水库原水,其 TN = 1.369 mg·L<sup>-1</sup>, TP = 0.056 mg·L<sup>-1</sup>, TN/TP = 24.4; BG11 是蓝绿藻选择性培养基,其 TN = 247 mg·L<sup>-1</sup>, TP = 7.09 mg·L<sup>-1</sup>, TN/TP = 34.8. 本课题组的研究表明,山仔水库沉积物中平均氮负荷在 3000 mg·kg<sup>-1</sup>左右,以有机氮为主;而山仔水库沉积物中磷负荷在 600~1000 mg·kg<sup>-1</sup>,主要以活性较大的 Fe/Al-P 和有机磷为主. 山仔水库沉积物中储存有足够的营养盐,一定的条件将促使沉积物营养盐的释放,上覆水体中过多的营养盐

不会对蓝藻复苏产生进一步的作用。

物理扰动产生的好氧环境会对蓝藻复苏起阻碍作用,但同时会对蓝藻从沉积物中进入水体有促进作用。本实验结果显示,沉积物中微囊藻和颤藻的复苏与物理扰动关系不密切,由此推断这两种作用之间容易发生转换。

## 5 结论(Conclusions)

1) 山仔水库冬季沉积物中蓝藻复苏环境影响因子正交试验结果表明,温度、光照、营养盐、物理扰动4个因子中,温度和光照对蓝藻复苏有显著影响,其中温度是山仔水库沉积物中蓝藻复苏的关键影响因子,营养盐及物理扰动对蓝藻复苏影响不明显。高温和光照条件下能促进沉积物中微囊藻的复苏,高温有利于沉积物中颤藻的复苏,但光照对颤藻复苏的影响不显著。

2) 对山仔水库沉积物柱状样复苏模拟实验研究表明,10℃左右蓝藻门微囊藻属和颤藻属开始复苏,微囊藻属和颤藻属对温度和光照的响应与正交实验结果一致,微囊藻属对光的敏感性使其更容易处于优势地位。

3) 比较复苏模拟实验前后沉积物中的微藻发现,沉积物表层(0~1 cm)藻类数量减少较多,底层藻的数量保持比较平衡,以上实验结果进一步证实了山仔水库沉积物中的蓝藻能够复苏并上浮到水体中,尤其是微囊藻属和颤藻属。山仔水库冬天水温热分层消失,垂向水体接近均匀混合,将使底层水体上翻,带动沉积物释放的营养物和复苏的蓝藻上翻至表层,对水体表层浮游植物群落的组成和演替产生重要影响。

责任作者简介: 苏玉萍(1972—),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事氮磷等生源要素生物地球化学循环及其生态效应、河流/水库生态系统对全球变化的响应与生态恢复等研究与教学工作。E-mail: ypsu@fjnu.edu.cn.

## 参考文献(References):

Brunberg A K, Blomqvist P. 2002. Benthic overwintering of *Microcystis* colonies under different environmental conditions [J]. *Journal of Plankton Research* 24: 1247-1252

曹焕生,孔繁翔,谭啸,等. 2006. 湖水华蓝藻底泥中复苏和水柱中生长的比较[J]. *湖泊科学*, 18(6): 585-589

Cao H S, Kong F X, Tan X, et al. 2006. Comparison of recruitment from sediments with pelagic growth of cyanobacteria in Lake Taihu, China [J]. *Journal of Lake Science*, 18(6): 585-589 (in Chinese)

韩博平. 2010. 中国水库生态学研究回顾与展望[J]. *湖泊科学* 22(2): 151-160

Han B P. 2010. Reservoir ecology and limnology in China: a retrospective comment [J]. *Journal of Lake Science* 22(2): 151-160 (in Chinese)

金相灿,储昭升,杨波,等. 2008. 温度对水华微囊藻及孟氏浮游蓝藻生长、光合作用及浮力变化的影响[J]. *环境科学学报* 28(1): 50-55

Jin X C, Chu Z S, Yang B, et al. 2008. Effects of temperature on growth, photosynthesis and buoyancy regulation of the cyanobacteria *Microcystis flos-aquae* and *Planktothrix mougeotii* [J]. *Acta Scientiarum Circumstantia* 28(1): 50-55 (in Chinese)

Katja S, Sabine J, Tilo I, et al. 2010. Arriving in better shape: Benthic *Microcystis* as inoculum for pelagic growth [J]. *Harmful Algae*, 9(5): 494-503

孔繁翔,高光. 2005. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. *生态学报* 25(3): 589-595

Kong F X, Gao G. 2005. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes [J]. *Acta Ecologica Sinica* 25(3): 589-595 (in Chinese)

孔繁翔,曹焕生,谭啸. 2010. 水华蓝藻复苏的研究进展与水华预测[J]. *环境监控与预警* 2(1): 1-4

Kong F X, Cao H S, Tan X. 2010. Development of research on recruitment of bloom-forming cyanobacteria and blooms forecast [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning* 2(1): 1-4 (in Chinese)

李阔宇,宋立荣,万能. 2004. 底泥中微囊藻复苏和生长特性的研究[J]. *水生生物学报* 28(2): 113-118

Li K Y, Song L R, Wan N. 2004. Studies on recruitment and growth characteristic of *Microcystis* in sediment [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica* 28(2): 113-118 (in Chinese)

Reynolds, C S, Rogers D A. 1976. Seasonal variations in the vertical distribution and buoyancy of *Microcystis aeruginosa* Kütz. Emend. Elenkin. in Rostherne Mere, England [J]. *Hydrobiologia*, 48: 17-23

苏玉萍,陈娜蓉,林婉珍,等. 2006. 福建省山仔水库浮游植物特征与水体富营养状况分析[J]. *亚热带资源与环境学报* 1(2): 48-54

Su Y P, Chen N R, Lin W Z, et al. 2006. Analysis of phytoplankton characteristic and eutrophication in Shanzi Reservoir, Fujian Province [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment* 1(2): 48-54 (in Chinese)

苏玉萍,郑达贤,林婉珍,等. 2007. 福建省山仔水库水体季节性分层特征研究[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)* 23(3): 1-4

Su Y P, Zheng D X, Lin W Z, et al. 2007. Research of the characteristic of the seasonal thermal stratification in the canyon Shanzi Reservoir, Fujian Province [J]. *Journal of Fujian Normal University (Nature Science Edition)* 23(3): 1-4 (in Chinese)

谭啸,孔繁翔,于洋,等. 2009. 升温过程对藻类复苏和群落演替的影响[J]. *中国环境科学* 29(6): 578-582

Tan X, Kong F X, Yu Y, et al. 2009. Effects of enhanced temperature on algae recruitment and phytoplankton community succession [J]. *China Environmental Science* 29(6): 578-582 (in Chinese)

陶益,孔繁翔,曹焕生,等. 2005. 太湖底泥水华蓝藻复苏的模拟[J]. *湖泊科学*, 17(3): 231-236

- Tao Y ,Kong F X ,Cao H S ,*et al.* 2005. Simulative recruitment of *Microcystis* from the surface sediment in Taihu Lake [J]. *Journal of Lake Science* ,17(3) : 231-236( in Chinese)
- Tsujimura S ,Tsukada H ,Nakahara H. 2000. Seasonal variations of *Microcystis* populations in sediments of lake Biwa [J]. *Japanese Hydrobiologia* 434: 1183-1192
- Valentina R ,Bettina E S ,Marco V B. 2010. The evolutionary path to terminal differentiation and division of labor in cyanobacteria [J]. *Journal of Theoretical Biology* 262: 23-34
- Verspagen J M H , Snelder E O F M , Visser P M , *et al.* 2004. Recruitment of benthic *Microcystis* ( cyanophyceae) to the water column: Internal buoyancy changes or resuspension [J]. *Journal of Phycology* 40: 260-270
- 万能 汤俊 宋立荣. 2010. 微囊藻休眠体复苏机制的研究进展 [J]. *水生态学杂志* ,3(4) : 113-117
- Wan N , Tang J ,Song L R. 2010. Recruitment mechanisms of dormant *Microcystis*: A review [J]. *Journal of Hydroecology* 3(4) : 113-117 ( in Chinese)
- 王菲凤 仝川 杨芳 等. 2011. 福州山仔水库水华微囊藻毒素时空分布特征 [J]. *环境科学学报* 31(3) : 533-546
- Wang F F ,Tong C ,Yang F *et al.* 2011. Spatial and temporal distribution of microcystins in the Fuzhou Shanzai Reservoir [J]. *Acta Scientiae Circumstantia* 31(3) : 533-546( in Chinese)
- 吴晓东 孔繁翔 张晓峰 等. 2008. 太湖与巢湖水华蓝藻越冬和春季复苏的比较研究 [J]. *环境科学* 29(5) : 1313-1318
- Wu X D ,Kong F X ,Zhang X F *et al.* 2008. Comparison of overwintering and recruitment of cyanobacteria in Taihu Lake and Chaohu Lake [J]. *Environmental Science* 29(5) : 1313-1318 ( in Chinese)
- 章宗涉 黄祥飞. 1991. 水浮游生物研究方法 [M]. 北京: 科学出版社. 333-339
- Zhang Z S ,Huang X F. 1991. *Water Plankton Research Methods* [M]. Beijing: Science Press. 333-339( in Chinese)
- 赵倩 任文伟. 2009. 蓝藻越冬机理研究进展 [J]. *复旦大学学报(自然科学版)* 48(1) : 117-124
- Zhao Q ,Ren W W. 2009. Advances on the researches of overwintering mechanism of cyanobacteria [J]. *Journal of Fudan University ( Natural Science)* 48(1) : 117-124 ( in Chinese)
- 周亮进 由文辉. 2008. 福建省山仔水库富营养化特征 [J]. *水资源保护* 24(2) : 26-29
- Zhou L J , You W H. 2008. Eutrophication characteristic of Shanzi Reservoir in Fujian Province [J]. *Water Resources Protection* ,24(2) : 26-29( in Chinese)