

镜湖萼花臂尾轮虫夏季种群等位酶分析以及克隆间的生殖差异*

张雷 席贻龙** 董丽丽 温新利

安徽师范大学生命科学学院, 安徽芜湖 241000

摘要 应用聚丙烯酰胺凝胶垂直板电泳技术和特异性染色方法, 对采自芜湖市镜湖的萼花臂尾轮虫 (*Brachionus calyciflorus*) 夏季种群内的 16 个克隆进行了等位酶分析。在检测的 6 种等位酶系统中, 依据葡萄糖磷酸异构酶 (GPI) 和苹果酸脱氢酶 (MDH) 的酶谱在克隆间所存在的明显差异, 将镜湖萼花臂尾轮虫夏季种群内的 16 个克隆划分为 4 个互不相同的克隆群。对由 4 个克隆群中分别随机选取的 1 个克隆 (共 4 个克隆, 分别命名为克隆 A、克隆 B、克隆 C 和克隆 D) 在 4 种斜生栅藻 (*Scenedesmus obliquus*) 密度 (1.0, 2.0, 4.0 和 8.0×10^6 cells/ml) 下的孤雌生殖和有性生殖所作的研究发现, 食物密度、克隆以及两者间的交互作用对轮虫的种群瞬时增长率、种群中的混交雌体百分率、混交雌体受精率和休眠卵产量等 4 项指标均有显著影响。4 克隆中, 克隆 D 的这 4 项指标均最高, 而克隆 B 的种群瞬时增长率以及克隆 A 的其他 3 项指标均最低。克隆 B 的种群瞬时增长率、种群中的混交雌体百分率和混交雌体受精率均与食物密度间无显著的相关性; 克隆 A 和 C 的种群瞬时增长率与食物密度间呈曲线相关, 而其种群中的混交雌体百分率和混交雌体受精率均与食物密度间无显著的相关性; 克隆 D 的种群瞬时增长率、种群中的混交雌体百分率和混交雌体受精率均与食物密度间呈曲线相关。这些结果表明: 镜湖萼花臂尾轮虫夏季种群内存在“克隆共存”现象, 且有些克隆间在生化遗传和生态特征方面具有明显的差异 [动物学报 51 (4): 678-684, 2005]。

关键词 萼花臂尾轮虫 夏季种群 等位酶 食物密度 孤雌生殖 有性生殖

Allozyme analysis on the summer population of *Brachionus calyciflorus* (Rotifera) in Lake Jinghu and reproductive variation among clones*

ZHANG Lei, XI Yi-Long**, DONG Li-Li, WEN Xin-Li

College of Life Sciences, Anhui Normal University, Wuhu 241000, Anhui, China

Abstract Patterns of genetic variation among *Brachionus calyciflorus* clones collected during summer from Lake Jinghu, Wuhu (China) were determined using vertical polyacrylamide gel electrophoresis of isoenzymes. Two of the six enzymes assayed-malic dehydrogenase (MDH) and glucose phosphate isomerase (GPI)—were variable, and were selected to screen the 16 clones obtained from field collections. Four composite electromorphs formed by combining isozymes variants were found in the 16 clones. The asexual and sexual reproductions of the four clones (clone A, B, C and D), each of which was randomly selected from the four composite electromorphs respectively, were compared under four concentrations (1.0, 2.0, 4.0, 8.0×10^6 cells/ml) of alga *Scenedesmus obliquus*. The results showed that there were significant effects of food concentration, clone and their interaction on the instantaneous rate of population increase, mixis rate, fertilization rate and resting egg production of *B. calyciflorus*. Among the four clones, instantaneous rate of population growth, mixis rate, fertilization rate and resting egg production of Clone D were all the largest, but the growth rate of Clone B as well as the mixis rate, fertilization rate and resting egg production of Clone A were the smallest. There were no

2005-01-17 收稿, 2005-04-25 接受

* 国家自然科学基金 (No. 30270221)、安徽省优秀青年基金 (No. 04043050)、安徽省教育厅自然科学基金重点项目 (No. 2004sys003)、“重要生物资源的保护和利用研究”安徽省重点实验室专项基金资助课题 [This research was funded by the grants from NSFC (No. 30270221), the Foundations for Excellent Youth in Anhui Province (No. 04043050), the Natural Science Foundation of Educational Department of Anhui Province (No. 2004sys003), and Provincial Laboratory of Conservation and Utilization for Important Biological Resource in Anhui]

** 通讯作者 (Corresponding author). E-mail: ylxi1965@yahoo.com.cn

© 2005 动物学报 Acta Zoologica Sinica

significant correlations between food concentration and the rate of population increase of Clone B as well as the mixis rate and fertilization rate of Clone A, B and C. However, the relationships between food concentration and the rate of population increase of Clone A and C were significantly curvilinear, with the regression equation $Y=0.019X^2-0.209X+0.638$ and $Y=0.042X^2-0.402X+0.852$, respectively. The relationships between the food concentration and the instant rate of population increase, the mixis rate and the fertilization rate of clone D were all significantly curvilinear, with the following regression equations $Y=-0.052X^2+0.609X-0.667$, $Y=0.994X^2-15.763X+73.424$ and $Y=-0.251X^2+15.940X-15.446$, respectively. We conclude that the phenomenon of "clonal coexistence" exists in the summer population of *B. calyciflorus* from Jinghu Lake, and some clones display significant variation genetically and ecologically [*Acta Zoologica Sinica* 51 (4): 678-684, 2005].

Key words *Brachionus calyciflorus*, Summer population, Allozyme, Food concentration, Asexual and sexual reproduction

种群数量的时空动态及其调节机制始终是种群生态学研究的核心问题。轮虫是各类水体中广泛分布的一类浮游动物,在自然水生态系统的物质循环和能量传递过程中具有重要的作用。由于水环境中的物理、化学和生物因子等季节性变化的影响,栖息于温度等环境条件较均一的浅水湖泊或池塘中的大肚须足轮虫 (*Euchlanis dilatata*)、盖氏晶囊轮虫 (*Asplanchna girodi*) 和褶皱臂尾轮虫 (*B. plicatilis*) 等种群内的部分克隆间不仅存在着生态特化,而且具有明显的遗传差异 (King, 1972, 1977; King and Zhao, 1987; Zhao and King, 1989)。此外,某一时期不同基因型的克隆群可共存于同一水体中 (即“克隆共存”),另一时期则存在着不同基因型的克隆群的交替出现 (即“克隆替代”) (King and Serra, 1998), 这表明轮虫种群遗传结构存在着季节变化。但是,轮虫种群遗传结构季节变化的机制是什么? 这已成为当前国际轮虫生态遗传学研究亟待解决的重要问题之一。

在种群生物学研究中,等位酶可以作为遗传标记或者作为种群遗传学研究估算标准。通过等位酶分析,可以初步了解一个种分布范围内的各种群内的基因丰富程度,描述一个物种各种群内和种群间的等位基因的组成、分布情况和等位基因在时空上的变化 (王中仁, 1994a, b)。对于以孤雌生殖为主的轮虫种群,等位酶分析发现种群内个体 (克隆) 间 (King, 1977; Snell, 1979; King and Zhao, 1987) 或地理种群 (品系) 间 (Fu et al., 1991; Pagani et al., 1991; Hagiwara et al., 1995) 的遗传组成并不相同,这说明轮虫种群内存在较高的遗传多样性。

自然水体中轮虫的食物组成及其密度也普遍具有时空变化的特点,其中食物密度是影响轮虫生殖的主要生态因子之一。有关食物密度对轮虫孤雌生殖和有性生殖的影响研究较少 (Snell, 1986), 而对不同食物密度下同种轮虫同一季节种群内不同克

隆间的比较研究尚未见报道。

本研究利用等位酶电泳技术分析了镜湖萼花臂尾轮虫夏季种群的 6 种等位酶系统,并对由具遗传差异的 4 个克隆群中分别随机选取的一个克隆在不同食物密度下的孤雌生殖和有性生殖 (以种群瞬时增长率、种群中的混交雌体百分率、混交雌体受精率和休眠卵产量等为指标) 进行了比较研究,旨在从遗传和生态两方面对夏季种群的克隆组成进行分析,为探讨轮虫种群遗传结构季节变化的机制以及轮虫种群数量变动和种群适应季节性变化的水环境的机理积累资料。

1 材料与方法

1.1 轮虫的来源与培养

实验用萼花臂尾轮虫于 2004 年 7 月采自芜湖市镜湖。镜湖所在的芜湖市地处长江沿江平原丘陵区,属典型的亚热带湿润季风气候,四季分明,年平均温度 15.7-16.0℃,极度高温 41℃,极度低温 -15℃。镜湖分大、小湖区两部分,中间有拱桥相连,整个镜湖水域面积为 0.15 km²,湖水平均深度为 2 m。根据湖区面积,分别于大、小湖区各设 4 个采样点。采样于每周二、四、六下午进行。

随机挑取样品中的轮虫非混交雌体,于温度为 (25±1)℃、自然光照 (光照强度约 30 lx, L:D=14:10) 条件下进行“克隆”培养。培养液采用 Gilbert (1963) 配方 (pH=7.3), 所用的饵料为 HB-4 培养基 (章宗涉、黄祥飞, 1991) 培养的、处于指数增长期的斜生栅藻 (*Scenedesmus obliquus*)。对最终建立的萼花臂尾轮虫 16 个克隆进行扩大培养,培养时间在 2 个月以上。

1.2 等位酶分析

1.2.1 样品制备

当轮虫培养至较高密度 (200-300 ind./ml) 时进行收集; 为避免轮虫体内食物对等位酶分析的影响,收集前先轮虫饥饿 1 d (Fu et al.,

1991), 再用孔径为 30 μm 的筛绢过滤, 过滤后的轮虫先后用蒸馏水和 Tris-HCl (0.05 mol/L, pH 8.0) 缓冲液冲洗数次, 然后放入塑料离心管中, 于 4℃ 下、8 000 r/min 离心 10 min, 迅速弃去上清液并置于低温冰箱 (-30℃) 中保存待用。电泳前将样品取出, 在冰浴下于玻璃匀浆器中匀浆, 匀浆液移入塑料离心管中, 再于 4℃ 下、10 000 r/min 离心 15 min。取上清液立即进行电泳。

1.2.2 电泳和染色方法

应用垂直板聚丙烯酰胺凝胶连续电泳, 对最终建立的镜湖萼花臂尾轮虫夏季种群的 16 个克隆进行了 6-磷酸葡萄糖脱氢酶 (6PGDH, EC 1.1.1.49)、腺苷酸激酶 (AK, EC 2.7.4.3)、乳酸脱氢酶 (LDH, EC 1.1.1.27)、葡萄糖磷酸变位酶 (PGM, EC 2.7.5.1)、葡萄糖磷酸异构酶 (GPI, EC 5.3.1.9) 和苹果酸脱氢酶 (MDH, EC 1.1.1.37) 等 6 种等位酶系统的分析。电泳和染色方法主要参考 King (1977)、胡能书和万贤国 (1985) 和 Fu et al. (1991), 并均稍加改进。染色后立即将凝胶放入 1% 冰醋酸中固定保存、拍照, 并描绘出模式图。酶谱相对迁移率的计算参照 King and Zhao (1987)。

1.3 不同食物密度下轮虫克隆间生殖差异研究

以通过等位酶分析发现的具有明显差异的 4 个克隆群中分别随机选取的 1 个克隆为研究对象, 以密度为 1.0、2.0、4.0 和 8.0×10^6 cells/ml 的斜生栅藻为轮虫的食物。实验前分别在上述四种食物密度下、于 12 ml 的玻璃试管中对轮虫进行预培养, 培养液体积均为 10 ml; 预培养时的温度、光照等条件同 1.1 所述。预培养过程中, 每 12 h 悬浮沉淀于试管底部的藻类食物一次; 每天喂食并更换培养液一次, 同时通过去除一部分个体使轮虫种群始终处于指数增长期; 预培养持续 1 周以上。

实验时, 由预培养的各试管中随机吸取带卵的非混交雌体若干个, 分别置于含有各相应食物密度的培养液中培养; 待幼体孵出后, 由各个培养液中随机吸取 90 个轮虫幼体 (龄长约 4 h), 置于含相应食物密度的 10 ml 培养液的试管中进行群体培养, 各克隆的每个食物密度组均设三个重复 (4 克隆 \times 4 食物密度 \times 3 重复); 培养时的温度、光照等条件均与预培养相同。培养 48 h 后, 对各试管中轮虫的未携卵雌体、非混交雌体和混交雌体分别进行活体计数, 用以计算轮虫种群瞬时增长率和混交雌体百分率; 计数后的轮虫及沉积于试管底部的体

眠卵返回原培养液中继续培养; 24 h 后, 再对产雄卵的混交雌体、产休眠卵的混交雌体以及休眠卵分别计数, 用以计算种群中的混交雌体受精率和休眠卵产量等参数。

各参数的计算方法分别为: 轮虫种群瞬时增长率 $r = (\ln N_t - \ln N_0) / t$, 其中 N_0 是轮虫的起始种群密度, 为 3 ind./ml; N_t 为第 t 天时轮虫的种群密度, $t = 2$ d。混交雌体百分率为种群中的混交雌体数占总雌体数的百分比; 混交雌体受精率为种群中产休眠卵的混交雌体数占总混交雌体数的百分比; 休眠卵产量为培养过程中轮虫所产休眠卵的总数。

2 结 果

2.1 等位酶电泳

通过电泳对最终建立的 16 个克隆所检测的 6 种等位酶中, 6PGDH、AK 未显现出任何有活性的区带; 显带清楚的 LDH, 由于染液浓度的不同, 其结果差异较大且伴有许多负带出现, 难以对其遗传学基础进行解释; 而 PGM 在各个克隆间并未显现任何差异, 因此对上述 4 种等位酶未作进一步的分析。GPI 和 MDH 不仅带型清晰, 而且在 16 个克隆间存在着明显的差异。

在所建立的 16 个克隆中, GPI 表现出两种酶型, 其中 10 个克隆出现 2 条谱带, 另 6 个克隆出现了 3 条谱带。按照 GPI 酶谱的不同, 将 16 个克隆分成 2 类: G1 和 G2 (图 1)。

和 GPI 类似, MDH 在 16 个克隆中也只表现出两种酶型: 有 11 个克隆出现了两条谱带, 另 5 个克隆出现了一条谱带。按照 MDH 酶谱的不同也将 16 个克隆分成 2 类: M1 和 M2 (图 2)。

根据 GPI 和 MDH 带型的组成情况, 将所建立的 16 个克隆划分为四个互不相同的克隆群; 对每种克隆的发生频率进行计算后发现, 克隆 B 的发生频率最高, 在所检测的 16 个克隆中占了一半; 而克隆 C 最低, 仅占八分之一 (表 1)。

2.2 不同食物密度下轮虫 4 个克隆间的生殖差异

4 克隆中, 轮虫的种群瞬时增长率由大到小依次为克隆 D、克隆 A、克隆 C 和克隆 B, 种群中的混交雌体百分率由大到小依次为克隆 D、克隆 B、克隆 C 和克隆 A, 混交雌体受精率为克隆 D > 克隆 C > 克隆 B > 克隆 A, 休眠卵产量为克隆 D > 克隆 B > 克隆 C > 克隆 A (表 2)。



图 1 GPI 等位酶酶谱

左为电泳图谱，右为模式图，G1 和 G2 表示两种酶型。相对迁移率以酶带迁移距离相对于指示剂迁移距离计算得到。

Fig.1 Electromorphs of glucose phosphate isomerase (GPI)

The left is electromorphs, and the right is diagram. G1 and G2 indicate the two observed patterns. Mobilities are expressed percentages and indicate the migration distance of each band relative to the brom-phenol blue tracking dye.

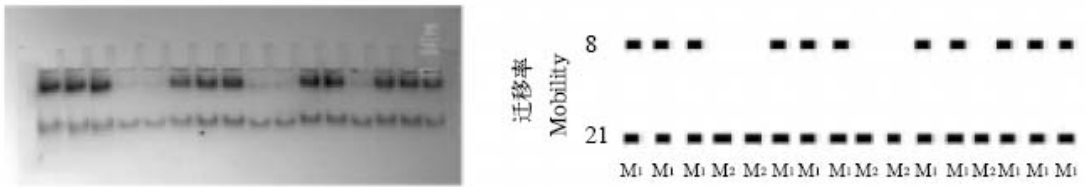


图 2 MDH 等位酶酶谱

左为电泳图谱，右为模式图，M1 和 M2 表示两种酶型。相对迁移率以酶带迁移距离相对于指示剂迁移距离计算得到。

Fig.2 Electromorphs of malic dehydrogenase (MDH)

The left is electromorphs, and the right is diagram. M1 and M2 indicate the two observed patterns. Mobilities are expressed percentages and indicate the migration distance of each band relative to the brom-phenol blue tracking dye.

表 1 所研究的克隆的相关数据

Table 1 Data on studied clones

克隆 Designation	酶谱组成 Electromorph	发生频率 Frequency	采集地点 Collection station	采集日期 Collection date
A	G2 - M1	0.1875	小湖区 (Small section)	2004.7.9
B	G1 - M1	0.5	大湖区 (Big section)	2004.7.12
C	G1 - M2	0.125	大湖区 (Big section)	2004.7.9
D	G2 - M2	0.1875	大湖区 (Big section)	2004.7.25

G=glucose phosphate isomerase. M=malic dehydrogenase.

双因素方差分析结果显示，克隆种类、食物密度及两者间的交互作用均对种群瞬时增长率、种群中的混交雌体百分率、混交雌体受精率和休眠卵产量具有显著的影响 (表 3)。

回归分析结果显示，克隆 A、C 和 D 的种群瞬时增长率 (Y, d^{-1}) 和食物密度 ($X, \times 10^6$ cells/ml) 之间均呈曲线相关，回归方程分别为：

$$Y_A = 0.019X^2 - 0.209X + 0.638$$

$$(R^2 = 0.676, P < 0.01)$$

$$Y_C = 0.042X^2 - 0.402X + 0.852$$

$$(R^2 = 0.644, P < 0.01)$$

$$Y_D = -0.052X^2 + 0.609X - 0.667$$

$$(R^2 = 0.947, P < 0.01)$$

瞬时增长率达到最大时所需的食物密度在各克隆间存在差异。克隆 A 和 C 在食物密度为 1.0×10^6 cells/ml 时瞬时增长率最大，分别为 $0.458 d^{-1}$ 和 $0.579 d^{-1}$ ；而克隆 D 的瞬时增长率在食物密度为 4.0×10^6 cells/ml 时达到最大，为 $0.931 d^{-1}$ ，且明显高于其它各实验组；克隆 B 的瞬时增长率与食物密度间则无显著的相关性。

食物密度的变化使克隆 A、B、C 和 D 种群中的混交雌体百分率的最大差异分别达 15.0%、15.9%、4.7% 和 51.5%，而不同克隆间的最大差异达 56.4%。

表 2 四个食物密度下蓼花臂尾轮虫 4 个克隆的生殖参数 (均数 ± 标准误)

Table 2 Reproductive parameters of four *B. calyciflorus* clones at four food concentrations (mean ± SE)

克隆	食物密度 (Food levels) ($\times 10^6$ cells/ml)	种群瞬时增长率 (Instant rate of population growth) (d^{-1})	混交雌体百分率 (Mixis rate) (%)	混交雌体受精率 (Fertilization rate) (%)	休眠卵产量 (Resting egg production) (ind./10 ml·3d)
A	1.0	0.458 ± 0.097	20.6 ± 13.2	0	0
	2.0	0.278 ± 0.059	14.7 ± 5.0	5.5 ± 5.5	1.7 ± 1.7
	4.0	0.113 ± 0.018	5.6 ± 4.3	0	0
	8.0	0.175 ± 0.052	12.9 ± 3.8	0	0
B	1.0	0.096 ± 0.048	21.2 ± 3.3	16.7 ± 16.7	6.0 ± 2.0
	2.0	0.211 ± 0.071	14.5 ± 3.8	0	4.3 ± 2.3
	4.0	0.090 ± 0.028	29.0 ± 2.6	0	11.0 ± 1.0
	8.0	0.116 ± 0.096	30.4 ± 7.0	8.3 ± 8.3	20.3 ± 2.4
C	1.0	0.579 ± 0.048	14.8 ± 1.4	16.7 ± 16.7	0
	2.0	0.064 ± 0.040	17.3 ± 1.4	0	6.3 ± 0.7
	4.0	-0.007 ± 0.025	12.6 ± 3.2	0	3.3 ± 1.7
	8.0	0.318 ± 0.161	17.3 ± 6.1	1	5.0 ± 2.0
D	1.0	-0.119 ± 0.007	62.1 ± 13.0	0	0
	2.0	0.358 ± 0.038	39.9 ± 2.0	15.9 ± 4.3	5.3 ± 1.7
	4.0	0.931 ± 0.023	29.3 ± 2.2	44.1 ± 2.9	4.0 ± 0.6
	8.0	0.885 ± 0.136	10.5 ± 2.3	96.0 ± 2.0	120.0 ± 12.1

表 3 四个食物密度下蓼花臂尾轮虫 4 个克隆的生殖参数的双因素方差分析结果

Table 3 Results of the analysis of variance on the reproductive parameters of four *B. calyciflorus* clones at four food concentrations

因素 (Factors)	种群瞬时增长率 (Instant rate of population growth)	混交雌体百分率 (Mixis rate)	混交雌体受精率 (Fertilization rate)	休眠卵产量 (Resting egg production)
克隆 (Clone)	**	**	**	**
食物密度 (Food concentration)	*	*	**	**
克隆 × 食物密度 (Clone × Food concentration)	**	**	**	**

显著性水平: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ 。Significance levels: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ 。

克隆 D 种群中的混交雌体百分率 (Y_m , %) 和混交雌体受精率 (Y_f , %) 均与食物密度 (X , $\times 10^6$ cells/ml) 间呈曲线相关, 回归方程分别为:

$$Y_m = 0.994X^2 - 15.763X + 73.424$$

$$(R^2 = 0.768, P < 0.01)$$

$$Y_f = -0.251X^2 + 15.940X - 15.446$$

$$(R^2 = 0.988, P < 0.01)$$

克隆 A、B 和 C 种群中的混交雌体百分率和混交雌体受精率均与食物密度间无显著的相关性; 但克隆 C 在食物密度为 8.0×10^6 cells/ml 时的混交雌体受精率较其它各实验组高; 而克隆 D 在食物密度为 8.0×10^6 cells/ml 时的休眠卵数量达 120 ind./ (10 ml · 3d), 远高于其它实验组 ($P < 0.01$)。

3 讨论

本研究对最终建立的蓼花臂尾轮虫夏季种群中的 16 个克隆检测了 6 种等位酶系统。尽管只对其中的两种等位酶 GPI 和 MDH 进行了分析, 但是这 16 个克隆的遗传组成差异还是很明显的。根据 GPI 和 MDH 酶谱的差异所筛选出的 4 个克隆群, 不仅遗传组成上互不相同, 而且各自在所研究的 16 个克隆中所占的比例也存在着差异, 这至少说明了蓼花臂尾轮虫夏季种群内的克隆间存在着很高的变异。King and Zhao (1987) 通过分析 3 种等位酶而对褶皱臂尾轮虫种群的研究也得到了类似的结论。

已有的研究表明, 遗传因素是影响轮虫种群增长的重要内源性因素 (Lubens, 1987)。遗传

因素对轮虫种群增长的影响表现为同种轮虫不同品系(或克隆)种群增长所需的最适食物密度不同。Guisande and Mazuelos (1991) 发现萼花臂尾轮虫的种群增长率在食物密度为 $12.4 \mu\text{g}/\text{ml}$ 时达最大值, 高于或低于该值时轮虫的种群增长率均呈下降趋势。席貽龙等(2000) 发现萼花臂尾轮虫种群增长所需的最适斜生栅藻密度为 $6.0 \times 10^6 \text{ cells}/\text{ml}$ 。本研究发现, 不同克隆的萼花臂尾轮虫种群瞬时增长率达到最大值时所需的食物密度也存在较大的差异。遗传因素对轮虫种群增长的影响还表现为同种轮虫不同品系间的种群增长率也存在着显著的差异。Xi et al. (2002) 对采自广州和芜湖两地的萼花臂尾轮虫种群增长率的比较研究发现, 广州品系轮虫的种群增长率显著高于芜湖品系。本研究发现, 4 克隆间, 轮虫的种群瞬时增长率由大到小依次为克隆 D、克隆 A、克隆 C 和克隆 B。

遗传因素也是影响轮虫有性生殖发生幅度的重要内源性因素(席貽龙、黄祥飞, 1999)。不同品系的褶皱臂尾轮虫、龙大椎轮虫(*Notommata copeus*)、圆形臂尾轮虫(*B. rotundiformis*) 和萼花臂尾轮虫在混交雌体产生和休眠卵形成等方面均存在着差异(Hino and Hirano, 1977; Pourriot and Clement, 1977; Hagiwara et al., 1988; Hagiwara, 1994; Xi et al., 2004)。本研究中, 4 克隆间, 克隆 D 的种群瞬时增长率、种群中的混交雌体百分率、混交雌体受精率和休眠卵产量均最大, 而克隆 B 的种群瞬时增长率以及克隆 A 种群中的混交雌体百分率、混交雌体受精率和休眠卵产量均最小。可见, 4 克隆在有性生殖的发生、过程和结局——混交雌体的产生、受精作用和休眠卵形成等方面均存在着明显的差异。

鉴于各克隆间在生殖参数及其与食物密度间的关系等方面所存在的差异, 可以认为, 4 克隆间不仅在生化遗传特征方面存在着差异, 而且在生态特征方面也各不相同。

Snell (1980) 发现, 环境条件的改变对水体中同期出现的盖氏晶囊轮虫不同克隆的影响不同; King and Serra (1998) 认为, 如果同期出现的同种轮虫的不同克隆具有不同的种群增长参数, 那么它们的有性生殖也不相同。本研究结果不仅丰富了 Snell (1980) 的结论, 且证实了 King and Serra (1998) 的推测, 即食物密度的改变对萼花臂尾轮虫夏季种群中不同克隆的孤雌生殖和有性生殖均具有不同的影响; 不同克隆的种群增长参数不同, 其

有性生殖参数间也存在较大的差异。

一般认为, 分布于水体沉积物的轮虫休眠卵的萌发是对适宜于轮虫生存和繁殖的环境条件的响应。据此, 可以认为, 七月的镜湖水环境至少适宜于本研究所涉及的 4 种基因型的轮虫克隆群; 这或许也是 4 个不同的克隆群能同时共存于夏季镜湖中的重要原因。而有性生殖的发生是轮虫对不适宜的环境条件的反应, 休眠卵的形成则是轮虫由不适宜的环境条件向适宜的环境条件过渡的桥梁。从这个意义上来说, 本研究所比较的四个萼花臂尾轮虫克隆中, 由于克隆 A、B 和 C 在较低的食物密度下有较高的种群瞬时增长率和较低的混交雌体百分率, 因此它们比较适应食物密度较低的环境; 而克隆 D 则相反。尽管在本研究所用样品的采集之后镜湖水环境中可被轮虫所利用的各类食物的密度不得而知, 但从本研究首次发现的四个不同的萼花臂尾轮虫克隆间在孤雌生殖和有性生殖发生幅度等方面所存在的差异可以推测, 各克隆在七月份之后从水环境中的消失(温新利等, 2005) 很可能与其中的食物密度的变化具有一定的关系。当然, 从种群生态学和进化生态学等的角度来看, 克隆共存的前提是不同基因型的克隆群至少应在竞争能力和个体适合度等方面相同, 或具有明显的生态位分化, 或自然水环境的多变不足以形成稳定的环境而导致克隆间的竞争。相反, 随着季节的变化, 共存的克隆群的相继消失则意味着其在竞争能力或个体适合度等方面可能处于劣势。所有这些问题, 将有待于进一步的研究。

参考文献 (References)

- Fu Y, Hirayama K, Natsukari Y, 1991. Genetic divergence between S and L type strains of the rotifer *Branchionus plicatilis* O.F.Müller. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 151: 43–56.
- Gilbert JJ, 1963. Mictic female production in rotifer *Branchionus calyciflorus*. J. Exp. Zool. 153: 113–124.
- Guisande C, Mazuelos N, 1991. Reproductive pattern of *Branchionus calyciflorus* Pallas at different food concentrations. J. Plankton Res. 13 (2): 279–286.
- Hagiwara A, Hino A, Hirano R, 1988. Comparison of resting egg formation among five Japanese stocks of the rotifer *Branchionus plicatilis*. Nippon Suisan Gakkaishi 54: 577–580.
- Hagiwara A, 1994. Practical use of rotifer cysts. The Israeli Journal of Aquaculture-Bamidgeh 46: 13–21.
- Hagiwara A, Kotani T, Snell TW, Assava-Aree M, Hirayama K, 1995. Morphology, reproduction, genetics, and mating behavior of small, tropical marine *Branchionus* strains (Rotifera). J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 194: 25–37.
- Hino A, Hirano R, 1977. Ecological studies on the mechanism of bisexual reproduction in the rotifer *Branchionus plicatilis*. II. Effects of cumulative parthenogenetic generations. Bull. Jap. Soc. Sci. Fish. 43: 1 147–1 155.
- Hu NS, Wan XG, 1985. The Technology of Isoenzymes and Its Appli-

- cation. Changsha: Hunan Science and Technology Publication (In Chinese).
- King CE, 1972. Adaptation of rotifers to seasonal variation. *Ecology* 53: 408–418.
- King CE, 1977. Genetics of reproduction, variation and adaptation in rotifers. *Arch. Hydrobiol. Beih.* 8: 187–201.
- King CE, Zhao Y, 1987. Coexistence of rotifer *Branchionus plicatilis* clones in Soda Lake, Nevada. *Hydrobiologia* 147: 57–64.
- King CE, Serra M, 1998. Seasonal variation as a determinant of population structure in rotifers reproducing by cyclical parthenogenesis. *Hydrobiologia* 387/388: 361–372.
- Lubzens E, 1987. Raising rotifers for use in aquaculture. *Hydrobiologia* 147: 245–255.
- Pagani M, Ricci C, Bolzern AM, 1991. Comparison of five strains of a parthenogenetic species *Macrotrachela quadricornifera* (Rotifera: Bdelloidea): II. *Isoenzymatic patterns*. *Hydrobiologia* 211: 157–163.
- Pourriot R, Clement P, 1977. Comparison of the control of mixis in three clones of *Notommata copeus*. *Arch. Hydrobiol. Beih.* 8: 174–177.
- Snell TW, 1979. Intraspecific competition and population structure in rotifers. *Ecology* 60: 494–502.
- Snell TW, 1980. Blue-green algae and selection in rotifer population. *Oecologia* 46: 343–346.
- Snell TW, 1986. Effect of temperature, salinity and food level on sexual and asexual reproduction in *Branchionus plicatilis* (Rotifera). *Marine Biology* 92: 157–162.
- Wang ZR, 1994a. The genetic basis of allozyme analysis (Part 1). *Chinese Biodiversity* 2 (3): 149–156 (In Chinese).
- Wang ZR, 1994b. The genetic basis of allozyme analysis (Part 2). *Chinese Biodiversity* 2 (4): 213–219 (In Chinese).
- Wen XL, Xi YL, Zhang L, Lu XJ, 2005. Analysis of community structure of rotifera and ecological assessment of water quality in Lake Jinghu in Wuhu City. *Acta Hydrobiologica Sinica* (In Chinese) (in press).
- Xi YL, Huang XF, 1999. Advances in studies on the ecological mechanism of the formation and hatching of resting eggs of rotifers. *Acta Hydrobiologica Sinica* 23 (1): 73–82 (In Chinese).
- Xi YL, Huang XF, Wang BQ, Xu YX, 2000. The effect of environmental factors on the population dynamics of *Branchionus calyciflorus*. *J. Anhui Nor. Uni. (Nat. Sci.)* 23 (4): 334–338 (In Chinese).
- Xi YL, Liu GY, Jin HJ, 2002. Population growth, body size, and egg size of two different *Branchionus calyciflorus* strains fed different algae. *Journal of Freshwater Ecology* 17: 185–190.
- Xi YL, Dong LL, Ge YL, Liu GY, 2004. Resting egg production of *Branchionus calyciflorus* (Rotifera) at different water temperatures. *Journal of Freshwater Ecology* 19 (4): 567–573.
- Zhao Y, King CE, 1989. Ecological genetics of the rotifer *Branchionus plicatilis* in Soda Lake, Nevada, USA. *Hydrobiologia* 185: 175–181.
- Zhang ZS, Huang XF, 1991. Method for Study on Freshwater Plankton. Beijing: Science Press, 410–411 (In Chinese).
- 胡能书, 万贤国, 1985. 同工酶技术及其应用. 湖南科学技术出版社.
- 王中仁, 1994a. 等位酶分析的遗传学基础. 生物多样性 2 (3): 149–156.
- 王中仁, 1994b. 等位酶分析的遗传学基础. 生物多样性 2 (4): 213–219.
- 温新利, 席贻龙, 张雷, 陆星家, 2005. 芜湖市镜湖轮虫群落结构分析及水质生态学评价. 水生生物学报 (刊印中)
- 席贻龙, 黄祥飞, 1999. 轮虫休眠卵形成和萌发的生态机理研究进展. 水生生物学报 23 (1): 73–82.
- 席贻龙, 黄祥飞, 汪本勤, 许蕴娴, 2000. 环境因子对萼花臂尾轮虫种群动态的影响. 安徽师范大学学报 (自然科学版) 23 (4): 334–338.
- 章宗涉, 黄祥飞, 1991. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 410–411.