

三峡水库 156 m 蓄水前后澎溪河回水区藻类多样性变化特征*

李哲¹, 王胜¹, 郭劲松¹, 孙志禹², 陈永柏², 龙曼¹

(1: 重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

(2: 中国长江三峡集团公司, 宜昌 443002)

摘要: 为了解 156 m 蓄水前后三峡水库次级河流藻类多样性变化特征, 对 2007 年 7 月至 2008 年 1 月澎溪河回水区的藻类种群结构的变化进行连续监测. 基于三峡水库水位调度特点, 将监测期划分为蓄水前、中、后三个时段, 即 7-9 月、10 月、11 月至翌年 1 月, 应用 Shannon-Weaver 多样性指数 H' 对藻类多样性进行评价, 通过 Connell 中度扰动假说理论结合优势藻种探讨蓄水过程水动力变化及藻类多样性的变化特征. 结果表明: 2007 年 7-9 月蓄水前 H' 均值为 3.466 ± 0.317 , 10 月蓄水期则降为 3.246 ± 0.338 , 而 11 月蓄水后高水位阶段 H' 均值上升为 3.431 ± 0.352 . 蓄水前澎溪河回水区具有河流型特征, 流量与降雨作为主要的物理扰动因子影响水体扰动强度, 进而引起多样性变化. 10 月蓄水期间水位突升、流量骤降导致水体扰动强度加剧, 较蓄水前藻类多样性下降. 自 11 月蓄水后的高水位阶段, 降雨较小、流量趋于稳定, 水体扰动降低, 多样性回升并维持在相对稳定的状态.

关键词: 三峡水库; 澎溪河; 蓄水; 藻类; 多样性; 扰动

Phytoplankton diversity in backwater area of the Pengxi River in the Three Gorges Reservoir before and after 156 m impoundment

LI Zhe¹, WANG Sheng¹, GUO Jinsong¹, SUN Zhiyu², CHEN Yongbo² & LONG Man¹

(1: *Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China*)

(2: *China Three Gorges Cooperation, Yichang 443002, P. R. China*)

Abstract: In order to analyze the phytoplankton diversity in the backwater area of Pengxi River before and after the impoundment of the Three Gorges Reservoir (TGR) to the water level of 156 m, the variation of algae community of Pengxi River had been observed from July 2007 to January 2008. According to the water level variation in TGR, the time was divided into three periods: July-September, October and November-January. The algae diversity of five sites in Pengxi River was assessed using Shannon-Weaver diversity index H' . Moreover, the Connell's intermediate disturbance hypothesis was applied to analyze the impact on algae diversity caused by hydrodynamic conditions' variation during the impoundment process. Before 156 m impoundment, the mean H' index was 3.466 ± 0.317 , declined to 3.246 ± 0.338 in October and recovered to 3.431 ± 0.352 during the high water level period. Before impounding, the Pengxi River was of riverine-type, with flow and rainfall being the main physical disturbance factors affected the disturbance intensity and algae diversity. As a result of water level suddenly risen and the flow severely dropped, the disturbance intensity increased compared with the impounding period. After 156 m impounding, the Pengxi River was at the high water phase, the less rainfall and stable flow reduced the physical disturbance, so the H' index recovered and maintained at a relatively stable state.

Keywords: Three Gorges Reservoir; Pengxi River; impoundment; phytoplankton; diversity; disturbance

藻类多样性是藻类种群生态结构的重要特征, 其变化特征反映藻类种群对生境条件改变的生态响应, 亦被用来评价水生生态系统健康程度^[1-2]. 在影响藻类多样性的众多因素中, 物理扰动被认为是最主要的影

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2009ZX07104)、国家自然科学基金青年基金项目(51009155)、重庆市自然科学基金面上项目(CSTC2010BB0228)和中国长江三峡集团公司项目(CT-09-08-03)联合资助. 2010-10-29 收稿; 2011-08-11 收修改稿. 李哲, 男, 1981 年生, 副教授; E-mail: zheli81@sina.com.

响因子^[3,4]. 在特定时间下, 扰动影响着资源在生境中的分布状况, 从而改变优势藻种及物种多样性^[3,4].

三峡成库后, 库区局部支流回水区段生态健康问题备受关注. 由于三峡水库“蓄清排浑”的调度运行方式使得水位调蓄与天然径流过程相互交叠, 构造了兼具河流与湖泊双重特点的水文水动力特征^[5,6]. 前期研究主要关注于水库运行下水动力、营养盐、水体光热条件等关键环境要素, 以此探讨其对藻类种群组成、优势藻种及生物量的影响^[7,9]. 而蓄水过程引发水文水动力条件改变, 进而影响藻类种群结构和藻类多样性方面的研究鲜有报道.

笔者所在科研团队自 2006 年三峡 156 m 三期蓄水后对库区典型的澎溪河流域回水区段展开了持续野外定位跟踪观测. 本文以 2007 年 7 月至 2008 年 1 月期间, 145 ~ 156 m 蓄水全过程的跟踪观测为基础, 探讨蓄水前后水动力变化下支流回水区藻类多样性变化特征.

1 研究区域与采样测试

1.1 采样点设置

澎溪河流域(30°49' ~ 31°42'N, 107°56' ~ 108°54'E), 亦称小江, 面积 5173 km², 干流全长 182.4 km (图 1)^[10]. 本研究选择澎溪河流域 145 m 水位以下回水区段(全长约 40 km)作为研究区域, 在该区域中分别设置 5 个定常采样点(渠马渡口 QM、高阳平湖 GY、黄石镇 HS、双江大桥 SJ 以及小江河口 HK)(图 2). 各采样点均位于河道深泓线处, 每月 2 次采集各点位水深 0.5、1、2、3、5、8 m 处的水样, 时间控制在采样当日 09:30 ~ 16:30. 除现场测试指标外, 对上述各深度水样进行等量混合, 于 48 h 内完成其它指标的测定工作.

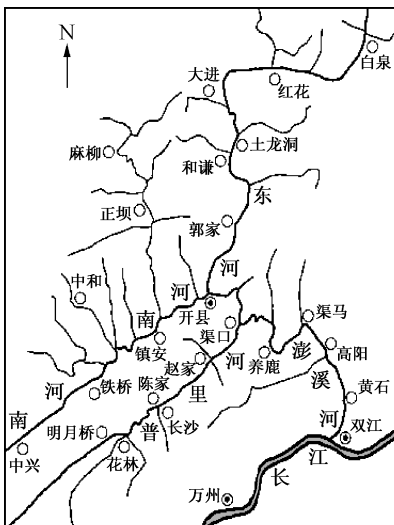


图 1 澎溪河流域水系图

Fig. 1 Drainage system of Pengxi River Watershed

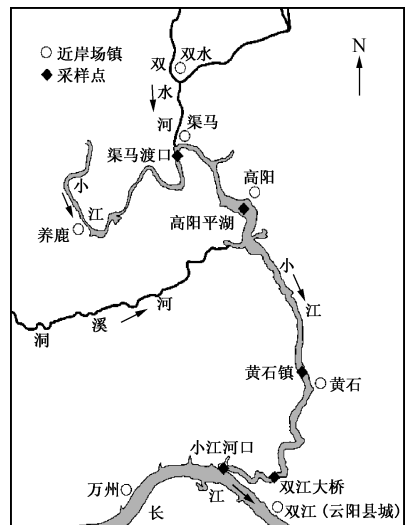


图 2 澎溪河回水区段采样布点

Fig. 2 Sampling sites of Pengxi River backwater area

1.2 测试方法与数据处理

2007 年 7 月至 2008 年 1 月分别采集 5 个监测点的藻类样品. 定性样品用 25# 浮游植物网在水面下作“∞”捞取, 滴加甲醛固定^[11]. 藻类定量样品为各深度水样现场滴加鲁哥氏剂固定, 取回实验室等量混合后取 1 L, 采用 48 h 静置沉淀方法浓缩至 30 ml 后进行藻种鉴定、计数. 藻类种类鉴定参照文献^[12-13], 藻细胞计数和生物量测算参照文献^[14].

物种多样性是指物种及其集合体的生物多样性, 通常包含物种的丰度、均匀度以及总体多样性等三层含义^[15]. 在藻类生态学研究, 总体多样性通常采用 Shannon-Weaver 指数 H' 进行表征, 其计算公式为^[16]:

$$H' = - \sum_{i=1}^s \frac{N_i}{N} \log_2 \frac{N_i}{N} \quad (1)$$

式中, N 为同一样品中的藻类总生物量, N_i 为第 i 个藻种的生物量, S 为物种数.

根据 2007 年 3 月至 2008 年 3 月间三峡坝前水位的实测结果(数据来源:中国长江三峡集团公司网站. <http://www.ctgpc.com.cn>), 三峡水库自 2007 年 5 月底进入汛期低水位运行状态(最低水位达到 144.99 m), 至 2007 年 9 月下旬开始进入蓄水阶段. 145 ~ 156 m 的蓄水过程从 9 月 25 日起(坝前水位 145.7 m), 于 10 月 20 日达到 155.0 m, 此后一直稳定在 155 ~ 156 m 之间, 并于 2008 年 1 月末开始逐步放水. 根据上述水库调度过程, 以 2007 年 7 月至 2008 年 1 月期间的蓄水过程为基础, 将该过程分为: 1) 蓄水前低水位运行阶段, 2007 年 7—9 月; 2) 蓄水期间, 2007 年 10 月; 3) 蓄水后高水位运行阶段, 2007 年 11 月上旬至 2008 年 1 月下旬(图 3). 另外, 研究期间澎溪河河口水位根据三峡大坝坝前水位和长江干流万州水文站水位实测日值进行推断, 其中澎溪河河口距三峡大坝约 247.0 km, 距万州站约 38.3 km.

2 结果与分析

2.1 蓄水期间藻类 Shannon-Weaver 指数变化特征

蓄水前后, 各断面藻类多样性指数 H' 呈现不同的变化趋势, 但均在较小的范围内变动且不具有显著差异性($P > 0.01$), 最大值为 9 月下旬河口, 为 4.153, 最小值则为 12 月下旬河口, 为 2.263. 蓄水前, H' 值呈先增后减的变化规律, 其均值为 3.466 ± 0.317 . 10 月蓄水中期, 不同断面间的 H' 指数均呈下降趋势, 均值降为 3.246 ± 0.338 . 自 11 月 156 m 蓄水后高水位阶段, H' 指数总体呈先减后增的变化趋势, 均值为 3.431 ± 0.352 , 较蓄水中期有所升高(图 4).

2.2 蓄水期间优势藻种变化特征

2007 年 7 月至 2008 年 1 月, 澎溪河回水区总计出现 6 门 14 属优势藻(以超过总生物量 10% 为评定标准), 分别为: 绿藻门 6 属——实球藻(*Pandorina*)、网球藻(*Dictyosphaerium*)、空球藻(*Eudorina*)、空星藻(*Coelastrum*)、浮球藻(*Planktosphaeria*)、集星藻(*Aclinastrum*); 蓝藻门 1 属——束丝藻(*Aphanizomenon*); 硅藻门 2 属——脆杆藻(*Fragilaria*)、直链藻(*Melosira*); 隐藻门 1 属——隐藻(*Cryptomonas*); 裸藻门 3 属——裸藻(*Euglena*)、囊裸藻(*Trachelomonas*)、扁裸藻(*Phacus*); 甲藻门 1 属——角甲藻(*Ceratium*). 蓄水前期, 澎溪河回水区总计出现 10 属优势藻, 在不同时期, 生物量最高的藻种差异较大, 7 月为隐藻(月均相对丰度 17.59%, 下同); 8 月为集星藻(15.99%); 9 月则为直链藻(20.18%)、实球藻(19.01%). 蓄水期间共出现 4 属优势藻, 其中角甲藻(24.78%)、网球藻(23.07%) 分别为相对生物量最高的优势藻种. 蓄水后澎溪河回水区共出现 5 属优势藻, 生物量最高的优势藻种分别为: 11 月隐藻(16.29%)、角甲藻(18.24%); 12 月隐藻(20.73%)、角甲藻(17.75%); 1 月为角甲藻(15.65%).

3 分析与讨论

三峡水库作为大型水利工程, 人为引起的水文条件变化与自然环境的正常更替共同存在, 两者相互叠加使得库区生境条件在蓄水前后发生明显改变. 根据笔者科研团队前期的工作积累^[17-18], 本研究认为蓄水前后整个澎溪河回水区藻类生境条件发生了 3 个阶段的变化:

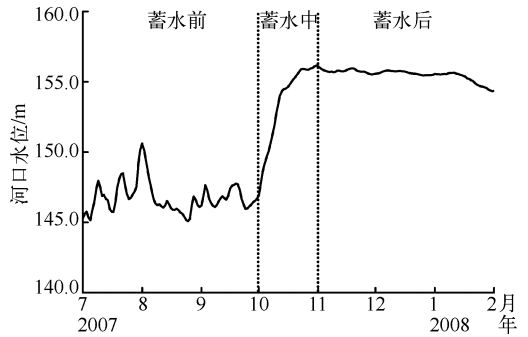


图 3 澎溪河河口水位变化

Fig. 3 Water level of the estuary of Pengxi River

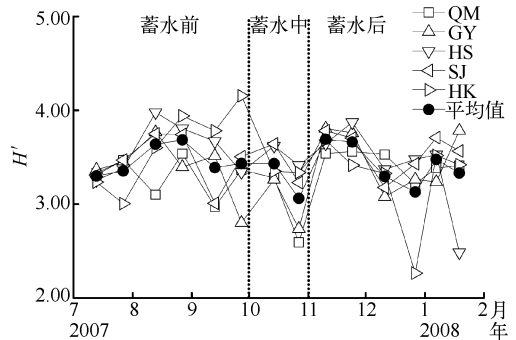


图 4 澎溪河回水区 H' 变化

Fig. 4 Variation of H' in backwater area of Pengxi River

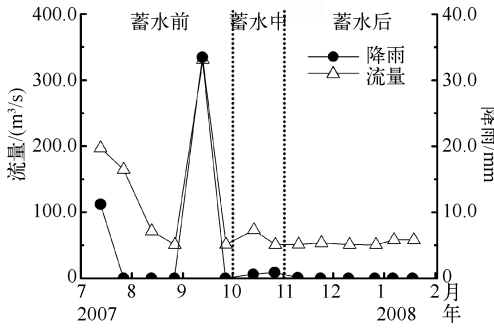


图5 澎溪河回水区流量、降雨变化

Fig. 5 Variation of flow and rainfall in Pengxi River

156 m蓄水完成后,水库处于156 m高水位运行阶段,其水动力状况较蓄水期间有较大差异,流速显著降低(< 0.05 m/s),库区支流呈现湖泊型河流特征.由于此时已进入秋冬季,太阳辐射强度和水温急剧下降,到1月下旬已分别降至 3 MJ/($\text{m}^2 \cdot \text{d}$)和 11°C [19].

根据上述3个阶段生境特征,笔者推测三峡水库的季节调蓄所构建的藻类生境变化过程很可能是藻类物种多样性改变的主要驱动因素.水生生态学中的中等扰动假设(Intermediate Disturbance Hypothesis, IDH)是由Connell在1978年提出的,其基本含义是在特定的时间尺度下,当种群在中等强度及频次的扰动下物种多样性将达到最大,而较低或较高强度和频次的扰动下,物种多样性将维持在较低水平 [21-23].根据中等扰动假设,当水体中一部分藻类开始生长但尚未达到优势时,生境条件的改变(即出现扰动)将创造出适宜于另一部分藻类生长的外部环境,促使其具备生长优势;而中等程度的扰动将迫使各种藻类都能适宜生长,但均无法维持持续充分的生长以形成绝对优势藻种,因此物种多样性将达到最大 [24].

蓄水前,集星藻、空星藻与直链藻是澎溪河中常见的优势藻种,分别属于J、P功能组藻种 [25],这与Paraná河流、Pomba河流夏季正常期的优势功能组相似 [26-27].集星藻、空星藻等J功能组藻种通常在混合均匀、光照充裕、营养物富集的浅水体中出现(包括小坡度河流);P功能组直链藻则在富营养化的表层水体中出现,在淡水湖泊中需要2~3 m以上的混合层深度环境 [25].澎溪河回水区在蓄水前具有河流型特征,流速较大水体扰动较强,水体混合较为均匀,符合J、P功能组生长所需生境特征.流量与降雨作为主要的物理扰动因子,影响着水体中的扰动强度 [28-29].7月较高的降雨与流量形成较强的扰动强度, H' 处于相对较低水平.随着7月降雨结束,8月较低的降雨与流量使得水体扰动强度逐渐降低, H' 向较高水平恢复.而9月的暴雨径流扰乱这一恢复过程,高流量变化迫使藻类生境处于强扰动的不稳定状态, H' 随即下降.

10月蓄水过程使得澎溪河藻类生境状态在相对短的时间尺度下从天然河道的急流状态转变成近似深水湖泊的缓流状态.澎溪河支流在蓄水过程中受干流水体倒灌及其顶托作用形成一定区域的回水区 [30],这一过程引起藻类生境的物理环境改变,水位突升、流量骤降导致水体扰动强度加剧,较之蓄水前藻类多样性不断下降.

自11月蓄水完成后,水库处于高水位运行并开始形成新的生境条件.整个蓄水后的冬季甲藻(L_M 功能组)、隐藻是(Y功能组)主要的优势藻类,这与Paraná河流秋冬季节的研究结果相一致 [31]. L_M 功能组常在夏季富营养化分层湖泊中占优,Y功能组则是湖泊水体中普适性藻种,尤其在浮游动物捕食压力较小的湖泊型水体中 [25].Y、 L_M 功能组藻种均出现在水体较为稳定的生境下,这与澎溪河回水区蓄水后的生境特征较为符合.在156 m高水位阶段,水库蓄水过程造成的大幅度生境扰动变化显著减弱,降雨较少,流量趋于稳定,水体扰动降低使得藻类生境较为稳定,物种多样性水平有所回升并维持在相对稳定的状态.

4 参考文献

[1] 蔡晓明. 生态系统生态学. 北京: 科学出版社, 2000.

1) 156 m蓄水前(2007年7—9月):整个库区处于降雨期,流量变化较大,具有河道型水库的水文特征(图5),而库区水位基本维持在145 m左右.7—9月正处于夏末秋初时期,太阳辐射强度高达 17 MJ/($\text{m}^2 \cdot \text{d}$),水温在8月上旬达到最高,已超过 30°C [19].

2) 蓄水中(2007年10月):自10月156 m蓄水开始后,库区水文情势发生较大变化,随着坝前水位的不断抬升,水库水位逐渐抬高,河段水面扩大,同时入江流量也因雨季结束逐渐减小(图5),水力停留时间延长 [20].与蓄水前相比,蓄水期间太阳辐射强度有所下降,10月份太阳辐射强度约为 8 MJ/($\text{m}^2 \cdot \text{d}$).由于此时邻近夏末,气温逐渐下降,10月底水温已经降至 22.0°C [19].

3) 蓄水后(2007年11月至2008年1月):待

- [2] Gao XL, Song JM. Phytoplankton distributions and their relationship with the environment in the Changjiang Estuary, China. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, **50**(3):327-335.
- [3] Sousa WP. Disturbance in marine intertidal boulder fields: non-equilibrium maintenance of species diversity. *Ecology*, 1979, **60**: 1225-1239.
- [4] Grime JP. Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory. *The American Naturalist*, 1977, **111**(892): 1169-1194.
- [5] 郭劲松,陈 杰,李 哲等. 156 m 蓄水后三峡水库小江回水区春季浮游植物调查及多样性评价. *环境科学*, 2008, **29**(10):2710-2715.
- [6] 李崇明,黄真理,张 晟等. 三峡水库藻类“水华”预测. *长江流域资源与环境*, 2007, **16**(1):1-6.
- [7] 李 哲,郭劲松,方 芳等. 三峡水库小江回水区不同 TN/TP 水平下氮素形态分布和循环特点. *湖泊科学*, 2009, **21**(4):509-517.
- [8] 张 呈,郭劲松,李 哲等. 三峡小江回水区透明度季节变化及其影响因子分析. *湖泊科学*, 2010, **22**(2):189-194.
- [9] 况琪军,周广杰,胡征宇. 三峡库区藻类种群结构与密度变化及其与氮磷浓度的相关性分析. *长江流域资源与环境*, 2007, **16**(2):231-235.
- [10] 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院. 三峡库区小江(澎溪河)流域生态环境综合整治工程可行性研究报告. 武汉:长江水利委员会长江勘测规划设计研究院, 2004:57-85.
- [11] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范:第 2 版. 北京:中国环境科学出版社, 1990:300-301.
- [12] 胡鸿钧,魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态. 北京:科学出版社, 2006:23-915.
- [13] 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, 1980:9-490.
- [14] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析. 北京:中国标准出版社, 2000:72-79.
- [15] Pielou EC. *Ecological diversity*. New York: John Wiley and Sons Ltd, 1975.
- [16] Shannon CE. *A mathematical theory of communication*. Urbana: University of Illinois Press, 1963:111-128.
- [17] 方 芳,周 红,李 哲等. 三峡小江回水区真光层深度及其影响因素分析. *水科学进展*, 2010, **21**(1):113-119.
- [18] 李 哲,方 芳,郭劲松等. 三峡小江回水区段 2007 年春季水华与营养盐特征. *湖泊科学*, 2009, **21**(1):36-44.
- [19] 李 哲,郭劲松,方 芳等. 三峡小江回水区蓝藻季节变化及其与主要环境因素的相互关系. *环境科学*, 2010, **31**(2):301-309.
- [20] 代文良,张 娜,蒲 菽等. 三峡库区 156 m 蓄水水文泥沙变化分析. *人民长江*, 2009, **40**(9):7-10.
- [21] Connell JH. Diversity in tropical rain forests and coral reefs: high diversity of trees and corals is maintained only in a non-equilibrium state. *Science*, 1978, **199**: 1302-1310.
- [22] Padisák J. The influence of different disturbance frequencies on the species richness, diversity and equitability of phytoplankton in shallow lakes. *Hydrobiologia*, 1993, **249**(1): 135-156.
- [23] Reynolds C, Padisák J, Sommer U. Intermediate disturbance in the ecology of phytoplankton and the maintenance of species diversity: a synthesis. *Hydrobiologia*, 1993, **249**(1): 183-188.
- [24] Weithoff G. The concepts of plant functional types and functional diversity in lake phytoplankton—a new understanding of phytoplankton ecology? *Freshwater Biology*, 2003, **48**(9): 1669-1675.
- [25] Reynolds CS. *Ecology of phytoplankton*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [26] Devercelli M. Changes in phytoplankton morpho-functional groups induced by extreme hydroclimatic events in the Middle Paraná River (Argentina). *Hydrobiologia*, 2010, **639**(1): 5-19.
- [27] Soares MCS, Huszar VLM, Roland F. Phytoplankton dynamics in two tropical rivers with different degrees of human impact (Southeast Brazil). *River Research and Applications*, 2007, **23**(7): 698-714.
- [28] ÁcsÉ, Kiss K. Effects of the water discharge on periphyton abundance and diversity in a large river (River Danube, Hungary). *Hydrobiologia*, 1993, **249**(1): 125-133.
- [29] Leitão M, Morata SM, Rodríguez S *et al.* The effect of perturbations on phytoplankton assemblages in a deep reservoir (Vouglans, France). *Hydrobiologia*, 2003, **502**(1): 73-83.
- [30] Roy AG, Bergeron N. Flow and particle paths at a natural river confluence with coarse bed material. *Geomorphology*, 1990, **3**(1): 99-112.
- [31] Borges PAF, Train S, Rodrigues LC. Spatial and temporal variation of phytoplankton in two subtropical Brazilian reservoirs. *Hydrobiologia*, 2008, **607**(1): 63-74.