

熊河水库浮游植物群落结构的周年变化

张 婷^{1,2}, 李 林¹, 宋立荣^{1,*}

(1. 中国科学院水生生物研究所 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 湖南农业大学动物科学技术学院, 长沙 410128)

摘要: 自 2007 年 5 月至 2008 年 4 月对湖北省枣阳市熊河水库的浮游植物群落进行调查和分析。调查共发现浮游植物 49 属 74 种, 绿藻在种类组成上占绝对优势, 共 40 种, 其次为蓝藻, 有 15 种, 硅藻 11 种, 甲藻 3 种, 金藻和裸藻各 2 种, 隐藻仅 1 种。蓝藻存在夏季(7 月)高峰, 优势种为卷曲鱼腥藻(*Anabaena circinalis*); 硅藻、隐藻和甲藻均存在一个春季(3 或 4 月)高峰, 优势种分别为双头针杆藻(*Synedra amphicephala*)、羽纹脆杆藻(*Fragilaria pinnata*)、卵形隐藻(*Cryptomonas ovata*)和二角多甲藻(*Peridinium bipes*)。Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数的年平均值分别是 0.60、2.20、0.76 和 1.15。多样性指数和均匀度指数具有明显的季节变化规律, 但无明显的空间分布规律。

关键词: 浮游植物; 种类组成; 丰度; 周年变化; 熊河水库

文章编号: 1000-0933(2009)06-2971-09 中图分类号: Q145, Q178, Q948.8 文献标识码: A

Annual dynamics of phytoplankton abundance and community structure in the Xionghe Reservoir

ZHANG Ting^{1,2}, LI Lin¹, SONG Li-Rong^{1,*}

1 State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China

2 College of Animal Science and Technology, Hunan Agriculture University, Changsha 410128, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 2971 ~ 2979.

Abstract: In this study, phytoplankton abundance and community structure were investigated and analyzed from May 2007 to April 2008 in the Xionghe Reservoir, which is located in the Hubei Province of China. A total of 74 phytoplankton species, belonging to 49 genera were identified, consisting of 40 species of green algae, 15 species of blue-green algae, 11 species of diatoms, 3 species of dinoflagellates, 2 species of both golden algae and euglenoids, and only 1 species of cryptomonad. Blue-green algae peaked in July, dominant by *Anabaena circinalis*. Diatoms, the cryptomonad and dinoflagellates peaked in March, April, April, respectively. Dominant species of diatoms were *Synedra amphicephala* and *Fragilaria pinnata*, while that of the cryptomonad and dinoflagellates were *Cryptomonas ovata* and *Peridinium bipes*, respectively. The annual average values of diversity indices (D , H'), evenness (J) and abundance (D_m) of phytoplankton were 0.60, 2.20, 0.76, 1.15, respectively. The annual variations of diversity indices (D , H') and evenness (J) of phytoplankton showed a clear seasonal pattern, but no clear spatial pattern.

Key Words: phytoplankton; species composition; abundance; annual dynamics; Xionghe Reservoir

浮游植物是淡水生态系统中重要的初级生产者, 在淡水生态系统的能量流动、物质循环和信息传递中起着至关重要的作用^[1~3]。因此, 研究一个水库的浮游植物群落结构是了解该库区生态系统结构的基础。浮游

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(20807055); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2008CB418000); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-426)

收稿日期: 2008-12-18; 修订日期: 2009-03-24

致谢: 感谢熊河水库管理处对样品采集的支持与配合。

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lrsong@ihb.ac.cn

植物种类组成、数量分布以及丰度通常呈季节性变化,是浮游植物群落动态的重要特征,也是判断水体富营养化程度的关键指标之一^[4,5]。由于存在地域和水体类型差异,不同水体的浮游植物群落结构具有不同的动态特点^[6,7]。水库作为一类受人为调节的水体,其浮游植物群落的组成和动态存在较大的个体差异^[8,9]。

熊河水库位于湖北省枣阳市西南 25 km、熊集镇南 3 km 处,东经 112°36′~42′、北纬 31°50′~55′ 之间,属于亚热带水库。水库承雨面积 314.5 km²,总库容 2.54 × 10⁸ m³,兴利库容 1.16 × 10⁸ m³,死库容 0.2 × 10⁸ m³,是一座以防洪为主结合供水、渔业、灌溉、旅游等综合利用的大(II)型水库。自 2005 年来,该水库多次暴发严重的蓝藻水华,直接影响了水库功能的正常发挥。本文旨在研究亚热带水库中浮游植物群落结构的周年变化规律,为亚热带水库的科学合理利用提供技术参数,为蓝藻水华预警预报系统建立和富营养化防治对策研究提供基础资料和科学依据。

1 材料和方法

1.1 采样样点设置与采样时间

在熊河水库选取了 3 个采样样点(图 1),即 A 样点(N 31°55′45.4″, E 112°38′40.6″;主坝近岸边)、B 样点(N 31°55′25.2″, E 112°39′17.3″;水厂取水口)和 C 样点(N 31°53′53.5″, E 112°40′28.9″;水库中心),于 2007 年 5 月至 2008 年 4 月每月进行采样分析。

1.2 采样与分析方法

浮游植物定性样品采用 25# 浮游生物网(网孔直径为 64 μm)在水面表层呈“∞”字形缓慢捞取浮游植物样品,并将网内浓缩液置于 100 ml 塑料水样瓶中,现场用鲁哥氏液固定,带回实验室镜检分类。浮游植物定量样品用有机玻璃采水器采集 0.5 m 水深处的表层水,取 1 L 水样置于广口塑料瓶(1 L)中,现场用鲁哥氏液固定。样品带回实验室后静置沉降 24h 以上,沉淀浓缩后计数。

1.3 数据处理与分析

1.3.1 α 多样性的分析^[10,11]

(1) 多样性指数

$$\text{Shannon-Wiener 指数} \quad H' = - \sum_{i=1}^s p_i \ln p_i$$

$$\text{Simpson 指数} \quad D = 1 - \sum_{i=1}^s p_i^2$$

(2) 丰富度指数

$$\text{Margalef 指数} \quad D_m = (S - 1) / \ln N$$

(3) 均匀度指数

$$\text{Pielou 指数} \quad J = H' / \ln S$$

式中, $p_i = n_i / N$, n_i 为 i 种的个体数, N 为所有种类总个体数, S 为物种数。 H' 值 0~1 为重污, 1~3 为中污(其中 1~2 为 α -中污, 2~3 为 β -中污), >3 为轻污或无污^[12]。

1.3.2 优势种的确定^[13~15]

全年调查浮游植物的优势种根据每个种的优势度值 (Y) 来确定:

$$Y = (n_i / N) \times f_i$$

式中, n_i 为 i 种的个体数, N 为所有种类总个体数, f_i 为第 i 种出现的频率。 Y 值大于 0.02 的种类为全年调

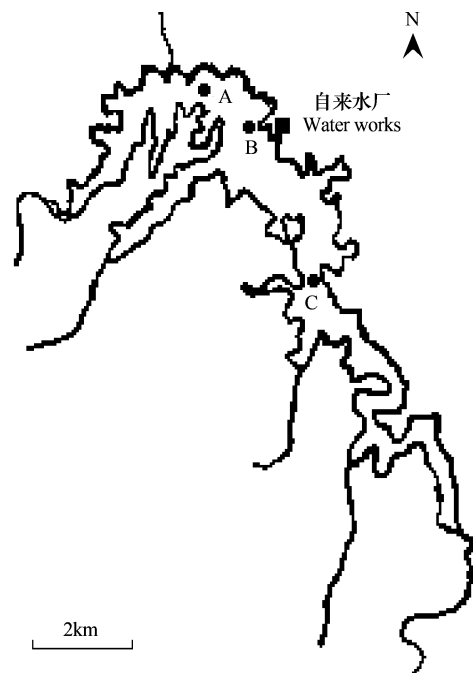


图 1 熊河水库采样样点示意图

Fig. 1 Sampling sites in the Xionghu Reservoir

查的优势种。

1.3.3 统计分析

本研究数据分析和图表绘制在 Origin Version 6.1 (OriginLab 公司, 美国)中进行。

2 结果和分析

2.1 浮游植物的种类组成

一周年定期在 3 个样点(图 1 中 A、B、C)所采得的浮游植物,共检查到蓝藻门(Cyanophyta)、绿藻门(Chlorophyta)、硅藻门(Bacillariophyta)、隐藻门(Cryptophyta)、甲藻门(Pyrrophyta)、裸藻门(Euglenophyta)和金藻门(Chrysophyta)等 7 个门类,共计 49 属 74 种。其中,以绿藻的种类数最多,25 属 40 种;其次是蓝藻,10 属 15 种;硅藻的种类数位居第 3,8 属 11 种;甲藻 2 属 3 种,金藻 2 属 2 种,裸藻 1 属 2 种,隐藻仅 1 属 1 种。各门浮游植物种类数所占比例见图 2。

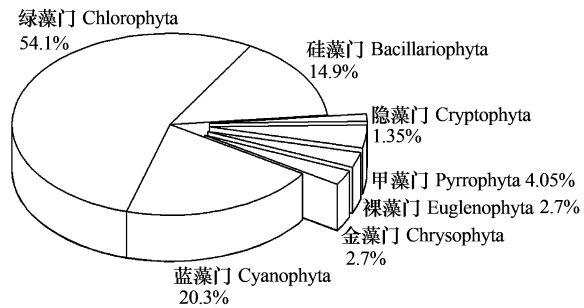


图 2 熊河水库浮游植物种类组成
Fig.2 Phytoplankton species composition in the Xionghe Reservoir

绿藻和蓝藻的种类组成变化相对较大,是引起熊河水库浮游植物群落结构变化的主要原因之一。绿藻种类数在 9 月(34 种)最多,2 月最少(9 种);蓝藻种类数最多出现在 10 月(15 种),同样 2 月最少(3 种)。硅藻的种类组成变化较小,所出现的种类绝大多数常年均有出现。甲藻在我国淡水水体中的常见种类不多,熊河水库中仅见二角多甲藻(*P. bipes*)、多甲藻(*Peridinium* sp.)和角甲藻(*C. hirundinella*)3 个种类,其中二角多甲藻(*P. bipes*)几乎常年可见。隐藻门仅见卵形隐藻(*C. ovata*)一种,除水温低于 10℃ 的 1 月份和 2 月份,其余各月均可检测出其存在。而金藻门的种类仅出现于冬季和春季,偶尔可见群体的散歧锥囊藻(*D. divergens*)和黄群藻(*S. uvella*)。水库表层水中出现的绿色裸藻(*E. viridis*)和血红裸藻(*E. sanguinea*)为浮游的单细胞种类,数量不多,偶尔出现。熊河水库浮游植物的属数和种类数的周年变化详见表 1。监测期间绿藻属数和种类数始终占首位,蓝藻位居第二,根据浮游植物组成特点划分,熊河水库属于绿藻-蓝藻型水库^[5,16,17]。

表 1 熊河水库浮游植物的属数(G_N)与种类数(S_N)
Table 1 Numbers of genera (G_N) and species (S_N) of phytoplankton in the Xionghe Reservoir

月份 Month		蓝藻门 Cyanophyta	绿藻门 Chlorophyta	硅藻门 Bacillariophyta	隐藻门 Cryptophyta	甲藻门 Pyrrophyta	裸藻门 Euglenophyta	金藻门 Chrysophyta	合计 Total
5	G_N	5	9	6	1	—	—	—	21
	S_N	7	11	8	1	—	—	—	27
6	G_N	7	13	4	1	2	1	—	28
	S_N	9	24	6	1	2	1	—	43
7	G_N	9	16	5	1	2	—	—	33
	S_N	14	28	8	1	3	—	—	54
8	G_N	8	10	5	1	2	—	—	26
	S_N	10	15	7	1	2	—	—	35
9	G_N	8	19	7	1	1	1	—	37
	S_N	11	34	9	1	1	1	—	57
10	G_N	10	18	7	1	1	1	—	38
	S_N	15	33	10	1	2	2	—	63
11	G_N	9	14	6	1	1	1	—	32
	S_N	11	18	8	1	1	1	—	40
12	G_N	8	12	5	1	1	—	1	28
	S_N	10	15	7	1	1	—	1	35
1	G_N	5	10	4	—	1	1	—	21
	S_N	6	11	6	—	1	1	—	25
2	G_N	2	7	3	—	1	1	1	15
	S_N	3	9	5	—	1	1	1	20
3	G_N	7	11	5	1	1	1	1	27
	S_N	8	14	7	1	2	2	1	35
4	G_N	6	10	4	1	1	1	1	24
	S_N	8	14	6	1	2	2	1	34

2.2 浮游植物细胞密度的周年动态和水平分布

2007~2008 年浮游植物细胞密度的年平均组合百分比(表 2)显示:蓝藻占绝对优势,其平均值高达 91.45%;其次为硅藻,约 3.84%;绿藻居第三,约 2.80%。从水平分布来看,位于沿岸带的 A 点和 B 点具有相似的浮游植物平均组合百分比,而位于库区中心、相对上游部位的 C 点则与前两者存在一定差异:蓝藻比例相对减小,其它门类有所增大。由此推测,风力和水流方向可能是库区浮游植物细胞密度水平分布差异的主要物理因素之一。

表 2 浮游植物的年平均组合百分比(%)

Table 2 Annual average percentage composition of phytoplankton

项目 Item	蓝藻门 Cyanophyta	绿藻门 Chlorophyta	硅藻门 Bacillariophyta	隐藻门 Cryptophyta	甲藻门 Pyrrophyta	裸藻门 Euglenophyta	金藻门 Chrysophyta
A 样点 SiteA	92.36	2.69	3.65	1.04	0.19	0.02	0.05
B 样点 SiteB	93.04	2.31	3.30	1.09	0.19	0.02	0.04
C 样点 SiteC	88.96	3.40	4.58	1.48	1.48	0.08	0.02
平均值 Avg.	91.45	2.80	3.84	1.20	0.62	0.04	0.04

在熊河水库中,不仅浮游植物的种类组成随季节变化而变化,而且其细胞密度的周年动态也具有明显的季节性(图 3)。夏季日照强烈,水温达到全年最高值(30°C, 7 月份),喜高温的蓝藻大量繁殖,细胞密度增至全年峰值(1.52×10^8 cells/L),此次峰值的出现与卷曲鱼腥藻水华(7.13×10^7 cells/L)大规模暴发紧密相关;秋季阳光减弱,水温日趋下降,蓝藻开始衰落,细胞密度呈减少趋势;冬季日照最短,阳光弱、水温低,蓝藻的细胞密度降至最低值(2.48×10^5 cells/L);春季日照增强,水温日渐上升,蓝藻开始复苏,细胞密度呈增加趋势。研究表明,蓝藻细胞密度越高,水体富营养化程度也越高^[18]。由此可见,7 月的熊河水库水体富营养化程度相对较高。

库区中绿藻的周年动态不如蓝藻季节性强,且 3 个样点间存在一定差异:B 点和 C 点处绿藻细胞密度与蓝藻相同在 8 月显著降低,但 A 点处反而增至全年峰值(2.01×10^6 cells/L);B 点全年峰值(1.30×10^6 cells/L)出现在 4 月,C 点则在 2 月(1.60×10^6 cells/L);3 个样点处绿藻细胞密度均于 1 月呈波谷状态。隐藻的周年动态具较强的季节性,春季大量繁殖(峰值 1.57×10^6 cells/L 出现在 4 月份),夏、秋季相对减少,在水温低于 10°C 的冬季几乎完全消失。

硅藻在 3 个样点的周年变化趋势基本一致,细胞密度于 3 月达到全年峰值(3.34×10^6 cells/L),主要为针杆藻和脆杆藻。水库中甲藻的细胞密度通常较低,但在硅藻水华刚刚消退的 4 月份 3 个样点成 10~30 倍增长,导致库区水体呈红褐色。有研究表明,甲藻水华之前的硅藻水华可能会消耗并减少一种或更多的无机营养到适于甲藻生长的浓度,但此浓度对硅藻生长而言又过低;同时,有机营养如维生素 B₁₂(对甲藻生长很重要)又可被硅藻产生,从而使得甲藻成为优势类群^[19]。由此可见,库区甲藻水华的出现可能与 3 月暴发的硅藻水华有关。裸藻和金藻的细胞密度较低,其出现与消失对浮游植物群落动态影响不大。

总的来说,熊河水库浮游植物细胞丰度季节变化明显:从 5 月份硅藻优势过渡到 6 月份绿藻优势,7 月至翌年 1 月为蓝藻优势,但蓝藻优势程度逐月减弱,2~3 月份再次更替为硅藻优势,4 月份为蓝藻-甲藻优势。熊河水库所在地属亚热带大陆性季风气候,四季分明,水温可能是浮游植物生长和群落演替过程中的主要限制因子之一。

2.3 浮游植物的优势种

经统计学分析,熊河水库全年调查浮游植物的优势种为蓝藻门的纤细席藻(*P. tenue*)、伪鱼腥藻(*Pseudanabaena* sp.)和卷曲鱼腥藻(*A. circinalis*),以及硅藻门的双头针杆藻(*S. amphicephala*)和羽纹脆杆藻(*F. pinnata*),各种类的优势度值(*Y*)见表 3。但卷曲鱼腥藻(*A. circinalis*)、伪鱼腥藻(*Pseudanabaena* sp.)和另外 3 个种类在数量上存在不同的变化特点:卷曲鱼腥藻(*A. circinalis*)主要出现在 7 月份,伪鱼腥藻

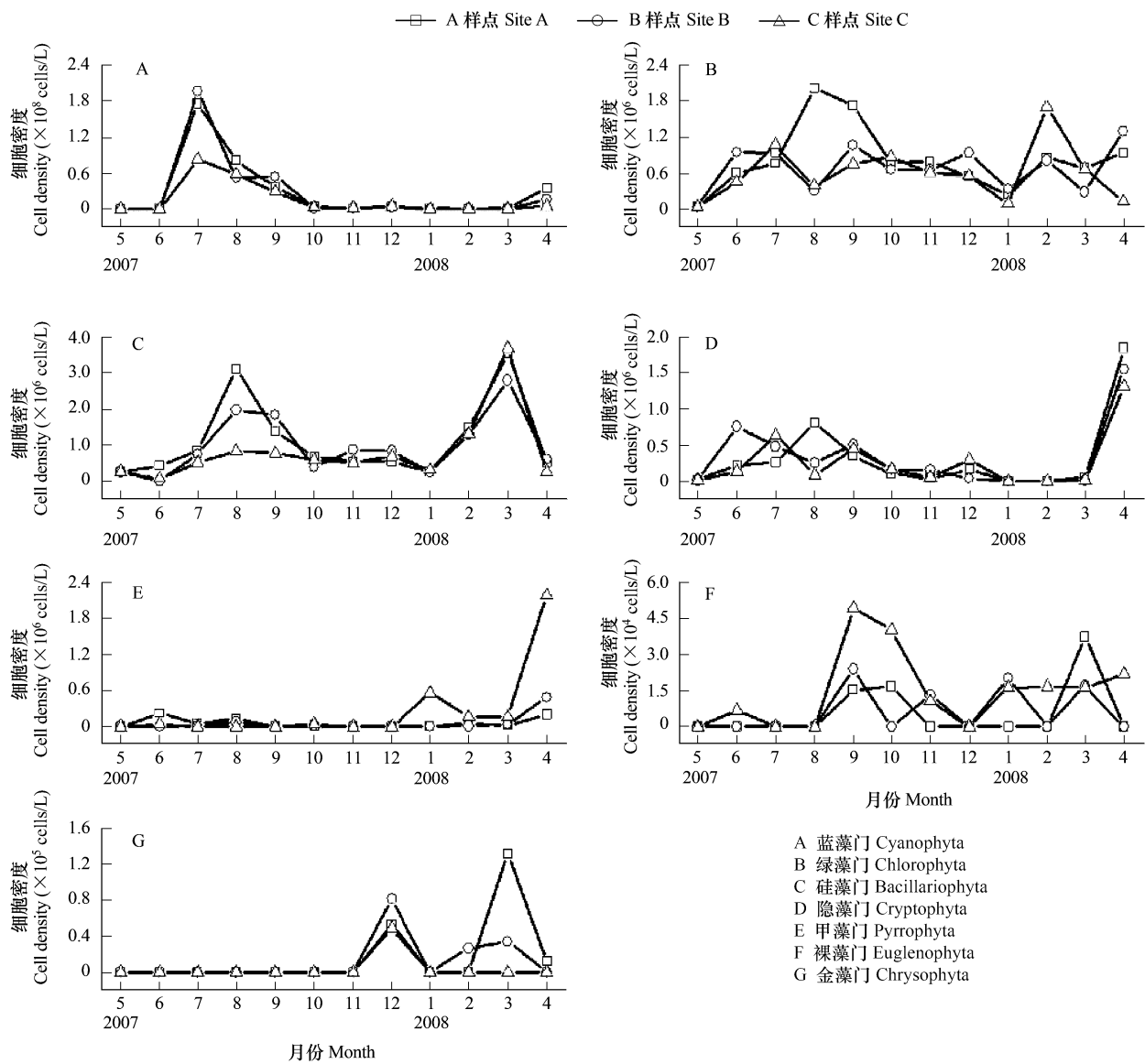


图 3 熊河水库浮游植物丰度的周年变化
Fig. 3 Annual variations of phytoplankton abundances in the Xionghe Reservoir

(*Pseudanabaena* sp.) 主要出现在 3 月和 4 月份,而其它优势种则全年均有出现。此外,虽然有些种类的优势度值(Y)小于 0.02,但其全年出现频率较高,如四尾栅藻(*S. quadricauda*)、颗粒直链藻(*M. granulata*)、卵形隐藻(*C. ovata*)和二角多甲藻(*P. bipes*),分别达到 80.56%、80.89%、83.33%、77.78%。

2.4 多样性分析

2.4.1 浮游植物多样性的周年变化

Simpson 多样性指数(D)、Shannon-Wiener 多样性指数(H')和 Pielou 均匀度指数(J)表现出一致的周年变化趋势(如图 4 所示),三者的周年变化范围分别是 0.09~0.90、0.41~3.97 和 0.15~1.23,其年平均值分别为 0.60、2.20 和 0.76。从全年来看,多样性指数(D 、 H')和均匀度指数(J)均显示出明显的季节差异:夏季来临,各指数开始降低,并于 8 月份达到最低

表 3 熊河水库浮游植物的优势种

Table 3 Dominant species of phytoplankton in the Xionghe Reservoir

优势种 Dominant species	优势度值 Y
蓝藻门 Cyanophyta	纤细席藻 <i>P. tenue</i> 0.58
	伪鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i> sp. 0.06
	卷曲鱼腥藻 <i>A. circinalis</i> 0.07
硅藻门 Bacillariophyta	双头针杆藻 <i>S. amphicephala</i> 0.03
	羽纹脆杆藻 <i>F. pinnata</i> 0.03

值;夏季过后,数值逐渐回升至春末夏初时的水平,并延续到整个冬季;当春季到来后,各指数再次呈降低趋势。综上所述,在4个季节中夏季的多样性指数和均匀度都低于其它季节。一般而言,种类越多或各个种的个体数量分布越均匀,群落物种的 Shannon-Wiener 多样性指数(H')越大^[20,21]。表1显示,熊河水库夏季浮游植物种类数远多于冬季。由于均匀度反映的是群落内各物种分布的均匀程度^[22],那么夏季较低的均匀度可能是引起多样性指数低的主要原因之一。

Margalef 丰富度指数(D_m)的周年变化范围为0.56~1.91,年平均值为1.15。与多样性指数(D , H')和均匀度(J)相比,丰富度指数(D_m)存在显著不同的季节变化规律:在冬季,丰富度指数呈逐渐降低趋势,并于2月份达到最低值;而在春、夏、秋三季,数值则均存在反复波动现象。冬季水温低,阳光照射弱,不适宜浮游植物生长,这可能是浮游植物丰富度在冬季日渐降低的主要诱因。

多样性指数是反映均匀度和丰富度的综合指标^[23]。本研究还显示,熊河水库浮游植物的 H' 值与 J 值在 A、B、C 3 样点处均存在显著正相关关系,相关系数分别为0.943($P < 0.001$)、0.951($P < 0.001$)和0.910($P < 0.001$),但 H' 值与 D_m 值的相关性则均不显著($P > 0.05$)。由此可见,在熊河水库中浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数(H')对丰富度(D_m)并不敏感,其浮游植物群落多样性增高(如冬季)主要是由物种均匀度增加所致,故均匀度(J)对多样性贡献显著。多样性与均匀度间存在的这种密切关系在许多生态过程中均有所体现,如竞争、捕食、演替等都能够通过改变 J 值来改变 H' 值,而不会改变物种的丰富度^[24]。

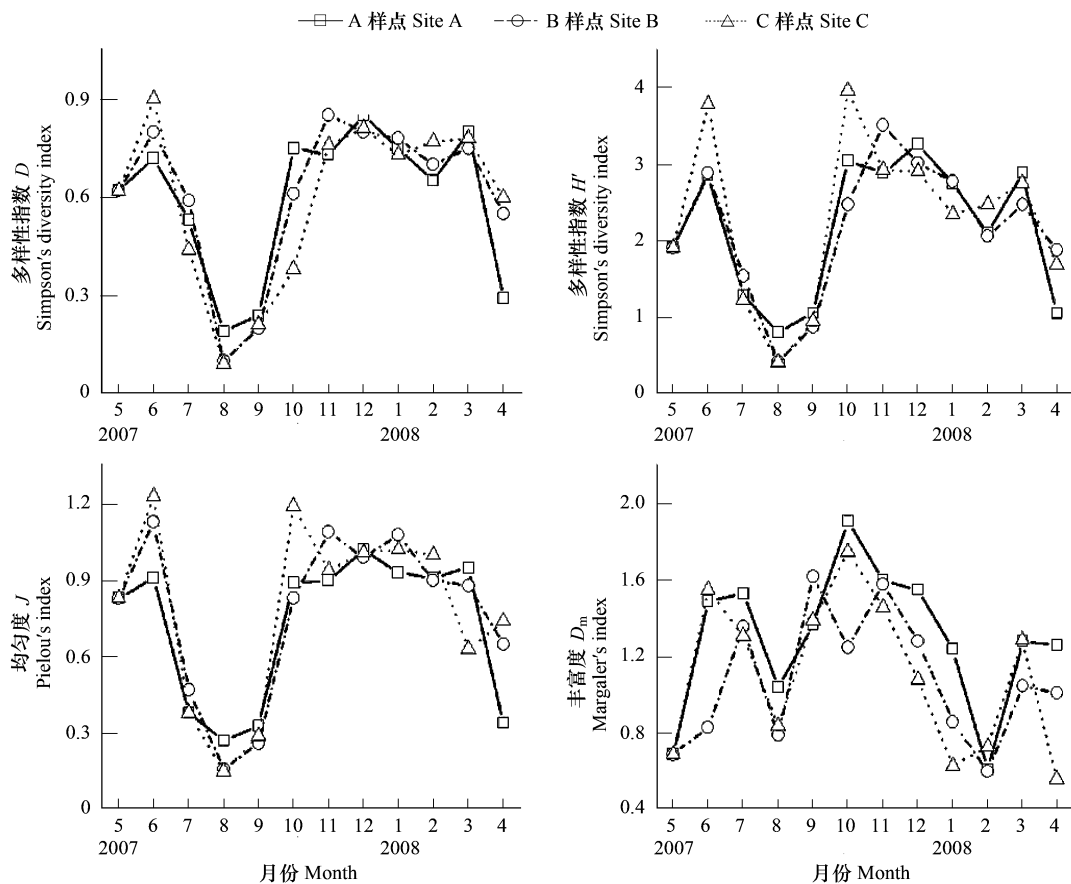


图4 熊河水库浮游植物多样性指数(D , H')、均匀度(J)和丰富度(D_m)的周年变化

Fig. 4 Annual variations of diversity indices (D , H'), evenness (J) and abundance (D_m) of phytoplankton in the Xionghe Reservoir

2.4.2 浮游植物多样性的空间分布

从全年来看, Simpson 多样性指数(D)的年平均值在 A、B、C 3 样点处接近相同;而 Shannon-Wiener 多样性指数(H')的年平均值则略有不同, C 点稍高于 A 点和 B 点,但差值不大;对均匀度(J)和丰富度(D_m)而言, A

点的均匀度微低于 B 点和 C 点,但其丰富度则略高于 B 点和 C 点(表 4)。另一方面,每月调查数据显示:浮游植物多样性指数(D , H')、均匀度(J)和丰富度(D_m)在 A、B、C 3 样点处基本保持相似的变化趋势,仅在个别月份中略有差异,主要体现在 6 月份和 10 月份(见图 4)。但总体而言,浮游植物多样性在熊河水库的 3 个样点间不存在显著性差异。

表 4 熊河水库浮游植物多样性指数(D , H')、均匀度(J)和丰富度(D_m)的年平均值

Table 4 Annual average values of diversity indices (D , H'), evenness (J) and abundance (D_m) of phytoplankton in the Xionghu Reservoir

	多样性指数 Diversity index D	多样性指数 Diversity index H'	均匀度 Evenness J	丰富度 Abundance D_m
A 样点 SiteA	0.59	2.16	0.72	1.30
B 样点 SiteB	0.61	2.15	0.77	1.08
C 样点 SiteC	0.59	2.28	0.78	1.08

2.4.3 生物多样性指数评价

物种多样性是衡量群落规模和重要性的基础,也是水体营养状况信息反映的重要参数^[25]。因而,浮游植物的多样性指数也就成为判断湖泊水库营养状况最常用的检测指标^[16]。浮游植物多样性指数值越小,说明水质污染程度越严重^[26,27]。对调查期间熊河水库各样点的浮游植物多样性进行分析,结果显示 A、B、C 3 个样点处 H' 值介于 2~3 之间,故判断库区水质为 β -中污染类型。比较各样点处的 H' 值发现,虽然各 H' 值之间略有差异,但差值并不显著。由此说明,熊河水库各样点的水质营养状况虽略有差异,但整体水平相当。

多样性指数和水质的关系复杂,受水体类型、计数方法和鉴定种类等因素影响^[3]。为确保评价结果的可信性,可至少选用 2 种或 2 种以上的指标来评价水质^[16]。浮游植物的细胞密度也是水质评价的重要参数之一^[12]。熊河水库浮游植物细胞密度年平均值为 2.62×10^7 cells/L,介于 $10 \times 10^6 \sim 40 \times 10^6$ cells/L。参照况琪军等^[16]和高远等^[28]利用浮游植物细胞密度评价水质的标准,该水库水质可定为 β -中污染类型。这与利用多样性指数评价水质的结果一致,证实了本评价结果的可靠性。

当然,上述评价结果是熊河水库水质状况的年度综合体现。尽管库区水质总的营养程度为中营养,但是夏季蓝藻数量大、水华频发的现象也不容忽视。应当引起政府管理部门的高度重视,并且能够积极采取相应措施,如在春季藻类复苏期间,采用一定方法清除水华蓝藻的种源,减轻夏季蓝藻水华压力,从而达到预防蓝藻水华大规模发生和防止水质恶化的目的。此外,熊河水库中投放有大量鳙鱼和少量鲢鱼,鳙鱼以滤食浮游动物为主,而鲢鱼则主要滤食浮游植物,具有控藻的作用。故也可适当调整鲢、鳙的投放比例,减少鳙鱼放养量,以便充分发挥浮游动物的控藻作用,从而实现水库资源利用与水环境间的协调发展。

3 结论

(1) 2007 年 5 月至 2008 年 4 月熊河水库浮游植物鉴定出 49 属 74 种。其中,绿藻属数和种类数始终占首位,蓝藻居第二。二者种类组成年度变化相对较大,是引起库区浮游植物群落结构变化的主要原因之一。

(2) 熊河水库浮游植物细胞丰度季节变化明显,有硅藻优势(5 月份),到绿藻优势(6 月份),到蓝藻优势(7 月~翌年 1 月份),到硅藻优势(2~3 月份)和蓝藻-甲藻优势(4 月份)这样一个变化过程。水温可能是浮游植物生长和群落演替过程中的主要限制因子之一。

(3) 浮游植物优势种为纤细席藻(*P. tenue*)、伪鱼腥藻(*Pseudanabaena* sp.)、卷曲鱼腥藻(*A. circinalis*)、双头针杆藻(*S. amphicephala*)和羽纹脆杆藻(*F. pinnata*),不同季节既有交叉又有演替。

(4) 熊河水库夏季的多样性指数(D , H')和均匀度(J)都低于其它季节,较低的均匀度可能是引起多样性指数低的主要原因之一。Margalef 丰富度指数(D_m)在冬季呈逐渐降低趋势,而在其它季节均存在反复波动现象。虽然多样性指数具明显的季节性变化,但无明显的水平分布规律。

(5) 选用浮游植物多样性指数和细胞密度 2 种指标评价水质,评价结果一致,即熊河水库各样点的水质营养状况基本相当,为 β -中污染类型。

References:

- [1] Li D H, Li G B, Wang G H, *et al.* Effect of water bloom-forming cyanobacterial bio-substances on the growth of submerged macrophyte *Ceratophyllum oryzetorum* Kom. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2007, 31(5): 689—692.
- [2] Zhang T, Song L R. Allelopathic effect between *Microcystis aeruginosa* and three filamentous cyanobacteria. *Journal of Lake Sciences*, 2006, 18(2): 150—156.
- [3] Sun J, Liu D Y. The application of diversity indices in marine phytoplankton studies. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, 26(1): 62—75.
- [4] Zhao M X, Lei L M, Han B P. Seasonal change in phytoplankton communities in Tangxi Reservoir and the effecting factors. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2005, 13(5): 386—392.
- [5] Xu J H, Pan W B, Zhang H Y. Studying on planktonic algae and characteristics of water quality of some small and adlittoral artificial lake in the city zone. *Ecologic Science*, 2007, 26(1): 36—40.
- [6] Figueredo C C, Giani A. Seasonal variation in the diversity and species richness of phytoplankton in a tropical eutrophic reservoir. *Hydrobiologia*, 2001, 445: 165—174.
- [7] Negro A I, Hoyos C D, Vega J. Phytoplankton structure and dynamics in Lake Sanabria and Valparaiso reservoir (NW Spain). *Hydrobiologia*, 2000, 424: 23—37.
- [8] Lin X, Chen M R, Han B P. Species composition and spatio-temporal distribution of phytoplankton in Henggang Reservoir. *Ecological Science*, 2007, 26(4): 303—310.
- [9] Han B P, Armengol J, Garcia J C, *et al.* The thermal structure of Sau Reservoir (Spain NE): A simulation approach. *Ecological Modelling*, 2000, 125: 109—122.
- [10] Belaoussoff S, Kevan P G, Murphy S, *et al.* Assessing tillage disturbance on assemblages of ground beetles (Coleoptera: Carabidae) by using a range of ecological indices. *Biodiversity and Conservation*, 2003, 12: 851—882.
- [11] Hunter P R, Gaston M A. Numerical index of the discriminatory ability of typing systems: an application of Simpson's index of diversity. *Journal of Clinical Microbiology*, 1988, 26(11): 2465—2466.
- [12] Guan Y Q, Guo Y X, Li B, *et al.* Phytoplankton community character and water quality assessment of Juma River. *Journal of Hebei University (Natural Science Edition)*, 2007, 27(4): 401—406.
- [13] Xu Z L, Wang Y L, Chen Y Q, *et al.* An ecological study on zooplankton in Maximum turbid zone of estuarine area of Changjiang (Yangtze) River. *Journal of Fishery Sciences of China*, 1995, 2(1): 39—48.
- [14] Chen Y Q, Xu Z L, Wang Y L, *et al.* An ecological study on zooplankton in plume front zone of Changjiang (Yangtze) River estuarine area I. biomass and distribution of dominant species. *Journal of Fishery Sciences of China*, 1995, 2(1): 49—58.
- [15] Sun C C, Wang Y S, Sun S, *et al.* Analysis dynamics of phytoplankton community characteristics in Daya Bay. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 3948—3958.
- [16] Kuang Q J, Ma P M, Hu Z Y, *et al.* Study on the evaluation and treatment of lake eutrophication by means of algae biology. *Journal of Safety and Environment*, 2005, 5(2): 87—91.
- [17] Li Y Y, Gao W L, Li J F, *et al.* Study on eutrophication in water resource area of the mid-line project of south to north water division. *Journal of China Agricultural University*, 2007, 12(5): 41—47.
- [18] Wang Z H, Lin Q Q, Hu R, *et al.* Pollution by blue-green algae (Cyanophyta) in reservoirs of Guangdong Province and water quality evaluation. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2004, 12(2): 117—123.
- [19] Wang H Z, Liu Y D, Shen Y W, *et al.* Preliminary research on water bloom of dinophyceae in Yunan Manwan Hydropower Station Reservoir. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2004, 28(2): 213—215.
- [20] Guo P Y, Shen H T, Liu A C, *et al.* The species composition, community structure and diversity of zooplankton in Changjiang estuary. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 892—900.
- [21] Li K Z, Yin J Q, Huang L M, *et al.* Dynamic variations of community structure and quantity of zooplankton in Zhujiang River estuary. *Journal of Tropical Oceanography*, 2005, 24(5): 60—68.
- [22] Zhang H F, Chen Y N, Chen Y P, *et al.* Species quantity change and ecosystem dynamics in the lower reaches of Tarim River. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(4): 21—24.
- [23] Li B, Sun R Y. Community ecology. In: Sun R Y ed. *General ecology*. Beijing: Higher Education Press, 1993. 135—138.
- [24] Guo J S, Chen J, Li Z, *et al.* Investigation of phytoplankton and assessment of algal diversity on backwater area of Xiaojang River in Three Gorges Reservoir after its initiate impounding to the water level of 156m in spring. *Environmental Science*, 2008, 29(10): 2710—2715.

- [25] Zheng B H, Tian Z Q, Zhang L, *et al.* The characteristics of the Hydrobios' distribution and the analysis of water quality along the West Shore of Taihu Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(10): 4214—4223.
- [26] Wang X H, Ji B C, Li M D, *et al.* Phytoplankton and bio-assessment of water quality in upper waters of Yinlun project. *Research of Environmental Sciences*, 2004, 17(4): 18—24.
- [27] Danilov R, Ekelund N G A. The efficiency of seven diversity and one similarity indices based on phytoplankton data for assessing the levels of eutrophication in lakes in central Sweden. *The Science of the Total Environment*, 1999, 234: 15—23.
- [28] Gao Y, Su Y X, Qi S C. Phytoplankton and evaluation of water quality in Yi River watershed. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(4): 544—548.

参考文献:

- [1] 李敦海, 李根宝, 王高鸿, 等. 水华蓝藻生物质对沉水植物五刺金藻生长的影响. *水生生物学报*, 2007, 31(5): 689~692.
- [2] 张婷, 宋立荣. 铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 与三种丝状蓝藻间的相互作用. *湖泊科学*, 2006, 18(2): 150~156.
- [3] 孙军, 刘东艳. 多样性指数在海洋浮游植物研究中的应用. *海洋学报*, 2004, 26(1): 62~75.
- [4] 赵孟绪, 雷腊梅, 韩博平. 亚热带水库浮游植物群落季节变化及其影响因素分析——以汤溪水库为例. *热带亚热带植物学报*, 2005, 13(5): 386~392.
- [5] 许金花, 潘伟斌, 张海燕. 城市小型浅水人工湖泊浮游藻类与水质特征研究. *生态科学*, 2007, 26(1): 36~40.
- [8] 林炯, 陈绵润, 韩博平. 横岗水库浮游植物种类组成与时空分布. *生态科学*, 2007, 26(4): 303~310.
- [12] 管越强, 郭云学, 李博, 等. 拒马河浮游植物群落特征及水质评价. *河北大学学报 (自然科学版)*, 2007, 27(4): 401~406.
- [13] 徐兆礼, 王云龙, 陈亚瞿, 等. 长江口最大浑浊带浮游动物的生态研究. *中国水产科学*, 1995, 2(1): 39~48.
- [14] 陈亚瞿, 徐兆礼, 王云龙, 等. 长江口河口锋区浮游动物生态研究 I. 生物量及优势种的平面分布. *中国水产科学*, 1995, 2(1): 49~58.
- [15] 孙翠慈, 王友绍, 孙松, 等. 大亚湾浮游植物群落特征. *生态学报*, 2006, 26(12): 3948~3958.
- [16] 况琪军, 马沛民, 胡征宇, 等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展. *安全与环境学报*, 2005, 5(2): 87~91.
- [17] 李玉英, 高宛莉, 李家峰, 等. 南水北调中线水源区富营养化研究. *中国农业大学学报*, 2007, 12(5): 41~47.
- [18] 王朝晖, 林秋奇, 胡韧, 等. 广东省水库的蓝藻污染状况与水质评价. *热带亚热带植物学报*, 2004, 12(2): 117~123.
- [19] 王海珍, 刘永定, 沈银武, 等. 云南漫湾水库甲藻水华生态初步研究. *水生生物学报*, 2004, 28(2): 213~215.
- [20] 郭沛涌, 沈焕庭, 刘阿成, 等. 长江河口浮游动物的种类组成、群落结构及多样性. *生态学报*, 2003, 23(5): 892~900.
- [21] 李开枝, 尹健强, 黄良民, 等. 珠江口浮游动物的群落动态及数量变化. *热带海洋学报*, 2005, 24(5): 60~68.
- [22] 张宏峰, 陈亚宁, 陈亚鹏, 等. 塔里木河下游植物群落的物种数量变化与生态系统动态研究. *生态学杂志*, 2004, 23(4): 21~24.
- [23] 李博, 孙儒泳. 群落生态学. 见: 孙儒泳主编. 普通生态学. 北京: 高等教育出版社, 1993. 135~138.
- [24] 郭劲松, 陈杰, 李哲, 等. 156m 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.
- [25] 郑丙辉, 田自强, 张雷, 等. 太湖西岸湖滨带水生生物分布特征及水质营养状况. *生态学报*, 2007, 27(10): 4214~4223.
- [26] 王新华, 纪炳纯, 李明德, 等. 引滦工程上游浮游植物及其水质评价. *环境科学研究*, 2004, 17(4): 18~24.
- [28] 高远, 苏宇祥, 仝树财. 沂河流域浮游植物与水质评价. *湖泊科学*, 2008, 20(4): 544~548.