

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

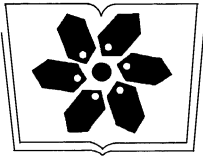
Acta Ecologica Sinica



第31卷 第20期 Vol.31 No.20 **2011**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 20 期 2011 年 10 月 (半月刊)

目 次

- 洋山港潮间带大型底栖动物群落结构及多样性..... 王宝强,薛俊增,庄 骅,等 (5865)
- 天津近岸海域夏季大型底栖生物群落结构变化特征..... 冯剑丰,王秀明,孟伟庆,等 (5875)
- 基于景观遗传学的滇金丝猴栖息地连接度分析..... 薛亚东,李 丽,李迪强,等 (5886)
- 三江平原湿地鸟类丰富度的空间格局及热点地区保护..... 刘吉平,吕宪国 (5894)
- 江苏沿海地区耕地景观生态安全格局变化与驱动机制 王 千,金晓斌,周寅康 (5903)
- 广州市主城区树冠覆盖景观格局梯度..... 朱耀军,王 成,贾宝全,等 (5910)
- 景观结构动态变化及其土地利用生态安全——以建三江垦区为例 林 佳,宋 戈,宋思铭 (5918)
- 基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划..... 李 晖,易 娜,姚文璟,等 (5928)
- 苏南典型城镇耕地景观动态变化及其影响因素..... 周 锐,胡远满,苏海龙,等 (5937)
- 放牧干扰下若尔盖高原沼泽湿地植被种类组成及演替模式..... 韩大勇,杨永兴,杨 杨,等 (5946)
- 放牧胁迫下若尔盖高原沼泽退化特征及其影响因子..... 李 珂,杨永兴,杨 杨,等 (5956)
- 近 20 年广西钦州湾有机污染状况变化特征及生态影响..... 蓝文陆 (5970)
- 万仙山油松径向生长与气候因子的关系 彭剑峰,杨爱荣,田沁花 (5977)
- 50 年来山东塔山植被与物种多样性的变化 高 远,陈玉峰,董 恒,等 (5984)
- 热岛效应对植物生长的影响以及叶片形态构成的适应性..... 王亚婷,范连连 (5992)
- 遮荫对濒危植物崖柏光合作用和叶绿素荧光参数的影响..... 刘建锋,杨文娟,江泽平,等 (5999)
- 遮荫对 3 年生东北铁线莲生长特性及品质的影响..... 韩忠明,赵淑杰,刘翠晶,等 (6005)
- 云雾山铁杆蒿茎叶浸提液对封育草地四种优势植物的化感效应..... 王 辉,谢永生,杨亚利,等 (6013)
- 杭州湾滨海滩涂盐基阳离子对植物分布及多样性的影响 吴统贵,吴 明,虞木奎,等 (6022)
- 藏北高寒草原针茅属植物 AM 真菌的物种多样性..... 蔡晓布,彭岳林,杨敏娜,等 (6029)
- 成熟马占相思林的蒸腾耗水及年际变化..... 赵 平,邹绿柳,饶兴权,等 (6038)
- 荆条叶性状对野外不同光环境的表型可塑性..... 杜 宁,张秀茹,王 炜,等 (6049)
- 短期极端干旱事件干扰后退化沙质草地群落恢复力稳定性的测度与比较..... 张继义,赵哈林 (6060)
- 滨海盐碱地土壤质量指标对生态改良的响应..... 单奇华,张建锋,阮伟建,等 (6072)
- 退化草地阿尔泰针茅与狼毒种群的小尺度种间空间关联..... 赵成章,任 珩 (6080)
- 延河流域植物群落功能性状对环境梯度的响应 龚时慧,温仲明,施 宇 (6088)
- 臭氧胁迫使两优培九倒伏风险增加——FACE 研究 王云霞,王晓莹,杨连新,等 (6098)
- 甘蔗//大豆间作和减量施氮对甘蔗产量、植株及土壤氮素的影响 杨文亭,李志贤,舒 磊,等 (6108)
- 湿润持续时间对生物土壤结皮固氮活性的影响..... 张 鹏,李新荣,胡宜刚,等 (6116)
- 锌对两个品种茄子果实品质的效应..... 王小晶,王慧敏,王 菲,等 (6125)
- Cd²⁺ 胁迫对银芽柳 PS II 叶绿素荧光光响应曲线的影响 钱永强,周晓星,韩 蕾,等 (6134)
- 紫茉莉对铅胁迫生理响应的 FTIR 研究 薛生国,朱 锋,叶 晟,等 (6143)

结缕草对重金属镉的生理响应	刘俊祥,孙振元,巨关升,等 (6149)
两种大型真菌子实体对 Cd ²⁺ 的生物吸附特性	李维焕,孟凯,李俊飞,等 (6157)
富营养化山仔水库沉积物微囊藻复苏的受控因子	苏玉萍,林慧,钟厚璋,等 (6167)
一种新型的昆虫诱捕器及其对长足大竹象的诱捕作用	杨瑶君,刘超,汪淑芳,等 (6174)
光周期对梨小食心虫滞育诱导的影响	何超,孟泉科,花蕾,等 (6180)
农林复合生态系统防护林斑块边缘效应对节肢动物的影响	汪洋,王刚,杜瑛琪,等 (6186)
中国超大城市土地利用状况及其生态系统服务动态演变	程琳,李锋,邓华锋 (6194)
城市综合生态风险评价——以淮北市城区为例	张小飞,王如松,李正国,等 (6204)
唐山市域 1993—2009 年热场变化	贾宝全,邱尔发,蔡春菊 (6215)
基于投影寻踪法的武汉市“两型社会”评价模型与实证研究	王茜茜,周敬宣,李湘梅,等 (6224)
长株潭城市群生态屏障研究	夏本安,王福生,侯方舟 (6231)
基于生态绿当量的城市土地利用结构优化——以宁国市为例	赵丹,李锋,王如松 (6242)
基于 ARIMA 模型的生态足迹动态模拟和预测——以甘肃省为例	张勃,刘秀丽 (6251)
专论与综述	
孤立湿地研究进展	田学智,刘吉平 (6261)
甲藻的异养营养型	孙军,郭术津 (6270)
生态工程领域微生物菌剂研究进展	文娅,赵国柱,周传斌,等 (6287)
我国生态文明建设及其评估体系研究进展	白杨,黄宇驰,王敏,等 (6295)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 440 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 49 * 2011-10	



封面图说: 壶口瀑布是黄河中游流经秦晋大峡谷时形成的一个天然瀑布。此地两岸夹山,河底石岩上冲刷成一巨沟,宽达 30 米,深约 50 米,最大瀑面 3 万平方米。滚滚黄水奔流至此,倒悬倾注,若奔马直入河沟,波浪翻滚,惊涛怒吼,震声数里可闻。其形其声如巨壶沸腾,故名壶口。300 余米宽的滚滚黄河水至此突然收入壶口,有“千里黄河一壶收”之说。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

苏玉萍, 林慧, 钟厚璋, 林佳, 陈静. 富营养化山仔水库沉积物微囊藻复苏的受控因子. 生态学报, 2011, 31(20): 6167-6173.

Su Y P, Lin H, Zhong H Z, Lin J, Chen J. Factors regulating recruitment of *Microcystis* from the sediments of the eutrophic Shanzai Reservoir. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(20): 6167-6173.

富营养化山仔水库沉积物微囊藻复苏的受控因子

苏玉萍^{1,2,*}, 林慧¹, 钟厚璋¹, 林佳¹, 陈静¹

(1. 福建师范大学环境科学与工程学院, 福州 350007; 2. 福建省高分子材料重点实验室, 福州 350007)

摘要:山仔水库作为福建省福州市重要的饮用水水源地之一,从2000年起每年都周期性爆发蓝藻门微囊藻属(*Microcystis*)水华现象,特别是在温暖的季节。对于这个富营养化水库,是否在沉积物中存在蓝藻门微囊藻的“种源”?假设山仔水库底泥中存在蓝藻门微囊藻休眠体,一定的环境条件能够促进蓝藻门微囊藻的复苏。研究于2009年12月采集水库大坝断面5根柱状沉积物,采用正交试验的方法,模拟了温度、光照、pH值、营养盐、物理扰动和浮游动物(膨大肾形虫)等环境因子对山仔水库沉积物中蓝藻门微囊藻的复苏响应。结果表明,底泥中存在一定数量的底栖动物和硅藻、蓝藻和绿藻等微藻,从实验结束后沉积物中微囊藻数量的减少和上覆水体中微囊藻数量的增加,可以判断在适宜的环境条件下,蓝藻门微囊藻能够复苏并上浮到上覆水体中。正交实验显著性分析表明,温度是沉积物蓝藻门微囊藻复苏的重要影响因子,光照次之,上覆水体的pH值、营养盐、物理扰动和浮游动物干扰对沉积物蓝藻门微囊藻的复苏影响作用不显著,升温有利于沉积物中微囊藻的复苏。

关键词:沉积物;微囊藻;复苏;山仔水库

Factors regulating recruitment of *Microcystis* from the sediments of the eutrophic Shanzai Reservoir

SU Yuping^{1,2,*}, LIN Hui¹, ZHONG Houzhang¹, LIN Jia¹, CHEN Jing¹

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

2 Key Laboratory of Polymer Materials of Fujian Province, Fuzhou 350007, China

Abstract: Shanzai reservoir is one of the drinking water sources to provide 0.23 million people living in Fuzhou City, Fujian province, China. There has excessive blue-green algae growth in this reservoir from 2000 especially in the warmer seasons. Many species of algae can live on sediments during conditions unsuitable for growth. This is true for most blue-green algae, some of which develop as surface water blooms, such as *Anabaena* and *Aphanizomenon* produce akinetes forming seed banks which can survive on sediments of water bodies for overwintering. Although the toxic blue-green algae *Microcystis* does not produce any specialized dormant cells like akinetes, it is reported that *Microcystis* colonies can accumulate on the sediments during autumn and winter in a vegetative state. We have addressed the question of whether the sediment provides the inoculum for *Microcystis* population in the eutrophic Shanzai reservoir. Our hypotheses were that if any factor might enhance recruitment of *Microcystis* from the sediment. Five core samples were collected from the sediment on December 2009 in the dam section of Shanzai reservoir. We examined the recruitment responses of *Microcystis* to the culture conditions including temperature, light intensity, pH, nutrient, physical disturbance and zooplankton in the sediment of the Shanzai Reservoir. Many kinds of Zoobenthos and algae could be found in the sediment. The main algae included *Cyanobacteria*, *Diatom* and *Chlorophyta* etc. The result of orthogonal experiment showed that temperature was the most important regulating factor for the *Microcystis* recruitment from sediments, the increased temperature would promote the

基金项目:福建省自然科学基金(2010J01250);福建省教育厅科学研究基金(JB07074);福建师范大学本科生课外创新项目(BKL2010-039)

收稿日期:2011-04-20; **修订日期:**2011-07-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ypsu@fjnu.edu.cn

recruitment of *Microcystis*, the second one is the light intensity. The effects of the overlying water pH, nutrient, physical disturbance and zooplankton on the recruitment of *Microcystis* from sediments were not obvious. Reinvasion was quantified by the diminution of benthic *Microcystis* abundance, and moreover, by the increase of *Microcystis* in the water column. Our results from the laboratory experiment suggest that the *Microcystis* in the sediment could recruit and float up to the water surface which support our hypothesis that the sediment is the important seed banks and provide the inocula for *Microcystis* blooms in Shanzai Reservoir and temperature was the most significant environmental factor regulating the recruitment of *Microcystis* from the sediment. The results would provide a scientific reference for controlling *Microcystis* bloom in the Shanzai reservoir.

Key Words: sediment; *Microcystis*; recruitment; Shanzai Reservoir

湖泊水库富营养化问题是当前世界范围内普遍关注的水环境问题之一,特别是作为饮用水源的湖泊水库,产毒素藻类如蓝藻门微囊藻属(*Microcystis*)的爆发,直接威胁到人们的饮水安全。国内外学者对湖泊富营养化问题的相关研究表明,沉积物常作为浮游植物休眠的场所,为种群再生长提供必需的“种源”,在一定程度上为藻类水华的爆发提供条件^[1-6]。孔繁翔提出假设,将蓝藻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,并认为在不同的阶段,藻类的生理特性不同,影响其发展的主导生态因子也不相同^[7-8]。蓝藻在生长环境不利时会在沉积物表面积累,进入休眠状态,等到环境条件适宜时,开始生长,迁移到水中,这便是所谓的“复苏”现象,这种生长策略可以使蓝藻度过生长环境恶劣的时期,从而为种群再生长提供必需的“种源”^[9]。蓝藻中的鱼腥藻和束丝藻能够产生孢子作为越冬的种子库,而产毒蓝藻如微囊藻不产生孢子,微囊藻能够以营养细胞状态聚集在沉积物中度过秋天和冬天。休眠的蓝藻复苏受到许多环境因素的影响,已有研究表明,蓝藻的复苏与温度、光照、溶解氧以及营养盐有着密切的联系^[10-13]。目前国内对蓝藻“水华”形成机理和控制策略的研究主要集中于夏季,对于蓝藻春季复苏这一过程仅见对太湖的报道^[14],对深水库沉积物相关研究未见报道。

近几年,福建省的许多水库相继出现了富营养化问题,在温暖的季节周期性发生蓝藻门微囊藻属(*Microcystis*)水华,严重影响了水质。山仔水库沉积物能否为蓝藻门微囊藻水华提供“种源”?一定的环境条件能否促进蓝藻门微囊藻的复苏?本研究以富营养化的山仔水库冬季沉积物为研究对象,采用正交试验研究环境因子对山仔水库沉积物微囊藻复苏的影响,探索影响沉积物微囊藻复苏的关键因子,对于进一步认识山仔水库“水华”的发生机理,进而采取有针对性的控制措施,合理的水源地水资源管理目标提供科学的参考。

1 研究区域概况

山仔水库位于敖江中游段,中心地理位置为北纬 26°17'51",东经 119°21'35"。该水库于 1994 年 11 月建成发电,水库调节库容 1.06 亿 m³,水面面积 6.639 km²,平均水深 25 m,坝头最深处约 50 m。1997 年福州市人民政府确定敖江为福州市的第二饮用水源。从 2000 年开始,山仔水库出现富营养化现象,在库湾水浅流缓的地方爆发了以蓝藻门水华微囊藻(*M. flos-aquae*)为优势种群的水华,水华多发生在春末夏季和初秋,具有明显的季节性特点。

2 实验部分

2.1 样品的采集

在便携式全球定位系统 GPS 导航下,于 2009 年 12 月,在山仔水库湖泊区大坝断面(26°20'24"N,119°19'48"E),利用奥地利进口不锈钢柱状采泥器,采集 5 管 50 cm 柱状沉积物。现场将其中 1 管沉积物按 0—1 cm、1—3 cm、3—5 cm、5—7 cm、7—9 cm 切割,并分别保存于密封袋中,带回实验室,置于 4℃ 冰箱保存一周。用于模拟实验的水库底层原水的采集与沉积物采集同步,带回实验室后立即经纤维滤膜(0.45 μm)过滤,然后将水样放入 4℃ 下冰柜中避光保存。

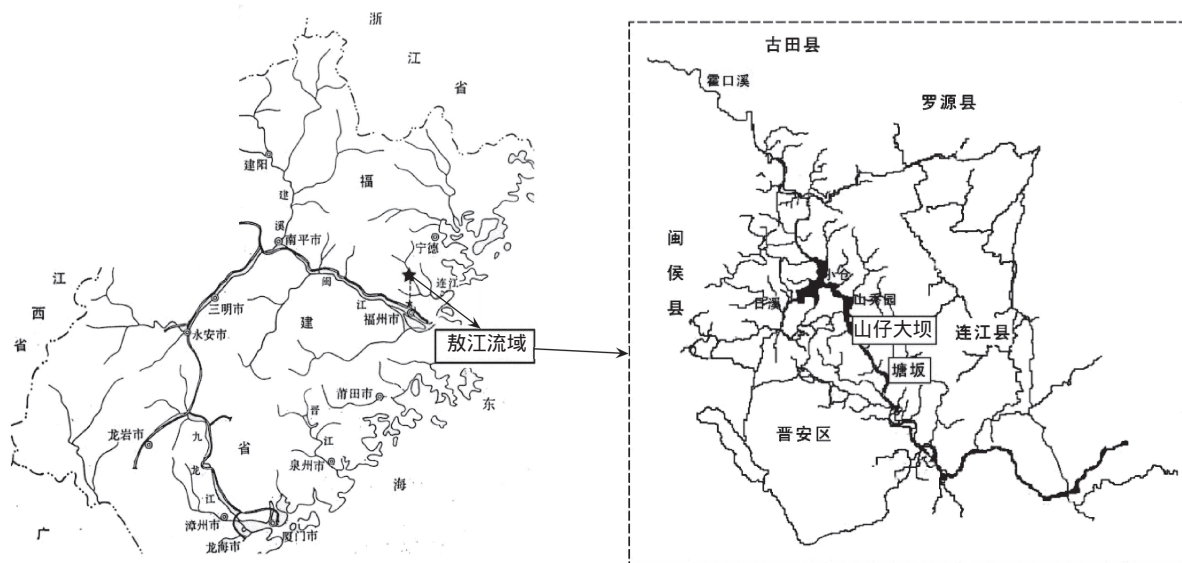


图1 山仔水库地理位置

Fig.1 The location of Shanzai Reservoir

2.2 沉积物和水体微藻分析

将按0—1cm、1—3cm、3—5cm、5—7cm、7—9cm切割的沉积物,分别称取1g的新鲜沉积物样品,置于干净的小烧杯中,加100mL蒸馏水充分混匀,静置1min后,取上部液体30mL转移入标记好的试剂瓶中,加入若干滴鲁哥式碘液(15mL/L)固定。计数前将固定样混匀,用移液枪移取0.1mL置于计数框(20mm×20mm)中,在生物显微镜下,以10×40倍进行视野法计数,分析沉积物各种微藻的数量(个/g底泥湿重),每个样品做3个平行分析,结果以平行样偏差不超15%的平均值表示。

将正交复苏实验后装置中沉积物分5层进行切割,分别是0—1cm、1—3cm、3—5cm、5—7cm、7—9cm,切割完的样品分别保存于密封袋中,用于比较实验前后沉积物中微囊藻丰度的变化。

用0.1mL计数框观察100个视野里各种藻类的数量,并通过公式(1)换算得出水柱中藻类的数量。

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

式中, N 为每升水样中复苏藻类数量个/L; A 为计数框的面积/ mm^2 ; A_0 为计数面积/ mm^2 ,即视野数×视野面积; V_s 为1L原水样浓缩后的计数样品的体积/mL; V 为计数框体积/mL; n 为计数所得藻类的数目。

2.3 正交实验设计

将采集到的其余4管沉积物,将0—10cm沉积物样品充分混匀后,分别称取25g置于16个(设置两组平行)自制的底面直径5cm,高20cm柱状有机玻璃模拟装置中。每个模拟柱中装入350mL纤维滤膜(0.45 μm)过滤的底层原水或培养液,设定条件培养40d后,将装置内的350mL水样移出,加入鲁哥试剂固定,采用0.1mL的计数框进行视野法计数,并观察微囊藻的形态大小,计数3组平行样,取培养结果偏差不超15%的分析结果的平均值进行分析。

本研究选取温度、光照、pH、营养盐、物理扰动、浮游动物干扰这6个因素,每个因素设2个水平,进行山仔水库沉积物中微囊藻复苏的正交实验。采用 $L_8(2^7)$ 正交设计,因素水平表见表1,结果进行显著性 F 检验。

1)根据山仔水库近3a监测数据,不同季节沉积物上覆水的温度变化范围在为10—15 $^{\circ}\text{C}$,因此设置温度9 $^{\circ}\text{C}$ 和18 $^{\circ}\text{C}$ 两个水平;

2)设计了黑暗及微弱光照条件:黑暗条件即将整根模拟柱用牛皮纸包裹遮光,微弱光照条件为在2400lx照度下,将模拟柱用牛皮纸包裹遮光,保留培养柱上段透光,光暗比为12h:12h;

3) 根据历年数据,山仔水库不同季节沉积物上覆水的 pH 值变化范围在 6.5—7.5 之间,用 0.04mol/L 的盐酸和 0.04mol/L 的氢氧化钠调节初始培养液的 pH 值,设置 pH 值为 6.0 和 8.0 两个水平;

4) 培养柱中的上覆水采用 0.45 微米滤膜过滤后的水库上覆原水和 BG11 溶液(BG11 培养基配方由中国科学院水生生物研究所淡水藻种库(FACHB)提供),考察上覆水培养基对微囊藻复苏的影响;

5) 考虑到下层水体可能受到水库开闸放水等因素影响,设计了无扰动(静置培养)和扰动(每天用摇床低速扰动 3 次,每次半小时,其余时间静置)条件;

6) 设计了添加用稻秆浸出液富集的山仔水库沉积物上覆水体中的土著浮游动物膨大肾形虫(*Colpoda inflata*)和不添加浮游动物的条件。

表 1 正交实验因素水平表

Table 1 Factors level table of orthogonal experiment

水平 Level	因素 Factor					
	温度/℃ Temperature A	光照/lx Light intensity B	pH C	营养盐 Nutrient D	扰动 Disturbance E	浮游动物 Zooplankton F
1	9	无光照	6.0	BG11 溶液	扰动	有添加
2	18	微光照	8.0	过滤后原水	无扰动	无添加

3 结果与讨论

3.1 山仔水库沉积物中底栖动物与微藻

山仔水库冬季沉积物中底栖动物和微藻种类见表 2,微藻丰度的分析结果如图 2 所示。山仔水库沉积物中底栖动物主要包括鳃状单缩虫(*Carchesium polypinum*)、褶累枝虫(*Epistylis plicatilis*)、尖尾疣毛轮虫(*Synchaeta stylata*)、独角聚花轮虫(*Conochilus unicornis*)和无节幼体(*Nauplius*)。微藻的种类主要有硅藻门(*Bacillariophyta*)、蓝藻门(*Cyanophyta*)、绿藻门(*Chlorophyta*)以及隐藻门(*Cryptophyta*)、裸藻门

表 2 山仔水库沉积物中底栖动物与藻类的主要种类

Table 2 Main species of zoobenthos and algae in the sediment of the Shanzai Reservoir

底栖动物 Zoobenthos		鳃状单缩虫 <i>Carchesium polypinum</i> 褶累枝虫 <i>Epistylis plicatilis</i> 尖尾疣毛轮虫 <i>Synchaeta stylata</i> 独角聚花轮虫 <i>Conochilus unicornis</i> 无节幼体 <i>Nauplius</i>
藻类 Algae	硅藻门 <i>Bacillariophyta</i>	远距直链藻 <i>Melosira distans</i> 梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i> 颗粒直链藻最窄变种 <i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i> 舟形藻 <i>Navicula</i> sp.
	绿藻门 <i>Chlorophyta</i>	纤细月芽藻 <i>Selenastrum gracile</i> 小形月芽藻 <i>Selenastrum minutum</i> 瑞尖月芽藻 <i>Selenastrum westii</i> 弓形藻 <i>Schroederia setigera</i> 针形纤维藻 <i>Ankistrodesmus acicularis</i>
	蓝藻门 <i>Cyanophyta</i>	微囊藻(散状细胞) <i>Microcystis</i> sp. 固氮鱼腥藻 <i>Anabaena azotica</i> 小颤藻 <i>Oscillatoria tenuis</i> 不整齐蓝纤维藻 <i>Dactylococcopsis irregularis</i>
	隐藻门 <i>Cryptophyta</i>	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>
	裸藻门 <i>Euglenophyta</i>	囊裸藻 <i>Trachelomonas</i> sp.
	甲藻门 <i>Pyrrophyta</i>	角甲藻 <i>Ceratium hirundinella</i>

(*Euglenophyta*) 和甲藻门(*Pyrrophyta*) 等,其中各层中占优势的是硅藻门,密度达到 10^6 个/g 底泥湿重,其次是蓝藻门(主要包括微囊藻、鱼腥藻、颤藻和不整齐蓝纤维藻),密度达到 10^5 个/g 底泥湿重。表层沉积物中微藻的数量达到 4.20×10^6 个/g 底泥湿重,表层到次表层有较为明显的下降趋势,5—7 cm 处出现一个高值,微藻的数量达到 2.85×10^6 个/g 底泥湿重,表明不同深度沉积物生物量积累的年度差异,有待结合水库的沉积速率进一步分析。

3.2 正交试验结果分析

正交实验的结果见表 3。在本次实验中,考察指标是复苏到上覆水体的微囊藻密度,密度越大,代表微囊藻对相应环境条件的复苏响应越好,由表 3 可看出, R

温度>R 光照>R 扰动>R pH >R 浮游动物>R 营养盐,本设计实验中,沉积物中微囊藻复苏的最佳条件是: 18℃、微光照、pH=6、BG11 营养液、扰动及无额外添加浮游动物条件。

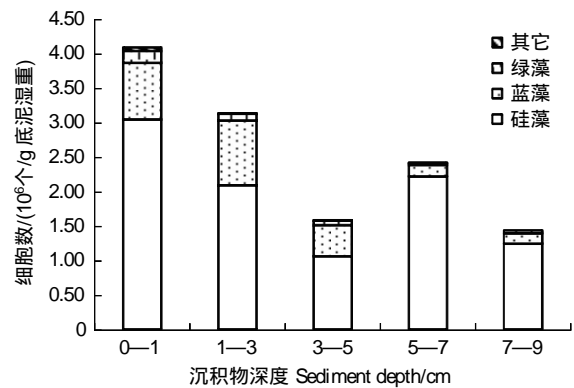


图 2 山仔水库沉积物不同深度微藻丰度

Fig. 2 The abundance of micro algae in different depth sediments of Shanzai Reservoir

表 3 正交实验结果

Table 3 The results of orthogonal experiment

NO.	列号							空列 null	微囊藻复苏量 / (个/L)
	A	B	C	D	E	F			
1	1	1	1	1	1	1	1	1.10×10^8	
2	1	1	1	2	2	2	2	8.76×10^7	
3	1	2	2	1	1	2	2	2.38×10^8	
4	1	2	2	2	2	1	1	8.96×10^7	
5	2	1	2	1	2	1	2	1.96×10^8	
6	2	1	2	2	1	2	1	2.21×10^8	
7	2	2	1	1	2	2	1	2.58×10^8	
8	2	2	1	2	1	1	2	3.83×10^8	
K1	5.24×10^8	6.15×10^8	8.38×10^8	8.01×10^8	9.52×10^8	7.79×10^8	6.78×10^8		
K2	1.06×10^9	9.68×10^8	7.45×10^8	7.82×10^8	6.31×10^8	7.79×10^8	9.05×10^8		
极差 R	5.34×10^8	3.53×10^8	9.36×10^7	1.91×10^7	3.21×10^8	2.52×10^7	2.26×10^8		
因素主次 Sequence	ABECFD								
优方案 Optimal	A ₂ B ₂ C ₁ D ₁ E ₁ F ₂								
SSj	3.57×10^{16}	1.56×10^{16}	1.10×10^{15}	4.57×10^{13}	1.29×10^{16}	7.91×10^{13}	6.41×10^{15}		

3.2 影响因素显著性检验与分析

正交实验各因素方差分析的结果见表 4。结果显示,温度和光照对沉积物中微囊藻复苏有显著影响,且温度对复苏的影响比光照更显著,即温度为山仔水库沉积物中微囊藻的复苏最主要影响因素,上覆水体 pH、营养盐、扰动和浮游动物对沉积物中微囊藻的复苏影响作用不显著,高温和光照有利于沉积物中微囊藻的复苏。从复苏后沉积物镜检结果来看,高温和光照条件下,沉积物中蓝藻数量下降约为 60%,从总体上看,表层(0—1 cm)微囊藻数量减少的较多,底层数量保持比较平衡,说明沉积物表层微囊藻比较容易复苏上浮到水体中。而沉积物中其他种类的微藻与蓝藻的种间竞争也影响着蓝藻的复苏,有待进一步探讨。

温度对微囊藻复苏的控制,可能是通过影响微囊藻的浮力而实现。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少,但光合作用速率仍维持在较高水平,则导致了细胞内糖的大量积累,降低了细胞浮力,微囊藻进入沉积物“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”^[14]。因此,温度成为控制微囊藻休眠与复苏的重要因素。

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—600nm),从而在沉积物中仍保持着光合作用,维持细胞活性^[7]。但沉积物中的蓝藻复苏仍需要一定的光照条件,已有研究表明,冬季浅水区(水深 1—2m)蓝藻的复苏量与复苏率明显高于深水区(水深 > 6m)^[15],蓝藻的复苏需要通过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微囊藻的复苏。

水流扰动对微囊藻复苏的影响,一方面使模拟柱的沉积物表面处于好氧环境,阻碍微囊藻的复苏生长,另一方面,扰动也可能促进微囊藻从沉积物进入水体^[10]。本实验结果显示,扰动所产生的好氧环境对微囊藻复苏的阻碍作用与扰动促进微囊藻进入水体的作用易发生转换,使扰动对微囊藻复苏的影响不显著。

浮游动物对沉积物中微囊藻复苏的作用较为复杂,可以通过生物扰动或选择性的滤食对复苏产生影响,但微囊藻营养价值低,本身具有毒性,因而它的复苏和生长可能较少受到浮游动物捕食的负面影响。本研究结果显示,从山仔水库沉积物上覆水体中富集得到的浮游动物膨大肾形虫对微囊藻的复苏并无显著影响,浮游动物对沉积物中微囊藻复苏的作用有待进行生理与生态方面的深入研究。

本研究中微囊藻复苏与上覆水体中初始的 N、P 浓度关系不大。营养盐的浓度能够影响微囊藻的生长^[12],但沉积物上覆水体中的 N、P 营养盐与沉积物间隙水 N、P 营养盐之间处于动态平衡之中,故营养盐对微囊藻复苏的影响也不显著。

已有的研究结果显示,沉积物-水界面的 pH 值不仅影响沉积物上覆水体中的 N、P 营养盐浓度,而且对微囊藻的复苏生长有一定影响,弱酸水体更有利于微囊藻的复苏生长,可能原因是弱酸水体较易吸收空气中的 CO₂,促进微囊藻的光合作用,为微囊藻的复苏提供能量,但这个过程极为缓慢,所以其对微囊藻的复苏影响很小。

表 4 正交实验各因素方差分析表

Table 4 The factors variance analysis of the orthogonal experiment

差异源 Number	SS	df	MS	F	显著性 Significance
A	3.57×10 ¹⁶	1	3.57×10 ¹⁶	18.72	*
B	1.56×10 ¹⁶	1	1.56×10 ¹⁶	8.18	*
E	1.29×10 ¹⁶	1	1.29×10 ¹⁶	6.75	
C	1.10×10 ¹⁵	1	1.91×10 ¹⁵		
D	4.57×10 ¹³	1			
E	7.91×10 ¹³	1			
eΔ 误差 error	6.41×10 ¹⁵	1			
	7.63×10 ¹⁵	4			
总和 Sum	7.18×10 ¹⁶	7	1.03×10 ¹⁶		

SS: 离差平方和;df: 自由度;MS: 均方

4 主要结论

本文通过正交试验方法,模拟了山仔水库冬季沉积物蓝藻门微囊藻属的复苏,实验结果表明,温度是山仔水库沉积物微囊藻复苏的主要影响因子,光照次之,上覆水体的 pH 值、营养盐、物理扰动和浮游动物干扰对沉积物微囊藻的复苏影响作用不明显,温度升高有利于山仔水库沉积物中微囊藻的复苏。

References:

- [1] Schöne K, Jähnichen S, Ihle T, Ludwig F, Benndorf J. Arriving in better shape: Benthic *Microcystis* as inoculum for pelagic growth. *Harmful Algae*, 2010, 9(5): 494-503.
- [2] Rossetti V, Schirmer B E, Bernasconi M V, Bagheri H C. The evolutionary path to terminal differentiation and division of labor in cyanobacteria. *Journal of Theoretical Biology*, 2010, 262(1): 23-34.
- [3] Wan N, Tang J, Song L R. Recruitment mechanisms of dormant *Microcystis*: a review. *Journal of Hydroecology*, 2010, 3(4): 113-117.

- [4] Tan X, Kong F X, Yu Y, Shi X L, Zhang M. Effects of enhanced temperature on algae recruitment and phytoplankton community succession. *China Environmental Science*, 2009, 29(6): 578-582.
- [5] Nakane T, Nakaka K, Bouman H, Platt T. Environmental control of short-term variation in the plankton community of inner Tokyo Bay, Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 78(4): 796-810.
- [6] Burford M A, Johnson S A, Cook A J, Packer T V, Taylor B M, Townsley E R. Correlations between watershed and reservoir characteristics, and algal blooms in subtropical reservoirs. *Water Research*, 2007, 41(18): 4105-4114.
- [7] Kong F X, Gao G. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 589-595.
- [8] Yan R, Kong F X, Han X B. Analysis of the recruitment of the winter survival algae on the sediments of Lake Taihu by fluorometry. *Journal of Lake Sciences*, 2004, 16(2): 163-168.
- [9] Barbiero R P, Kann J. The importance of benthic recruitment to the population development of *Aphanizomenon flos-aquae* and internal loading in a shallow lake. *Journal of Plankton Research*, 1994, 16(11): 1581-1588.
- [10] Brunberg A K, Blomqvist P. Benthic overwintering of *Microcystis* colonies under different environmental conditions. *Journal of Plankton Research*, 2002, 24(11): 1247-1252.
- [11] Hansson L A, Rudstam L G, Johnson T B, Soranno P, Allen Y. Patterns in algal recruitment from sediment to water in a dimictic, eutrophic lake. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1994, 51(12): 2825-2833.
- [12] Ståhl-Delbanco A, Hansson L A, Gyllström M. Recruitment of resting stages may induce blooms of *Microcystis* at low N: P ratios. *Journal of Plankton Research*, 2003, 25(9): 1099-1106.
- [13] Hansson L A. Algal recruitment from lake sediments in relation to grazing, sinking, and dominance patterns in the phytoplankton community. *Limnology and Oceanography*, 1996, 41(6): 1312-1323.
- [14] Jin X C, Chu Z S, Yang B, Zhang S F, Pang Y, Zeng Q R. Effects of temperature on growth, photosynthesis and buoyancy regulation of the cyanobacteria *Microcystis flos-aquae* and *Planktothrix mougeotii*. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(1): 50-55.
- [15] Brunberg A K, Blomqvist P. Recruitment of *Microcystis* (Cyanophyceae) from lake sediments; the importance of littoral inocula. *Journal of Phycology*, 2003, 39(1): 58-63.

参考文献:

- [3] 万能, 汤俊, 宋立荣. 微囊藻休眠体复苏机制的研究进展. *水生态学杂志*, 2010, 3(4): 113-117.
- [4] 谭啸, 孔繁翔, 于洋, 史小丽, 张民. 升温过程对藻类复苏和群落演替的影响. *中国环境科学*, 2009, 29(6): 578-582.
- [7] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊的蓝藻水华形成机理的思考. *生态学报*, 2005, 25(3): 589-595.
- [8] 阎荣, 孔繁翔, 韩小波. 太湖底泥表层越冬藻类群落动态的荧光分析法初步研究. *湖泊科学*, 2004, 16(2): 163-168.
- [15] 金相灿, 储昭升, 杨波, 郑朔芳, 庞燕, 曾清如. 温度对水华微囊藻及孟氏浮游蓝丝藻生长、光合作用及浮力变化的影响. *环境科学学报*, 2008, 28(1): 50-55.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 20 October, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

- Community structure and diversity of macrobenthos in the intertidal zones of Yangshan Port WANG Baoqiang, XUE Junzeng, ZHUANG Hua, et al (5865)
- Variation characteristics of macrobenthic communities structure in tianjin coastal region in summer FENG Jianfeng, WANG Xiuming, MENG Weiqing, et al (5875)
- Analysis of habitat connectivity of the Yunnan snub-nosed monkeys (*Rhinopithecus bieti*) using landscape genetics XUE Yadong, LI Li, LI Diqiang, WU Gongsheng, et al (5886)
- Study on the spatial pattern of wetland bird richness and hotspots in Sanjiang Plain LIU Jiping, LÜ Xianguo (5894)
- Dynamic analysis of coastal region cultivated land landscape ecological security and its driving factors in Jiangsu WANG Qian, JIN Xiaobin, ZHOU Yinkang (5903)
- Landscape pattern gradient on tree canopy in the central city of Guangzhou, China ZHU Yaojun, WANG Cheng, JIA Baoquan, et al (5910)
- Research on dynamic changes of landscape structure and land use eco-security: a case study of Jiansanjiang land reclamation area LIN Jia, SONG Ge, SONG Siming (5918)
- Shangri-La county ecological land use planning based on landscape security pattern LI Hui, YI Na, YAO Wenjing, WANG Siqi, et al (5928)
- Changes of paddy field landscape and its influence factors in a typical town of south Jiangsu Province ZHOU Rui, HU Yuanman, SU Hailong, et al (5937)
- Species composition and succession of swamp vegetation along grazing gradients in the Zoige Plateau, China HAN Dayong, YANG Yongxing, YANG Yang, et al (5946)
- Characteristics and influence factors of the swamp degradation under the stress of grazing in the Zoige Plateau LI Ke, YANG Yongxing, YANG Yang, et al (5956)
- Variation of organic pollution in the last twenty years in the Qinzhou bay and its potential ecological impacts LAN Wenlu (5970)
- Response of radial growth Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) to climate factors in Wanxian Mountain of He'nan Province PENG Jianfeng, YANG Airong, TIAN Qinhua (5977)
- Vegetation and species diversity change analysis in 50 years in Tashan Mountain, Shandong Province, China GAO Yuan, CHEN Yufeng, DONG Heng, et al (5984)
- Effect of urban heat island on plant growth and adaptability of leaf morphology constitute WANG Yating, FAN Lianlian (5992)
- Effects of shading on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters in leaves of the endangered plant *Thuja sutchuenensis* LIU Jianfeng, YANG Wenjuan, JIANG Zeping, et al (5999)
- Effects of shading on growth and quality of triennial *Clematis manshurica* Rupr. HAN Zhongming, ZHAO Shujie, LIU Cuijing, et al (6005)
- Allelopathic effect of extracts from *Artemisia sacrorum* leaf and stem on four dominant plants of enclosed grassland on Yunwu Mountain WANG Hui, XIE Yongsheng, YANG Yali, et al (6013)
- Effects of soil base cation composition on plant distribution and diversity in coastal wetlands of Hangzhou Bay, East China WU Tonggui, WU Ming, YU Mukui, et al (6022)
- Species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi of *Stipa* L. in alpine grassland in northern Tibet in China CAI Xiaobu, PENG Yuelin, YANG Minna, et al (6029)
- Water consumption and annual variation of transpiration in mature *Acacia mangium* Plantation ZHAO Ping, ZOU Lvliu, RAO Xingquan, et al (6038)
- Foliar phenotypic plasticity of a warm-temperate shrub, *Vitex negundo* var. *heterophylla*, to different light environments in the field DU Ning, ZHANG Xiuru, WANG Wei, et al (6049)

An case study on vegetation stability in sandy desertification land; determination and comparison of the resilience among communities after a short period of extremely aridity disturbanc	ZHANG Jiyi, ZHAO Halin (6060)
Response of soil quality indicators to comprehensive amelioration measures in coastal salt-affected land	SHAN Qihua, ZHANG Jianfeng, RUAN Weijian, et al (6072)
Fine-scale spatial associations of <i>Stipa krylovii</i> and <i>Stellera chamaejasme</i> population in alpine degraded grassland	ZHAO Chengzhang, REN Heng (6080)
The response of community-weighted mean plant functional traits to environmental gradients in Yanhe river catchment	GONG Shihui, WEN Zhongming, SHI Yu (6088)
Ozone stress increases lodging risk of rice cultivar Liangyoupeijiu; a FACE study	WANG Yunxia, WANG Xiaoying, YANG Lianxin, et al (6098)
Effect of sugarcane//soybean intercropping and reduced nitrogen rates on sugarcane yield, plant and soil nitrogen	YANG Wenting, LI Zhixian, SHU Lei, et al (6108)
Effect of wetting duration on nitrogen fixation of biological soil crusts in Shapotou, Northern China	ZHANG Peng, LI Xinrong, HU Yigang, et al (6116)
Effects of zinc on the fruits' quality of two eggplant varieties	WANG Xiaojing, WANG Huimin, WANG Fei, et al (6125)
Rapid light-response curves of PS II chlorophyll fluorescence parameters in leaves of <i>Salix leucopithecia</i> subjected to cadmium-ion stress	QIAN Yongqiang, ZHOU Xiaoxing, HAN Lei, et al (6134)
Physiological Response of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. to Lead Stress by FTIR Spectroscopy	XUE Shengguo, ZHU Feng, YE Sheng, et al (6143)
Physiological response of <i>Zoysia japonica</i> to Cd ²⁺	LIU Junxiang, SUN Zhenyuan, JU Guansheng, et al (6149)
Biosorption of Cd ²⁺ using the fruiting bodies of two macrofungi	LI Weihuan, MENG Kai, LI Junfei, et al (6157)
Factors regulating recruitment of <i>Microcystis</i> from the sediments of the eutrophic Shanzai Reservoir	SU Yuping, LIN Hui, ZHONG Houzhang, et al (6167)
A new type of insect trap and its trapping effect on <i>Cyrtotrachelus buqueti</i>	YANG Yaojun, LIU Chao, WANG Shufang, et al (6174)
Photoperiod influences diapause induction of Oriental Fruit Moth(Lepidoptera: Tortricidae)	HE Chao, MENG Quanke, HUA Lei, et al (6180)
Influence of edge effects on arthropods communities in agroforestry ecological systems	WANG Yang, WANG Gang, DU Yingqi, et al (6186)
Dynamics of land use and its ecosystem services in China's megacities	CHENG Lin, LI Feng, DENG Huafeng (6194)
Comprehensive assessment of urban ecological risks; the case of Huaibei City	CHANG Hsiaoifei, WANG Rusong, LI Zhengguo, et al (6204)
The dynamics of surface heat status of Tangshan City in 1993—2009	JIA Baoquan, QIU Erfa, CAI Chunju (6215)
A projection-pursuit based model for evaluating the resource-saving and environment-friendly society and its application to a case in Wuhan	WANG Qianqian, ZHOU Jingxuan, LI Xiangmei, et al (6224)
Research on ecological barrier to Chang-Zhu-Tan metropolitan area	XIA Benan, WANG Fusheng, HOU Fangzhou (6231)
Optimization of urban land structure based on ecological green equivalent; a case study in Ningguo City, China	ZHAO Dan, LI Feng, WANG Rusong (6242)
Dynamic ecological footprint simulation and prediction based on ARIMA Model; a case study of Gansu Province, China	ZHANG Bo, LIU Xiuli (6251)
Review and Monograph	
A prospect for study on isolated wetland	TIAN Xuezhi, LIU Jiping (6261)
Dinoflagellate heterotrophy	SUN Jun, GUO Shujin (6270)
Research progress of microbial agents in ecological engineering	WEN Ya, ZHAO Guozhu, ZHOU Chuanbin, et al (6287)
The progress of ecological civilization construction and its indicator system in China	BAI Yang, HUANG Yuchi, WANG Min, et al (6295)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 31 卷 第 20 期 (2011 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 31 No. 20 2011

编 辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel:(010)62941099
www.ecologica.cn
Shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 冯宗炜
主 管 中国科学技术协会
主 办 中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085

Editor-in-chief FENG Zong-Wei
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

Published by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印 刷 北京北林印刷厂
发 行 科 学 出 版 社
地址:东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail:journal@espg.net

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China
Distributed by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel:(010)64034563
E-mail:journal@espg.net

订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱
邮政编码:100044

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China

广告经营
许 可 证 京海工商广字第 8013 号



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元