

doi: 10.7541/2013.75

## 人工试验湖泊浮游藻类群落的生态学研究

夏爽<sup>1,2</sup> 张琪<sup>1,2</sup> 刘国祥<sup>1</sup> 胡征宇<sup>1</sup>

(1. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为了对转基因(CA<sub>g</sub>cGH)鲤的生态风险评估提供参考资料, 于2002年构建人工试验湖泊。研究分析了该人工湖泊浮游藻类群落的结构特征、季节动态、年际变化及其与水体各环境因子的关系。2006年至2010年间, 每季度采样, 共鉴定出浮游藻类7门47属66种, 其中绿藻种类最多。双向指示种分析(TWINSPAN)和除趋势对应分析(DCA)结果显示采样点数据可分为春夏秋冬4组, 说明该群落季节性明显。冬季群落结构简单, 多样性最低, 主要由小环藻(*Cyclotella* sp.)和分歧锥囊藻(*Dinobryon divergens*)组成; 春季, 小环藻、针杆藻(*Synedra* sp.)、颗粒直链藻(*Melosira granulata*)等几种硅藻占优势; 夏季群落结构复杂, 占优势的是银灰平裂藻(*Merismopedia glauca*)和螺旋鞘丝藻(*Lyngbya contorta*), 多样性最高; 秋季没有明显占优势的种类。5年间, 群落细胞密度上升了33.1%, 平均值为 $(1.43 \pm 0.75) \times 10^6$  cells/L; 硅藻在群落中所占比例从48.2%下降至16.2%, 而蓝藻从9.3%上升至42.2%。典范对应分析(CCA)的结果显示对浮游藻类影响最大的环境因子是温度和溶氧, 总氮浓度和总磷浓度的影响也是不可忽视的, 而pH在试验中对浮游藻类群落结构的影响有限。不同藻类在CCA排序图上有不同的分布格局, 一些硅藻主要分布在中低温采样点, 蓝藻集中分布在高温的采样点, 鼓藻主要出现在高透明度和高总磷浓度的采样点, 金藻主要分布在高溶氧浓度和低温的采样点。

**关键词:** 人工湖泊; 浮游藻类; 群落结构; 季节动态; 年际变化

**中图分类号:** Q145<sup>+</sup>.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2013)04-0640-08

浮游藻类(Phytoplankton)是存在于江河湖海等各种水体中重要的初级生产者, 是水体食物网的初始环节<sup>[1]</sup>。相对于理化参数, 浮游藻类能更直观的反映水体营养状态, 而且只有全面了解浮游藻类群落动态才能研究影响其变化的因素<sup>[2]</sup>。试验湖泊所在的长江中游地区属亚热带湿润性季风气候, 湖泊星罗棋布, 鱼类养殖场众多。如今, 该地区大部分天然湖泊已经呈现中营养或中富营养化以上水平<sup>[3]</sup>, 有些湖泊已经严重富营养化<sup>[4, 5]</sup>。富营养化的水体环境对浮游藻类群落存在多方面的影响<sup>[6, 7]</sup>。为了尽量排除各种外源污染的影响, 本研究设立了半封闭的人工试验湖泊, 系统分析投放有转草鱼生长激素重组基因鲤鱼的人工试验湖泊的浮游藻类群落的结构特征、季节动态和年度变化, 及其与环境因子的关系, 以期对转基因鲤的生态风险评估提供背景资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验湖泊概况

试验湖泊于2002年5月设计并构建, 位于湖北省武汉市江夏区境内梁子湖畔(114°24'E, 30°08'N), 水面面积6.67 hm<sup>2</sup>, 为人工隔离的半封闭水体, 具有防洪、防逃、防盗等安全设施。依据当地湖泊背景资料在试验湖泊种植大型水生植物, 投放无脊椎动物和鱼类, 引入梁子湖水模拟自然湖泊生境及生物群落。经过3年的过渡适应后, 人工移植的沉水植物生长良好, 软体动物、虾类和鱼类形成了稳定种群, 表明人工设置的生物群落在试验湖泊生态系统中已经趋于稳定。根据2004—2006年的调查, 试验湖泊挺水植物主要有野菰、水蓼、水葱, 浮叶植物主要有莲、菱和荇菜, 沉水植物有轮叶黑藻、苦草、穗花狐尾藻、金鱼藻。试验湖泊有鱼类23种,

收稿日期: 2012-03-06; 修订日期: 2013-03-17

基金项目: 国家973项目(2007CB109205); 国家自然科学基金项目(30970501)资助

作者简介: 夏爽(1985—), 男, 湖北武汉人; 博士研究生; 主要从事藻类分类学和生态学的研究。E-mail: spanishvos@163.com

通信作者: 刘国祥, E-mail: liugx@ihb.ac.cn

隶属 12 科 23 属。鱼类区系组成的最大特点是鲤科鲫鱼占优势, 底栖动物以摇蚊科、腹足类和寡毛类为主。试验湖泊大型水生植物、鱼类和底栖动物区系组成与长江中游地区湖泊非常相似<sup>[8]</sup>, 因此, 构建的人工试验湖泊具有该地区湖泊的代表性。

2005 年 8 月, 将转“全鱼”转基因(CA<sub>g</sub>cGH)鲤鱼 1800 尾释放到该人工试验湖泊。本次试验投放的转基因鲤是转植有鲤鱼 β 肌动蛋白基因启动调控顺序(CA)驱动的 gcGH“全鱼”重组基因鱼。释放的转基因鲤鱼平均体长为 94.1 mm。2006 年 5 月其平均体长增长为 250.0 mm。

从 2002 年 5 月一次性灌水后, 试验湖泊未再灌水, 也未排水。试验期间, 湖泊水位变化的最大落差在 50 cm 以内。湖水补充主要依靠降水。从试验期间的各项生物和水化学指标来看, 根据况琪君等<sup>[9]</sup>和王明翠等<sup>[10]</sup>的标准, 该水体处在贫中营养状态。

## 1.2 样品采集、处理与分析

在湖面上均匀设置 7 个采样点(图 1)。从 2006 年到 2010 年, 每季度采样。用 25#浮游生物网捞取浮游藻类定性样品, 部分用福尔马林固定。在光学显微镜下观察浮游藻类活体及固定样品, 依照胡鸿钧等<sup>[11]</sup>、Wehr, *et al.*<sup>[12]</sup>和 Robert<sup>[13]</sup>等文献进行鉴定。另用容量为 600 mL 的塑料水瓶采集浮游藻类定量样品, 立即用终浓度为 1% 的鲁哥氏液(Lugol's solution)固定。水样经沉淀、浓缩至 30 mL。依照章宗涉等<sup>[14]</sup>用视野法对藻类样品进行定量分析。

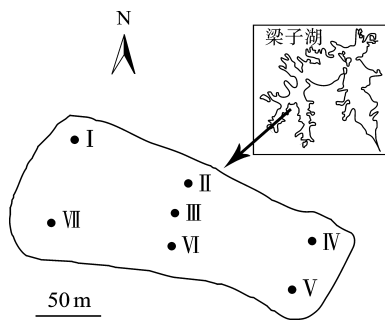


图 1 人工试验湖泊位置及采样点设置

Fig. 1 Location of the man-made lake and sampling sites

在采集生物样品的同时, 现场用水银温度计测定水温( $T$ ), 用便携式 pH 计测定水体酸碱度(pH), 用黑白透明度盘测定水体透明度(SD), 用便携式溶氧仪测定水体溶解氧浓度(DO), 另用有机玻璃采水器采集水样, 回到实验室用过硫酸钾氧化-紫外分光光

度法测定水体总氮浓度(TN)、用钼锑抗分光光度法测定总磷浓度(TP)等水化学指标。以上测定均参照国标相关方法<sup>[15]</sup>。由于天气问题, 少数几次采样的某些采样点未采集生物样品。

## 1.3 数据统计与分析

Shannon-Weaver 多样性指数( $H'$ ):  $H' = -\sum P_i \log_2 P_i$ , ( $P_i = N_i/N$ )。Pielou 物种均匀度指数( $J$ ):  $J = H'/\ln S$ 。式中,  $N$  为同一样品中的个体总数,  $N_i$  为第  $i$  种的个体数。 $S$  为样品中种类总数<sup>[16]</sup>。使用软件 WinTWINS (version 2.3) 进行双向指示种分析(Two-Way Indicator Species Analysis, TWINSpan); 使用软件 Canoco (version 4.5) 进行除趋势对应分析(Detrended Correspondence Analysis, DCA) 和典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA)。在统计分析过程中, 降低了偶见种的权重, 提高了具有生态学指示意义的物种的权重。

## 2 结果

### 2.1 人工试验湖泊的浮游藻类物种组成与优势种

在为期 5 年的采样中, 共发现浮游藻类 66 种, 分属 47 个属, 7 个门。其中, 蓝藻门 6 属 9 种, 绿藻门 19 属 25 种, 硅藻门 10 属 17 种, 隐藻门 5 属 7 种, 甲藻门 3 属 4 种, 金藻门 2 属 2 种, 裸藻门 2 属 2 种。虽然绿藻门的种类最多, 占种类数的 37.9%, 但是在各个季节细胞密度并不是最大。在冬季硅藻门小环藻(*Cyclotella* sp.) 为优势种, 分歧锥囊藻(*Dinobryon divergens*) 为亚优势种; 春季, 几种硅藻如针杆藻(*Synedra* sp.)、颗粒直链藻(*Melosira granulata*) 和小环藻等交替占优势; 在夏季, 蓝藻门的银灰平裂藻(*Merismopedia glauca*) 或螺旋鞘丝藻(*Lyngbya contorta*) 占优势; 在秋季, 没有明显的优势种。全年来看, 人工试验湖泊的浮游藻类群落为硅藻-蓝藻型。

### 2.2 浮游藻类群落结构的排序和聚类分析

对 5 年每季节采样所得的 7 个采样点平均值的 17 组数据进行 TWINSpan 排序分析的结果显示, 这些数据首先被划分为主要以夏季和冬季数据为主的两个类群, 然后再从中划分出春秋两季的数据。这表明试验湖泊浮游藻类群落结构季节性较为明显。冬夏两季差异大, 而春秋两季处在冬夏两季的过渡状态。

对这些数据进行 DCA 聚类分析的结果与

TWINSPAN 排序结果相似(图 2)。数据被较好的区分为 4 个类群, 分别代表春夏秋冬四季, 显示该水体浮游藻类群落结构的季节性明显。夏季和冬季的浮游藻类群落结构存在较大差异, 而春季和秋季的浮游藻类群落结构介于两者之间。夏季的各数据点聚集紧密, 冬季的数据点较分散, 春秋两季的数据点之间距离也较大, 有些数据更靠近夏季数据点集, 有些更靠近冬季数据点集。

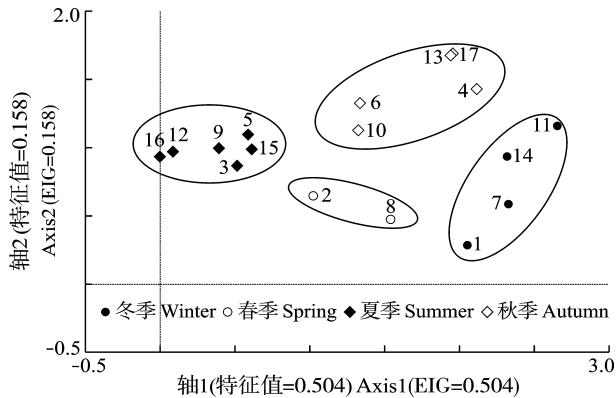


图 2 17 组采样点数据浮游藻类群落结构的 DCA 聚类分析散点图  
Fig. 2 Detrended correspondence analysis ordination diagram of 17 samples based on phytoplankton community structure

### 2.3 浮游藻类群落的季节动态

依据 TWINSPAN 分析和 DCA 分析的结果, 将试验湖泊浮游藻类群落各次采样的数据划分为春夏秋冬四组。浮游藻类的细胞密度在夏季最高, 5 年平均值为  $(2.15 \pm 1.26) \times 10^6$  cells/L; 冬季最低, 为  $(0.89 \pm 0.40) \times 10^6$  cells/L; 春季为  $(1.18 \pm 0.12) \times 10^6$  cells/L; 秋季比春季略低, 为  $(1.01 \pm 0.39) \times 10^6$  cells/L。

Shannon-Weaver 多样性指数  $H'$  的最低值出现在 2006 年 1 月, 为 0.76; 最高值出现在 2008 年 8 月, 为 4.62; 试验期间平均值为  $3.01 \pm 0.87$ 。分季节来看, 冬季的多样性指数平均值最低, 为  $1.52 \pm 0.58$ ; 夏季最高, 为  $3.74 \pm 0.65$ ; 春秋两季分别为  $2.86 \pm 0.69$  和  $3.74 \pm 0.10$ 。

Pielou 物种均匀度指数  $J$  的季节变化与 Shannon-Weaver 多样性指数  $H'$  的季节变化趋势相似。冬季的均匀度指数平均值最低, 为  $0.58 \pm 0.22$ ; 夏季最高, 为

$1.16 \pm 0.18$ ; 春季为  $0.91 \pm 0.21$ ; 秋季为  $1.09 \pm 0.04$ 。

浮游藻类群落结构的季节动态(图 3)。在冬季, 硅藻占绝对优势, 占浮游藻类总细胞密度的 70.0%, 主要是小环藻(*Cyclotella* sp.); 其次为金藻门的分歧锥囊藻(*Dinobryon divergens*), 占 16.6%, 其他藻类的细胞密度很低。春季, 小环藻大量减少, 但是其他一些硅藻, 如针杆藻(*Synedra* sp.)、颗粒直链藻(*Melosira granulata*)、舟形藻(*Navicula* sp.)、桥弯藻(*Cymbella* sp.)等增多, 硅藻仍然占有 55.4% 的细胞密度; 绿藻门的几种栅藻(*Scenedesmus* spp.)、衣藻(*Chlamydomonas* sp.)和小球藻(*Chlorella* sp.)有所增多, 占浮游藻类细胞密度的 17.5%。夏季, 蓝藻大量增殖, 占浮游藻类细胞密度的 43.5%, 主要是银灰平裂藻(*Merismopedia glauca*)和螺旋鞘丝藻(*Lyngbya contorta*)。绿藻门和隐藻门的藻类也有所增加, 分别占细胞密度的 20.9% 和 16.9%, 而硅藻只占 11.5%。秋季, 没有明显占优势的门类, 硅藻门、绿藻门、隐藻门和金藻门在浮游藻类细胞密度中所占比例均在 22% 左右。细胞密度最大的是小环藻和锥囊藻。甲藻较集中出现在春秋两季, 而裸藻全年偶见。

### 2.4 浮游藻类群落的年际变化

从 2006 年至 2010 年, 人工试验湖浮游藻类的年平均细胞密度(图 4)。5 年的平均值为  $(1.43 \pm 0.75) \times 10^6$  cells/L。在 2007 年最低, 为  $(0.89 \pm 0.02) \times 10^6$  cells/L, 2010 年最高, 为  $(1.77 \pm 1.40) \times 10^6$  cells/L。2010 年浮游藻类细胞密度比 2006 年上升了 33.1%。人工试验湖浮游藻类细胞密度呈现出先降后升的趋势。

浮游藻类的年平均群落结构(图 5, 由于 2007 年缺乏数据, 未纳入统计)。5 年期间, 硅藻在群落细

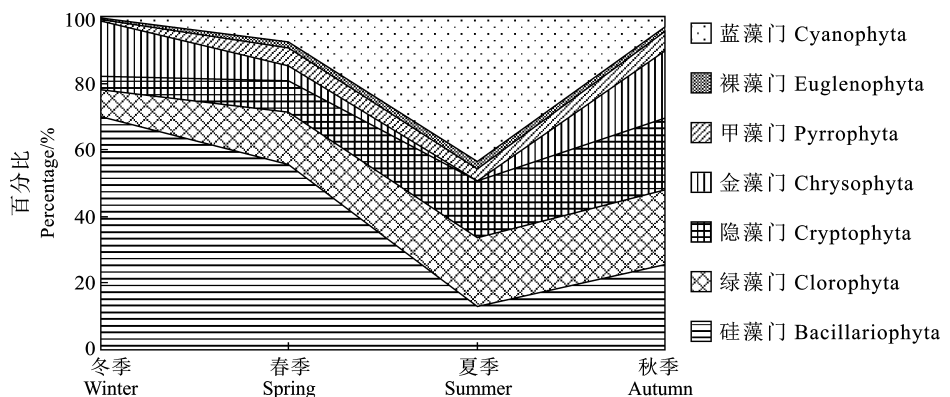


图 3 浮游藻类群落结构季节动态  
Fig. 3 Seasonal variation of phytoplankton community structure

胞密度中的比例大幅降低, 从 48.2% 下降至 16.2%。蓝藻在群落细胞密度中的比例显著增加, 从 9.3% 上升至 42.2%。其他各门藻类所占比例无明显上升或下降趋势。

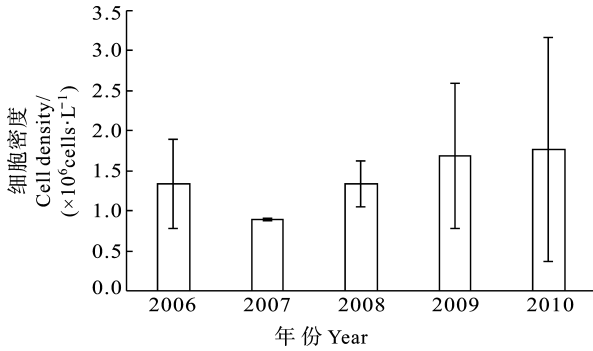


图 4 浮游藻类细胞密度的年际变化

Fig. 4 Annual variation of cell density of phytoplankton

人工试验湖泊浮游藻类群落的年平均 Shannon-Weaver 多样性指数  $H'$  和 Pielou 物种均匀度指数  $J$  (图 6)。两种指数的年际变化趋势基本相同。Shannon-Weaver 多样性指数  $H'$  的最低值为 2009 年的  $2.59 \pm 1.16$ , 最高值为 2010 年的  $3.14 \pm 0.71$ ; Pielou 物种均匀度指数  $J$  的最低值为 2009 年的  $0.86 \pm 0.19$ , 最高值为 2010 年的  $1.03 \pm 0.71$ 。

## 2.5 浮游藻类群落与水体理化环境因子

### 试验湖泊各项水化学指标的变化

试验期间, 试验湖泊的水温 ( $T$ ) 的变化为  $5.4\text{--}34.7^\circ\text{C}$ , 平均值为  $(20.0 \pm 7.8)^\circ\text{C}$ ; 溶解氧 (DO) 的变化范围是  $5.38\text{--}11.67\text{ mg/L}$ , 平均值为  $(8.61 \pm 1.75)\text{ mg/L}$ ; 透明度 (SD) 的变化范围是  $60\text{--}210\text{ cm}$ , 平均值为  $(104 \pm 27)\text{ cm}$ ; pH 的变化范围为  $6.36\text{--}8.26$ , 平均值为  $7.01 \pm 0.31$ ; 总磷浓度 (TP) 变化范围是  $0.006\text{--}0.150\text{ mg/L}$ , 平均

值为  $(0.041 \pm 0.016)\text{ mg/L}$ ; 总氮浓度 (TN) 的变化范围是  $0.079\text{--}2.094\text{ mg/L}$ , 平均值为  $(0.600 \pm 0.270)\text{ mg/L}$ 。总磷浓度和总氮浓度的年际变化 (图 7)。总磷浓度呈现先降后升的趋势, 而总氮浓度呈现先升后降的趋势。注意到试验湖泊总磷浓度和浮游藻类细胞密度都有先降后升的变化, 对两者进行相关性分析。结果显示, 两者高度相关 ( $R^2=66.0\%$ )。

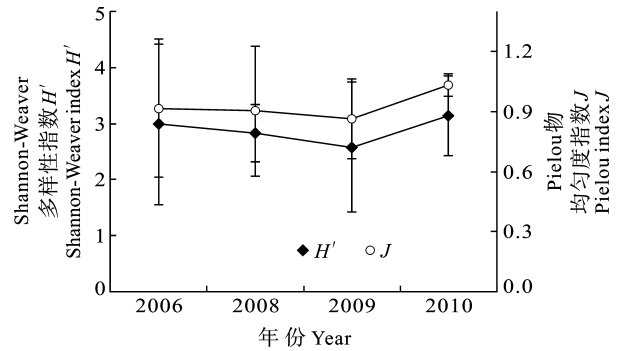


图 6 浮游藻类群落 Shannon-Weaver 多样性指数 ( $H'$ ) 和 Pielou 物种均匀度指数 ( $J$ ) 的年度变化

Fig. 6 Annual variation of Shannon-Weaver index ( $H'$ ) and Pielou index ( $J$ ) of phytoplankton community

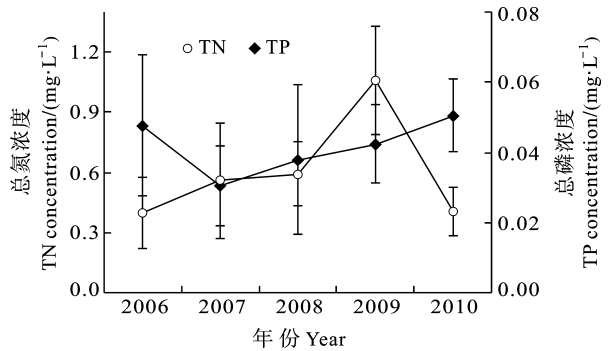


图 7 人工湖泊总磷浓度和总氮浓度的年际变化

Fig. 7 Annual variation of densities of TP and TN in the man-made lake

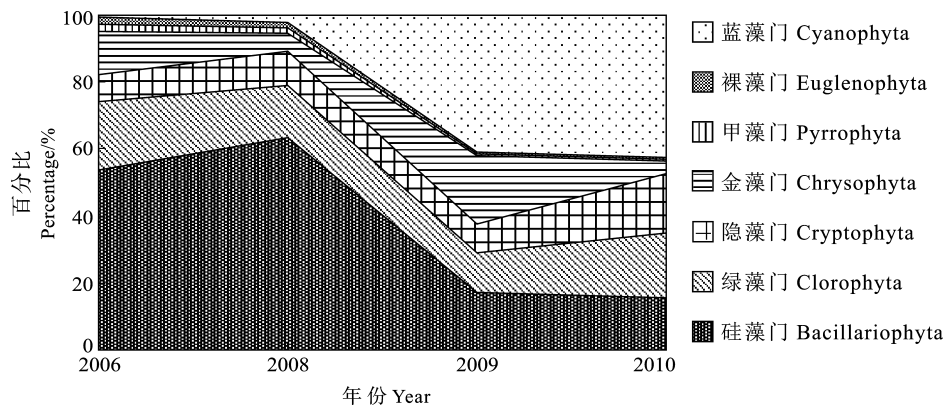


图 5 浮游藻类群落结构年际变化

Fig. 5 Annual variation of phytoplankton community structure

试验湖泊浮游藻类群落与水体理化环境因子的典范对应分析 (CCA) 对 5 年间浮游藻类群落与环境因子数据做 CCA (图 8), 该分析中的物种与相应编号 (表 1), 各项统计信息 (表 2)。排序图反映了不同种类的浮游藻类对环境条件的不同适应特点。对于环境因子, 轴 1 和轴 2 的相关系数



为 0, 说明排序结果是可信的<sup>[17, 18]</sup>。

从图 8 中箭头的连线长度可看出, 所选取的 6 种不同环境因子对浮游藻类存在不同程度的影响。CCA 第一轴与水温(*T*)(0.7761)、透明度(*SD*)(0.7251)和总磷浓度(*TP*)(0.6162)正相关, 而与溶解氧(*DO*)(-0.7714)负相关; 第二轴与总氮浓度(*TN*)正相关(0.5821)。

根据 CCA 分析, 可以将浮游藻类大体分为 4 组。组 I 中主要为小环藻、直链藻、针杆藻等硅藻, 主要分布在中温或低温的采样点, 而与其他各环境因子相关性不明显; 组 II 中主要为一些少见的裸藻、囊裸藻和隐藻, 其分布格局与温度有较弱的相关性; 组 III 中为色球藻、颤藻、平裂藻等蓝藻和纤维藻、衣藻等绿藻, 其分布格局与温度具有很密切的正相关; 组 IV 中为一些鼓藻, 其分布格局与透明度和总磷正相关。另外, 锥囊藻的分布格局与溶解氧正相

关, 与温度负相关。

总体来看, 对浮游藻类影响最大的环境因子是温度和溶氧, 总氮浓度和总磷浓度的影响也是不可忽视的, 而 pH 在本试验中对浮游藻类分布格局的影响有限。

### 3 讨论

#### 3.1 人工试验湖泊浮游藻类群落的结构特征

从 DCA 聚类分析和 TWINSpan 排序分析的结果可见, 该水体浮游藻类群落结构的季节性明显。夏季和冬季的浮游藻类群落结构存在较大差异。夏季的各数据点聚集紧密, 其群落结构相似性最高, 表明该水体的浮游藻类群落在夏季稳定, 这可能是由于长江中游地区夏季持续时间长, 气候条件稳定。冬季的数据点较分散, 显示了浮游藻类群落在冬季存在较大变化, 可能原因是该地区冬季在寒潮

表 1 CCA 分析中的物种与相应编号  
Tab. 1 Species and their codes used in CCA

| 编号 Code | 物种 Species                             | 编号 Code | 物种 Species                             |
|---------|--|---------|--|
| sp1     | 小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.              | sp19    | 新月藻 <i>Closterium</i> sp.              |
| sp2     | 桥弯藻 <i>Cymbella</i> sp.                | sp20    | 逗隐藻 <i>Komma caudata</i>               |
| sp3     | 颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i>        | sp21    | 倒卵隐藻 <i>Cryptomonas obovata</i>        |
| sp4     | 异极藻 <i>Gomphonema</i> sp.              | sp22    | 蛋白核隐藻 <i>Cryptomonas pyrenoidifera</i> |
| sp5     | 舟形藻 <i>Navicula</i> sp.                | sp23    | 蓝隐藻 <i>Chroomonas</i> sp.              |
| sp6     | 针杆藻 <i>Synedra</i> sp.                 | sp24    | 反曲弯隐藻 <i>Campylomonas reflexa</i>      |
| sp7     | 纤维藻 <i>Ankistrodesmus</i> sp.          | sp25    | 斜结隐藻 <i>Plagioselmis nanoplanctia</i>  |
| sp8     | 衣藻 <i>Chlamydomonas</i> sp.            | sp26    | 马索隐藻 <i>Cryptomonas marssonii</i>      |
| sp9     | 卵囊藻 <i>Oocystis</i> sp.                | sp27    | 分歧锥囊藻 <i>Dinobryon divergens</i>       |
| sp10    | 多芒藻 <i>Golenkinia radiata</i>          | sp28    | 裸甲藻 <i>Gymnodinium</i> sp.             |
| sp11    | 四足十字藻 <i>Crucigenia tetrapedia</i>     | sp29    | 多甲藻 <i>Peridinium</i> sp.              |
| sp12    | 丰富栅藻 <i>Scenedesmus abundans</i>       | sp30    | 裸藻 <i>Euglena</i> sp.                  |
| sp13    | 四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i>    | sp31    | 囊裸藻 <i>Trachelomonas</i> sp.           |
| sp14    | 小球藻 <i>Chlorella</i> sp.               | sp32    | 色球藻 <i>Chroococcus</i> sp.             |
| sp15    | 弓形藻 <i>Schroederia</i> sp.             | sp33    | 螺旋鞘丝藻 <i>Lyngbya contarta</i>          |
| sp16    | 双眼鼓藻 <i>Cosmarium bioculatum</i>       | sp34    | 颤藻 <i>Oscillatoria</i> sp.             |
| sp17    | 项圈顶接鼓藻 <i>Spondylosium moniliforme</i> | sp35    | 鱼腥藻 <i>Anabaena</i> sp.                |
| sp18    | 角星鼓藻 <i>Staurastrum</i> sp.            | sp36    | 银灰平裂藻 <i>Merismopedia glauca</i>       |

表 2 人工试验湖泊浮游藻类群落 CCA 分析的统计信息  
Tab. 2 Statistics for the CCA performed on phytoplankton of the man-made lake

| 排序轴<br>Axis | 相关系数 Correlation coefficient |           |           |           |            |            | 特征值<br>Eigenvalue | 累积贡献率<br>Accumulative contribution rate(%) | 种类—环境<br>因子相关系数<br>Correlation coefficient of feature-environment |
|-------------|------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|-------------------|--|---|
|             | 温度<br>T                      | 酸碱度<br>pH | 透明度<br>SD | 溶解氧<br>DO | 总磷浓度<br>TP | 总氮浓度<br>TN |                   |  |   |
| 1           | 0.7761                       | -0.0774   | 0.7251    | -0.7714   | 0.6162     | -0.2331    | 0.563             | 40.8                                       | 0.949   |
| 2           | -0.4507                      | 0.1137    | 0.4652    | 0.3959    | 0.2341     | 0.5821     | 0.373             | 67.7                                       | 0.901   |

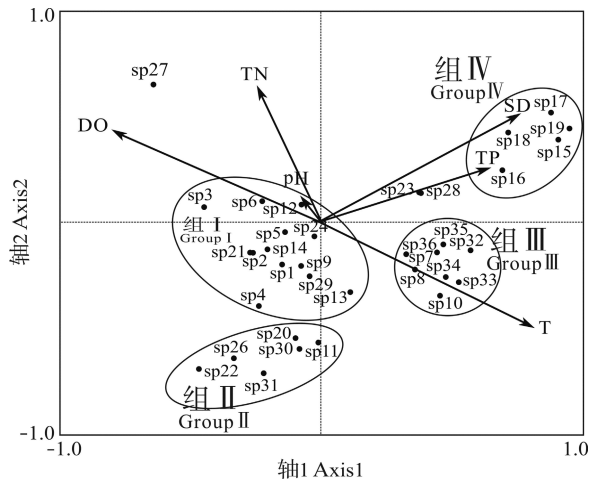


图 8 人工试验湖泊浮游藻类物种与环境因子的 CCA 分析排序图  
Fig. 8 CCA biplot of phytoplankton species and environmental variables of the man-made lake

的影响下, 气候变化快, 增加了试验湖泊小环境的异质性。而由于该地区春秋两个季节持续时间短, 温度等气候条件变化迅速, 这两个季节的数据点分散, 群落结构相似性都不高, 有时更接近于夏季的群落结构, 有时更接近冬季的。

人工试验湖泊浮游藻类群落结构的季节性同样明显。硅藻、蓝藻等藻类分别在不同季节占优势。人工试验湖泊的浮游藻类的群落结构特征和季节动态符合该地区浅水湖泊的浮游藻类群落的一般规律<sup>[19, 20]</sup>。

从 Shannon-Weaver 多样性指数和 Pielou 物种均匀度指数来看, 人工试验湖泊浮游藻类群落的多样性和均匀度在夏季最高, 其次是秋季, 而冬季最低。这可能是由该地区的气候条件的季节性变化造成的。冬季水温很低, 只有少数耐低温的藻类能生存, 也容易形成几个物种占绝对优势的情况; 而夏季水温高, 适合多种藻类的生长, 因此多样性和均匀度最高。虽然春秋两季的浮游藻类平均细胞密度很相近, 但是秋季的多样性指数和均匀度指数均显著高于春季, 可能是由于春秋两季的浮游藻类群落分别在较大程度上受到冬夏两季的影响。在 5 年内, 两种指数的年平均值没有明显的上升或下降的趋势, 说明人工试验湖泊浮游藻类群落的多样性处在相对稳定的状态。

试验期间, 人工试验湖泊的浮游藻类种类数为 66 种, 其中绿藻门 25 种, 硅藻门 17 种, 蓝藻门 9 种。人工试验湖泊的浮游藻类群落与报道中的梁子湖的浮游藻类群落种类组成很相似<sup>[21, 22]</sup>, 但是种类

数略少一些。这可能是由于人工试验湖泊比梁子湖的水面面积小, 空间异质性不如梁子湖, 因而虽然是从梁子湖引水, 人工试验湖泊浮游藻类的物种数略少。

### 3.2 影响人工试验湖泊浮游藻类群落的环境因子

人工试验湖泊浮游藻类群落结构的季节性明显, 可能主要受到水温等气候条件的影响。银灰平裂藻、螺旋鞘丝藻、颤藻等蓝藻集中出现在 28°C 以上的采样点, 分歧锥囊藻集中出现在 12°C 以下的采样点, 小环藻、直链藻、针杆藻等硅藻主要出现在 5—20°C 的采样点。溶解氧与水温呈高度负相关, 也与浮游藻类的光合作用和呼吸作用存在相互影响。透明度反映了真光层的深度, 也就是浮游藻类能利用阳光进行光合作用的水体深度范围, 也会对浮游藻类群落结构产生影响。同时, 浮游藻类的细胞体本身也能影响水体的透明度。在营养物质方面, 总磷浓度对浮游藻类的影响比总氮浓度的影响更大一些。而在本试验中, pH 与浮游藻类群落结构的相关性有限, 可能是由于试验期间, pH 变化范围小。

在本研究的 5 年期间, 蓝藻在群落细胞密度中的比例增加, 而硅藻的比例降低。造成浮游藻类群落结构年际变化的原因可能有以下几点: 一, 各种藻类对营养盐的需求量和获取策略不同<sup>[23, 24]</sup>, 一些蓝藻, 如平裂藻, 具有个体小和相对较大的表面积, 可能具有更高的吸收效率, 因而占竞争优势, 在浮游藻类群落中的比例缓慢增加。二, 试验湖泊为半封闭人工湖泊, 营养盐通过地表径流或土壤渗透进入水体的量很有限。周广杰曾报道了中强降雨可以带入营养盐、改变水体理化参数, 从而引起浮游植物群落的变化<sup>[25]</sup>。本研究中的人工试验湖泊容量较小, 稀释作用弱, 因而降雨带入的营养盐和改变的水文状况也可能引起浮游藻类群落的变化。三, 底泥中的各种营养盐, 如多种含磷化合物、含氮化合物和无机碳化合物会缓慢的释放入水体, 从而影响浮游藻类的生长繁殖<sup>[26—28]</sup>。在本试验中, 人工试验湖泊底泥中营养盐的释放也可能是浮游藻类群落结构年际变化的原因之一。

观测 5 年期间, 浮游藻类群落的多样性基本保持稳定、群落外观未发生明显改变。群落结构与其引水源梁子湖很相似。季节动态和年际变化受到气候条件和营养盐的影响较为明显。今后我们将在已有工作的基础上, 在空间尺度上严格设置空白组、

对照组、实验组和混养组等一系列实验梯度,并结合转基因鱼和对照鱼食性选择分析、食物的竞争关系研究等,系统研究转基因鲤鱼对浮游藻类群落的影响。

#### 致谢:

感谢武汉多福科技农庄股份有限公司建造和管理人工试验湖泊;感谢中国科学院水生生物研究所鱼类基因工程学学科组、渔业生态学学科组、原生动植物分类与生态学学科组、化学生态学学科组和底栖动物分类学学科组的老师和同学在采样和数据处理过程中给予的帮助。

#### 参考文献:

- [1] Reynolds C S. Ecology of Plankton [M]. Cambridge: Cambridge University Press. 2006, 36
- [2] Arhonditsis G B, Winder M, Brett M T, *et al.* Patterns and mechanisms of phytoplankton variability in Lake Washington (USA) [J]. *Water Research*, 2004, **38**: 4013—4027
- [3] Shu J H, Huang W Y, Wu Y G. Studies on the classification of trophic types of China's lakes [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1996, **8**: 193—200 [舒金华, 黄文钰, 吴延根. 中国湖泊营养类型的分类研究. *湖泊科学*, 1996, **8**: 193—200]
- [4] Liu J K. Ecological Studies on Lake Donghu [M]. Beijing: Academic Press. 1990, 405 [刘健康. 东湖生态学研究(一). 北京: 科学出版社. 1990, 405]
- [5] Cheng X Y, Li S J. An analysis on the development processes of lake eutrophication and their characteristics of the typical lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **51**: 848—855 [成小英, 李世杰. 长江中下游典型湖泊富营养化演变过程及其特征分析. *科学通报*. 2006, **51**: 848—855]
- [6] Zhou Q, Han S Q, Yan S H, *et al.* The mutual effect between phytoplankton and water hyacinth planted on a large scale in the eutrophic lake [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2012, **36**(4): 783—791 [周庆, 韩士群, 严少华, 等. 富营养化湖泊规模化种养的水葫芦与浮游藻类的相互影响. *水生生物学报*, 2012, **36**(4): 783—791]
- [7] Tang H J, Xie P, Liu L, *et al.* Temporal and spatial variation of phytoplankton structure and its relationship with environmental factors in Lake Donghu [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2008, **47**: 100—104 [唐汇娟, 谢平, 刘丽, 等. 武汉东湖浮游植物群落结构的时空变化与环境因子的关系. *中山大学学报(自然科学版)*, 2008, **47**: 100—104]
- [8] Zhang T L, Li Z J, Guo Q S. Investigations on fishes and fishery of four lakes along the middle and lower basins of the Changjiang River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2008, **32**(2): 167—177 [张堂林, 李钟杰, 郭青松. 长江中下游四个湖泊鱼类与渔业研究. *水生生物学报*, 2008, **32**(2): 167—177]
- [9] 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 [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2005, **5**: 87—91 [况琪军, 马沛明, 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**: 87—91]
- [10] Wang M C, Liu X Q, Zhang J H. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2002, **18**: 47—49 [王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准. *中国环境监测*, 2002, **18**: 47—49]
- [11] Hu H J, Wei Y X. The Freshwater Algae of China — Systematics, Taxonomy and Ecology [M]. Beijing: Academic Press. 2006, 23—903 [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—903]
- [12] Wehr J D, Sheath R G. Freshwater Algae of North America, Ecology and Classification [M]. New York: Academic Press. 2002, 715—755
- [13] Robert E L. Phycology [M]. Cambridge: Cambridge University Press. 2008, 47—498
- [14] Zhang Z S, Huang X F. The Methods of Freshwater Plankton Research [M]. Beijing: Science Press. 1991, 336 [章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社. 1991, 336]
- [15] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Methods for Analyze and Monitoring Water and Waste Water [M]. Beijing: China Environmental Science Press. 2002, 88—284 [中国国家环境保护部. 水和废水监测分析方法. 北京: 中国环境科学出版社. 2002, 88—284]
- [16] Andersen R A. Diversity of Eukaryote algae [J]. *Biodiversity and Conservation*, 1992, **1**: 267—292
- [17] ter Braak C J F. Canonical correspondence analysis: A new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis [J]. *Ecology*, 1986, **67**: 1167—1179
- [18] Hao Z Q, Guo S L, Ye J. Canonical Correspondence Analysis on Relationship of Woody Plants With Their Environments on the Northern Slope of Changbai Mountain [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2003, **27**: 733—742 [郝占庆, 郭水良, 叶吉. 长白山北坡木本植物分布与环境关系的典范对应分析. *植物生态学报*, 2003, **27**: 733—742]
- [19] Lei A P, Shi Z X, Wei Y X. Diversity of the phytoplankton in Donghu Lake, Wuhan [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2003, **27**(2): 179—184 [雷安平, 施之新, 魏印心. 武汉东湖浮游藻类物种多样性的研究. *水生生物学报*, 2003, **27**(2): 179—184]
- [20] Peng Y H, Jian Y X, Wang J B, *et al.* A comparative study on aquatic plant diversity in five largest lakes of Hubei province in China [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2004, **28**(5): 464—470 [彭映辉, 简永兴, 王建波, 等. 湖北省五大湖泊水生植物多样性的比较研究. *水生生物学报*, 2004, **28**(5): 464—470]

- [21] Ge J W, Cai Q H, Liu J K, *et al.* The present situation and evaluation of plant diversity of Lake Liangzihu wetland [J]. *China Environmental Science*, 2003, **23**: 451—456 [葛继稳, 蔡庆华, 刘建康, 等. 梁子湖湿地植物多样性现状与评价. 中国环境科学, 2003, **23**: 451—456]
- [22] Gong L J, Zhang S P, Xiong P X, *et al.* Identification and comparative analysis of plankton in aquaculture lakes in summer in Wuhan city [J]. *Journal of Hydroecology*, 2009, **2**: 10—14 [龚路军, 张世萍, 熊邦喜, 等. 武汉市夏季养殖湖泊浮游生物监测及比较研究. 水生生态学杂志, 2009, **2**: 10—14]
- [23] Reynolds C S. Vegetation Processes in the Pelagic: a Model for Ecosystem Theory [M]. California: Ecology Institute. 1997, 371
- [24] Oliver R L, Ganf G G. Freshwater Blooms [A]. In: Whitton B A, Potts M (Eds.), *The ecology of cyanobacteria* [C]. Dordrecht: Kluwer. 2000, 149—194
- [25] Zhou G J. Phytoplankton community variations and algal blooms control theory in their-gorges reservoir [D] Thesis for Doctor of Science. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan. 2009 [周广杰. 三峡水库浮游藻类群落变化及水华控制原理. 博士学位论文. 中国科学院水生生物研究所, 武汉. 2009]
- [26] Xie L Q, Xie P, Tang H J. The concentration and dynamics of sediment phosphorus in various lake regions of Lake Donghu [J]. *Acta Hydrobiologia Sinica*, 2001, **25**(4): 305—310 [谢丽强, 谢平, 唐汇娟. 武汉东湖不同湖区底泥总磷含量及变化的研究. 水生生物学报, 2001, **25**(4): 305—310]
- [27] Huang Q H, Wang L, Wang Z J. Advance in the study on phosphorus speciation, transformation and its potential ecological effects in Chinese lakes [J]. *Journal of Lake Science*, 2006, **18**: 199—206 [黄清辉, 王磊, 王子健. 中国湖泊水域中磷形态转化及其潜在生态效应研究动态. 湖泊科学, 2006, **18**: 199—206]
- [28] Xie P. A review on the causes of Cyanobacterial Blooms from an Evolutionary, Biogeochemical and Ecological View of Point [M]. Beijing: Science Press. 2007, 76—116 [谢平. 论蓝藻水华的发生机制—从生物进化、生物地球化学和生态学观点. 北京: 科学出版社. 2007, 76—116]

## ECOLOGICAL INFLUENCES OF PHYTOPLANKTON COMMUNITY IN AN EXPERIMENTAL MAN-MADE LAKE

XIA Shuang<sup>1,2</sup>, ZHANG Qi<sup>1,2</sup>, LIU Guo-Xiang<sup>1</sup> and HU Zheng-Yu<sup>1</sup>

(1. *Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China;*

*2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

**Abstract:** To evaluate the possible ecological risks of transgenic (CAGcGH) common carp, an experimental man-made lake was set up in 2002. We investigated the phytoplankton community structure, seasonal dynamics, annual variations of phytoplankton, as well as its relationships with environmental factors. Samples of phytoplankton were collected seasonally from 2006 to 2010. Sixty-six species belonging to seven phyla and forty-seven genera were identified, among which Chlorophyta was the most. The results of two-way indicators species analysis (TWINSPAN) and detrended correspondence analysis (DCA) showed that the samples were congregated into four groups, which indicated obvious seasonal character. In winter, the community structure was simple. The biodiversity was the lowest. The community was mainly composed of *Cyclotella* sp. and *Dinobryon divergens*; in spring, several diatoms, such as *Cyclotella* sp., *Synedra* sp. and *Melosira granulata* became dominant species; in summer, community structure was the most complex, with the highest biodiversity, and *Merismopedia glauca* and *Lynngbya contorta* were dominant. In our five-year-experiment, the cell density rose by 33.1%, and mean annual cell density was  $(1.43 \pm 0.75) \times 10^6$  cells/L; the percentage of diatoms in the phytoplankton community dropped from 48.2% to 16.2%, while the percentage of Cyanobacteria in the phytoplankton community rose from 9.3% to 42.2%. The results of canonical correlation analysis (CCA) demonstrated that the community structure was mainly influenced by temperature and dissolved oxygen. The influence of the density of total phosphorus and nitrogen was non-negligible, and the influence of pH was small. Diatoms mainly appeared in samples from middle and low temperature sites, blue-green algae mainly appeared in samples from high temperature sites, Desmidiaceae mainly appeared in samples from sites with high transparency and total phosphorus, and Chrysomonadales mainly appeared in samples from sites with high dissolved oxygen and low temperature.

**Key words:** Man-made lake; Phytoplankton; Community structure; Seasonal dynamics; Annual variation