

舟山群岛黄毛鼠种群的遗传多样性 及多重父权研究

谭江东^① 刘小丽^① 韩金巧^① 王艳妮^{①②*} 黄相相^① 任鹏^①

① 浙江师范大学生态研究所 金华 321004; ② 浙江省野生动物生物技术与保护利用重点实验室 金华 321004

摘要: 岛屿常被生态学家和进化生物学家视为研究生物进化的天然实验室。本研究利用微卫星分子标记技术,分析了舟山群岛优势鼠种——黄毛鼠(*Rattus losea*)刺山岛种群、六横岛种群、桃花岛种群3个种群的遗传多样性,并探讨该物种是否存在多重父权现象。研究表明,(1)黄毛鼠种群的平均观测等位基因数(N_A)和平均有效等位基因数(N_e)分别为8.792和5.494,平均期望杂合度(H_e)和平均观测杂合度(H_o)分别为0.821和0.956,多态信息含量(PIC)均大于0.5,说明3个种群均具有较高的遗传多样性;(2)3个种群的平均遗传分化系数(F_{st})为0.040,其中桃花岛种群与刺山岛种群的分化最大,分化系数为0.052,呈中度分化水平,不同种群间所贡献的变异百分数为3.98%,说明遗传变异主要发生在种群内,而种群间仅存在很小的遗传变异;(3)14只孕鼠中,有6只孕鼠的胚胎存在多重父权现象,占43%,最小父本值为2,其余8个孕鼠的胚胎均只有唯一父本。本研究提出黄毛鼠存在多重父权现象,为该物种繁殖策略及鼠害控制的研究提供依据。

关键词: 黄毛鼠; 遗传多样性; 多重父权; 微卫星分子标记

中图分类号: Q953 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263 (2018) 04-572-10

Genetic Diversity and Multiple Paternity of *Rattus losea* in Zhoushan Archipelago

TAN Jiang-Dong^① LIU Xiao-Li^① HAN Jin-Qiao^① WANG Yan-Ni^{①②*}
HUANG Xiang-Xiang^① REN Peng^①

① Institute of Ecology of Zhejiang Province, Jinhua 321004; ② Key Lab of Wildlife Biotechnology and Conservation and Utilization of Zhejiang Province, Jinhua 321004, China

Abstract: Islands are often regarded as natural laboratories for the study of biological evolution by ecologists and evolutionary biologists. Based on microsatellite molecular marker technology, we analyzed the genetic diversity of three *Rattus losea* populations in Zhoushan Archipelago, and calculated the related genetic parameters and the coefficient of genetic differentiation with the software POPGEN 32 and ARLEQUIN 3.0, respectively. We also calculated the minimum paternal value with the software GERUD 2.0, and found the

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 31200323);

* 通讯作者, E-mail: wangyn@zjnu.cn;

第一作者介绍 谭江东, 女, 硕士研究生; 研究方向: 生物多样性保护; E-mail: jealytan@163.com。

收稿日期: 2017-09-22, 修回日期: 2018-02-26 DOI: 10.13859/j.cjz.201804008

existence of multiple paternity. The results were as following: (1) The average observed number of alleles (N_A) and the average effective number of alleles (N_e) were 8.792 and 5.494, respectively (Table 2); the average expected heterozygosity (H_e) and the average observed heterozygosity (H_o) were 0.821 and 0.956, respectively; the polymorphism information content (PIC) were larger than 0.5 (Table 2), which indicated that three populations had a high degree of genetic diversity. (2) The average genetic differentiation value among three populations was 0.040, and the value between Taohua island and Cishan island was the largest ($F_{st} = 0.052$), showing a moderate level of differentiation. The percentage of variation among three populations accounted for 3.98% (Table 4), which indicated that the differentiation occurred mainly within the populations. (3) Six out of the fourteen pregnant rats (43%) had their embryos with multiple paternity (Fig. 3). The minimum paternal value was 2 (Table 5), and the embryos of the other pregnant rats had only one father. This study proposed the existence of multiple paternity phenomenon of *R. losea* populations in Zhoushan Archipelago, and provided useful information for the study of reproductive strategy and pest control of *R. losea* populations.

Key words: *Rattus losea*; Genetic diversity; Multiple paternity; Microsatellite molecular marker

岛屿作为研究生物进化的“天然实验室”，存在着地理隔离、生物类群简单、形成历史较清晰等优势 (Mayr 1967)。对同一物种而言，岛屿上的个体可能与大陆经历不同的选择压力，因此岛屿种群更可能走快速进化的路线，甚至可能形成新的物种 (Millien 2006)。大部分关于岛屿脊椎动物的研究，都认为岛屿物种遗传多样性降低 (Frankham et al. 2013)，且与大陆物种间的遗传分化增加 (Cheylan et al. 2010)。对岛屿物种遗传方面的研究多集中于遗传变异及遗传分化水平的高低、岛屿面积及其隔离度对遗传多样性的影响、生境片断化等对岛屿物种形成的影响。舟山群岛岛屿数量繁多、各岛屿的形状、隔离度和面积等存在差异，岛上物种较少，迁移率较低。对岛屿物种的研究有助于深入理解隔离对物种形成和适应辐射的重要性 (Losos et al. 2010)。

多重父权 (multiple paternity) 是指雌性动物在同一动情期内与多个雄性个体交配且受孕，产下的多个幼仔具有不同的父亲，即同一窝后代中存在同母异父的兄弟姐妹的现象 (Townsend et al. 2015)。根据以往的研究显示，800 多个物种均存在多重父权现象，尤其是鼠类 (Portnoy et al. 2012, Janse et al. 2013)，如

根田鼠 (*Microtus oeconomus*) (Costa et al. 2016)、布氏田鼠 (*Lasiopodomys brandtii*) (Huo et al. 2010)、褐家鼠 (*Rattus norvegicus*) (Ala-Honkola et al. 2011) 等。多重父权往往需要较高的繁殖成本 (Thrall et al. 1997)，由于和多个雄性交配，过程增加了潜在疾病的感染率 (Nunn et al. 2014)，还增加了精子辅助蛋白的暴露，使得雌性的繁殖力和寿命显著降低 (Orsetti et al. 2003)。然而，多重交配所带来的益处比其付出的成本要高出许多。例如，可以通过选择多个交配对象来获得优秀的、具有竞争力的基因来保证后代的繁殖成功率，该策略还能降低雄性之间的斗争 (Costello et al. 2009, Patzenhauerová et al. 2013)。综上所述，多重父权是增加后代遗传多样性和适合度的一条途径 (Li et al. 2010)，同时也避免了近亲交配所带来的缺陷 (Klemme et al. 2014)。

黄毛鼠 (*R. losea*) 隶属于啮齿目 (Rodentia) 鼠科 (Muridae) 大鼠属，是某些病毒、细菌和寄生虫的寄主和传播者，其中的一些细菌属于人畜共患病，如钩端螺旋体 (*Leptospira*)、立克次氏体 (*Rickettsia*) 等，严重威胁着人类的健康 (郭永旺 2014)。此外，黄毛鼠还威胁着中国南方水稻种植地区农业的稳定发展 (刘汉

武等 2011), 其中以广东表现得最为明显 (姚丹丹等 2013)。传统的鼠类控制方法包括在高发区化学药剂灭杀、环境改造以及动物干预等。但是快速繁殖和扩散使得反弹更加严重, 限制了干预的成果 (Glass et al. 2009), 也给环境带来了不可恢复的伤害。有研究指出, 可以通过研究其繁殖特点, 从生态学角度来适时控制或降低鼠害的发生概率。对于黄毛鼠的繁殖特性及婚配制度, 目前仅有通过行为观测推断黄毛鼠为多配制的报道 (陈琴等 2011)。本文利用分子生物学技术研究舟山群岛黄毛鼠种群的遗传多样性, 并深入分析黄毛鼠是否存在多重父权现象, 进一步为其繁殖策略及鼠害防治的研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用样本来自 2016 年 5 月至 6 月在浙江省舟山群岛的刺山岛、六横岛和桃花岛捕获的 117 只黄毛鼠个体, 具体见表 1。黄毛鼠肌肉样本和胚胎样本存放于 75% 酒精中, 带回实验室, 冰箱保存。

1.2 基因组总 DNA 提取与 PCR 产物分析

取黄毛鼠肌肉组织、胚胎组织各 20 ~ 25 mg, 用去离子水洗去酒精, 吸干水分, 剪碎, 用经典的酚-氯仿抽提法提取基因组 DNA, DNA 纯化后 4 °C 保存。紫外分光光度计法检测 DNA 纯度, A_{260}/A_{280} 值在 1.8 ~ 2.0 之间的, 表示纯度良好, 可满足黄毛鼠分子生物学实验 (吕俊宣等 1984)。选取 8 对高度多态性微卫星引物进行 PCR 扩增 (韩金巧等 2017) (表 2), 荧

表 1 采样样本分布

Table 1 Sampling distribution

种群 Population	岛屿面积 Island area (km ²)	成年鼠数量 (只) No. of adult (ind)	孕鼠数量 (只) No. of pregnancy (ind)	胚胎数量 No. of embryo	成年雄鼠数量 (只) No. of adult male (ind)
刺山岛 Cishan island	0.64	65	6	31	32
六横岛 Liuheng island	93.66	29	4	20	14
桃花岛 Taohua island	40.37	23	4	22	12
总数 Total	134.67	117	14	73	58

表 2 微卫星位点及引物相关信息

Table 2 Microsatellite loci and information of primer sequences

位点 Loci	引物序列 (5' - 3') Primer sequence	所在染色体 Chromosome loci	扩增片段大小 (bp) Size range	重复序列 Repeat sequence	退火温度 (°C) Annealing temperature
TNF	F-AGGAAATGGGTTTCAGTTCC R-CAGGATTCTGTGGCAATCTG	20	110 - 140	(AC) ₄₆	60.0
FGG	F-CAGCAACGACAAAAATGTCC R-ATCTCCCAACTGTCAAATG	2	130 - 190	(GT) ₂₁	60.0
APOC3	F-GATTTGAAGCGATTGTCCAT R-GTCTAGCTGCCACAGGAG	8	110 - 150	(GT) ₂₇	59.3
MYC	F-GGGAGTAAAAGAGTGCATTCC R-TACCCCAATCCTGAACCAC	7	100 - 150	(AC) ₂₆	54.0
HP	F-GTACAGGAACACTGCCCTTG R-GGAATGTGTATGTGTGATGACG	19	140 - 180	(GT) ₂₈	60.0
IGHE	F-CTTCCCTACCTTCTACAACAACATA R-GTAAACCAAAGAGCATGATGAAG	6	120 - 170	(CA) ₂₃	56.3
SCN2A	F-TTCAGGTATGATTCGGGAAC R-ATTGGCGATATCAATTCACAAAC	3	120 - 170	(GT) ₂₉	58.1
D15Mit5	F-GTTTCATTGGTCAATGGAAAACCTTA R-CTTCCTAATTCCTGTCAAGCAAAT	15	120 - 160	(AC) ₂₅	58.1

光标记引物由生工生物工程（上海）股份有限公司合成。PCR 产物进行基因扫描检测与分型。每个样本的同一位点重复检测两次以上，直到结果一致方可采用。

1.3 数据分析

使用 POPGEN 32 计算种群的等位基因数 (number of alleles, N_A)、有效等位基因数 (number of effective alleles, N_e)、观测杂合度 (observed heterozygosity, H_o)、期望杂合度 (expected heterozygosity, H_e)、Nei 氏遗传距离 (genetic distance, D)，并检测是否符合 Hardy-Weinberg 平衡；运用 CERVUS 3.0 分析种群的多态性信息含量 (polymorphism information content, PIC)；使用 ARLEQUIN 3.0 计算种群的 F-统计量分化系数 (F_{st})，并进行分子方差分析(AMOVA)，确定遗传分化水平 Φ_{st} ；运用 GERUD 2.0 软件确定最小父本数 (F_{min})，判断是否存在多重父权现象 (Jones 2001)。

2 结果及分析

2.1 基因组总 DNA 的鉴定

提取并纯化后的 DNA 样品用 100 μ l 的 TE 进行溶解稀释，取 3 μ l 用 1% 的琼脂糖凝胶进行电泳，部分 DNA 电泳结果见图 1。紫外分光光度计法检测 DNA 纯度， A_{260}/A_{280} 值除了极少

数大于 2.0 外，其余的大都在 1.8 ~ 2.0 之间。

2.2 PCR 产物的检测

PCR 产物在 ABI 3700 DNA 序列测定仪上进行基因分型，结果用 Genemapper 4.0 软件读取，以引物 APOC3 和 IGHE 的基因扫描图为例 (图 2)。由图可知，PCR 结果良好，并无扩增其他杂带的现象。

2.3 遗传多样性及遗传结构分析

8 个微卫星位点的平均等位基因数 (N_A) 与平均有效等位基因数 (N_e) 分别为 8.792 和 5.494，平均期望杂合度 (H_e) 与平均观测杂合度 (H_o) 分别为 0.956 和 0.821，8 个位点均偏离 Hardy-Weinberg 平衡 ($P < 0.005$)。3 个黄毛鼠种群的平均多态性信息含量 (PIC) 为 0.787，最高为刺山岛种群 (0.806)，最低为桃花岛种群 (0.759) (表 3)，3 个种群均具有较高的遗传多样性。3 种群间的平均遗传距离为 0.290，其中，桃花岛种群和刺山岛种群间的 Nei 氏遗传距离最大，为 0.302 (表 4)，这与地理距离的结果保持了高度的一致性。桃花岛种群与六横岛种群的遗传距离和地理距离皆为最小。我们对 3 个种群的遗传距离和地理距离进行相关性分析，发现二者并无显著相关性 ($P = 0.571$)。

3 个黄毛鼠种群的平均遗传分化系数 (F_{st}) 值为 0.040，根据 Wright (1950) 的划分， F_{st}

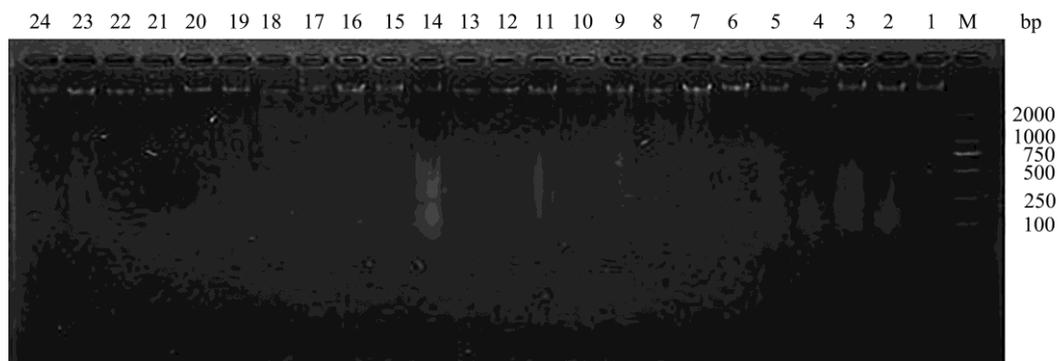


图 1 部分组织样本的总 DNA 鉴定

Fig. 1 Total DNA identification of tissue samples

M. DL2000 DNA 分子量标准；1 ~ 24. 24 个个体的总 DNA。M. DL2000 DNA marker; 1 - 24. Total DNA of 24 individual.

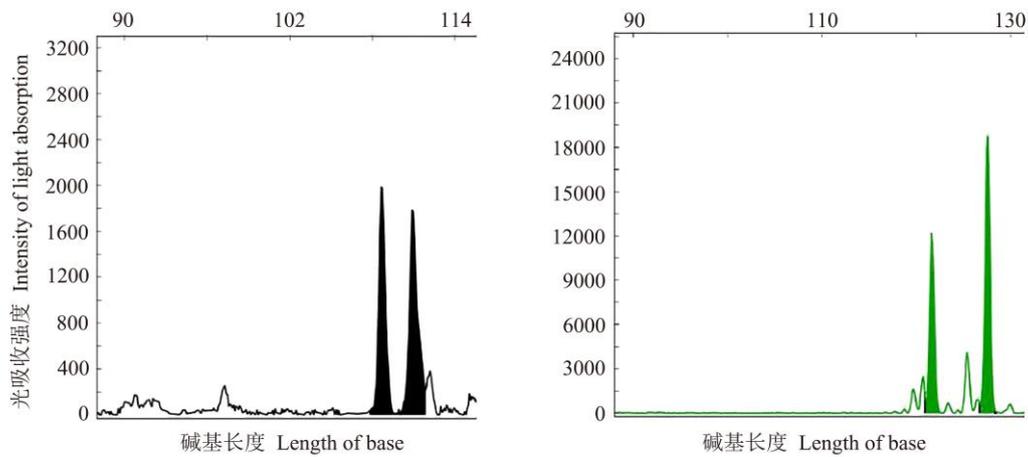


图 2 引物 APOC3 (左) 和 IGHE (右) 扩增产物的基因扫描结果

Fig. 2 The GenScan results of PCR products from primer APOC3 (left) and IGHE (right)

图中吸收峰代表在对应碱基长度时，引物中的荧光被最大吸收。

When the absorption peak represents the corresponding base length, the fluorescence in the primer is maximally absorbed.

表 3 黄毛鼠种群遗传多样性参数

Table 3 Genetic diversity parameters of *Rattus losea* populations

种群 Population	样本数 Sample size	等位基因数 Number of alleles	有效等位基因数 Number of effective alleles	观测杂合度 Observed heterozygosity	期望杂合度 Expected heterozygosity	多态信息含量 Polymorphism information content
刺山岛 Cishan island	59	8.875	5.902	0.955	0.833	0.806
桃花岛 Taohua island	25	8.250	4.931	0.944	0.800	0.759
六横岛 Liuheng island	19	9.250	5.648	0.968	0.830	0.797

表 4 3 个黄毛鼠种群间的遗传距离与地理距离比较

Table 4 Genetic distance and geographic distance among 3 *Rattus losea* populations

	六横岛 Liuheng island	桃花岛 Taohua island	刺山岛 Cishan island
六横岛 Liuheng island		0.282	0.282
桃花岛 Taohua island	18.1		0.302
刺山岛 Cishan island	24.2	25.0	

表中对角线下方数据表示地理距离 (km)，对角线上方数据表示遗传距离。

Data above diagonal represents geographic distance (km), the below diagonal indicates genetic distance.

表 5 3 个黄毛鼠种群微卫星位点的分子方差分析

Table 5 Analysis of molecular variance (AMOVA) of 8 microsatellite loci among 3 *Rattus losea* populations

变异来源 Source of variation	总平方和 Sum of squares	方差组分 Variance components	变异百分数 (%) Percentage of variation
种群间 Among populations	28.75	0.12	3.98
种群内 Within populations	884.93	2.79	96.02
总变异 Total variation	913.68	2.91	100

值在 0 ~ 0.05 之间，种群间存在很小的遗传分化，桃花岛种群与刺山岛种群分化水平最高，在 0.05 ~ 0.15 之间，为中度分化水平 ($F_{st} = 0.052$)。

2.4 多重父权分析

14 只孕鼠中，胚胎数最少为 3，最多的胚胎数为 7。运用 GERUD 软件判定最小父本数 F_{min} ，从而确定是否存在多重父权现象，判定结果见图 3。编号 C1、C3、C5、T1、T2、T3 的孕鼠的胚胎存在至少 2 个父本。例如，C1 孕

鼠的 6 个胚胎中有 4 个来源于同一父本，另外 2 个胚胎源于另外一个父本。

对存在至少两个父本的胚胎，可能的父本基因型由软件 GERUD 获得 (表 6)。在所研究的 14 只孕鼠中，其胚胎存在多重父权现象的有 6 只，比例占 43%，表明舟山群岛黄毛鼠种群存在多重父权现象。

3 讨论

随着微卫星分子标记技术的成熟，生物多

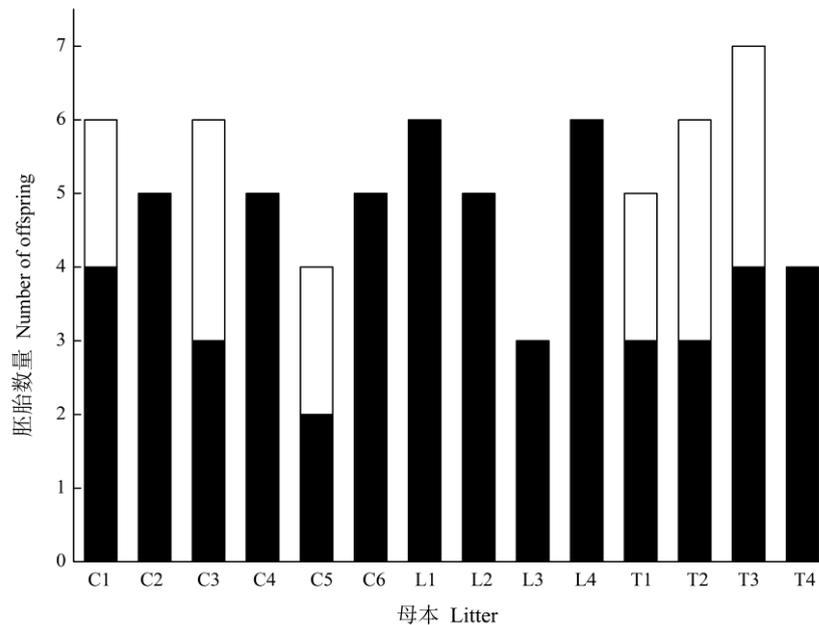


图 3 胚胎的父本分布关系图

Fig. 3 Distribution pattern of embryos and their fathers

C1 ~ C6 为刺山岛种群孕鼠的胚胎样本；L1 ~ L4 为六横岛种群孕鼠的胚胎样本；T1 ~ T4 为桃花岛种群孕鼠的胚胎样本。黑色代表一个父本；白色代表另一个父本。

C1 - C6 represented the embryos of the pregnancy rats of Cishan island population; L1 - L4 represented the embryos in Liuheng island population; T1 - T4 represented the embryos in Taohua island population. Black represents a father; White represents the other father.

表 6 具有多重父权现象的胚胎父本基因型分布
Table 6 Genotype distribution of the potential fathers of the embryos with multiple paternity

种群 Population	母本 (胚胎数) Mather (Number of embryos)	可能父本不同位点基因型分析 Genotype distribution of the potential fathers											子代数量 Progeny	
		APOC3	DI5	SCN2A	HP	MYC	TNF	FGG	IGHE					
荆山岛 Cishan island	母本 Mother	125/121	114/120	122/128	153/157	117/123	118/126	141/145	128/132					
	父本 1 Father 1	125/129	114/126	122/130	155/155	121/127	110/118	151/145	124/136					4
	父本 2 Father 2	121/155	120/120	122/122	165/161	121/119	114/124	141/141	124/122					2
	母本 Mother	115/121	118/120	124/130	143/155	117/123	118/126	141/145	128/132					
	父本 1 Father 1	125/125	120/120	124/132	147/151	125/125	120/120	147/151	124/132					3
	父本 2 Father 2	115/121	126/126	132/132	147/151	129/117	114/114	147/151	132/132					3
桃花岛 Taohua island	母本 Mother	123/129	116/122	126/128	155/157	121/125	114/120	141/147	124/128					
	父本 1 Father 1	117/117	126/116	128/128	143/143	127/121	114/120	143/143	120/120					2
	父本 2 Father 2	129/129	126/116	128/128	157/161	127/121	120/120	143/159	120/120					2
	母本 Mother	117/123	116/122	124/130	143/155	119/121	120/120	143/159	130/136					
C1 (n = 6)	父本 1 Father 1	127/123	124/114	132/124	159/149	125/119	124/116	151/151	124/128					3
	父本 2 Father 2	117/117	114/114	130/130	141/143	119/129	124/116	151/151	124/128					2
	母本 Mother	117/125	116/124	124/128	149/155	117/121	116/120	141/145	128/132					
	父本 1 Father 1	117/129	116/116	124/124	145/155	115/121	114/114	145/145	124/128					3
	父本 2 Father 2	117/129	116/116	124/124	145/155	119/121	114/124	141/141	124/136					3
	母本 Mother	119/125	116/124	128/130	143/145	105/107	118/124	145/149	132/136					
C3 (n = 6)	父本 1 Father 1	131/119	116/116	124/126	141/143	107/123	124/124	151/153	128/136					4
	父本 2 Father 2	125/125	112/124	124/126	149/149	119/123	118/120	149/149	128/128					3

表中基因型分析数据分别表示两等位基因片段的大小 (bp)。The genetic analysis data in the table respectively represent the size of the two alleles (bp).

样性研究也更加准确、深入。本研究通过分析舟山群岛黄毛鼠种群的遗传多样性,发现3个种群的观测杂合度均高于期望杂合度。由于岛屿形成于约1万年前(武汉地质学院地史教研室 1980),且原来与大陆相连,自晚更新世以来,经历了不同程度的3次海侵和2次海退,最终彻底暴露(王鸿祯等 1980)。我们认为,由于环境的急剧恶劣与变化,使得岛上的黄毛鼠个体数减少,每个岛上的黄毛鼠种群的等位基因频率发生改变(徐卫祥等 2012)。经历了瓶颈效应,从而使得杂合子过剩(赵新春等 2016),导致观测杂合度高于期望杂合度。此外,也曾考虑是由于远交造成此结果,但鉴于舟山群岛形成已久,黄毛鼠虽善潜水,但无法穿越几十千米的大海,故认为远交的可能性不大。

遗传距离和地理距离之间的相关性也是分子生态学家关注的问题。庆宁等(2011)研究了我国华南6个省市地区及4个主要大陆架岛屿的12个黑眶蟾蜍(*Bufo melanostictus*)种群,发现其种群间的遗传距离与地理距离呈低度相关。而周乐等(2007)对4个高原鼠兔(*Ochotona curzoniae*)地理种群的研究表明,地理距离与遗传距离间无显著相关性,认为导致该结果的主要原因是样本量少、取样范围窄以及微卫星位点较少(7对)。本研究结果显示,3个岛屿种群间的遗传距离与地理遗传距离也无显著相关性,我们认为,一方面可能由于本研究的实验岛屿数量较少,范围较小;另一方面也可能与所选的微卫星位点数量较少有关。后期仍需加大岛屿调查范围,进一步得出更精准的结论。

本研究胚胎是否存在多重父权时,由于母本基因型已知,保证其胚胎至少有一个等位基因与母本相同,存在多重父权的比例达到43%。Huo等(2010)对布氏田鼠种群的研究结果显示,存在多重父权的个体占46%;褐家鼠存在该现象的个体占总样本数的22%(Costa et al. 2016)。总之,关于多重父权现象的研究中,发现该现象所占的比例均低于100%,也可能会受到样本量的影响。鼠类高繁殖率的生

活史对策保证了种群不会面对一个绝对的生存压力,但生殖系统的进化缺陷使得多重父权不可能存在于每个个体或任何情况下,如在一个繁殖期和下一个繁殖期之间生殖道精液的保存效果(Ojeda et al. 2016)。另外,还涉及到精子竞争现象中的层化取代和机械性移除后代现象,尤其是后者,在真蛸(*Octopus vulgaris*)和白螯龙虾(*Austropotamobius italicus*)中已有发现(Galeotti et al. 2008, Wodinsky 2008),金乌贼(*Sepia esculenta*)也存在类似情况(张秀梅等 2016)。

在微卫星分子标记技术成熟以前,研究动物的婚配制度,主要靠圈养观察。目前,关于多重父权现象的研究较少。本研究确认了黄毛鼠种群存在多重父权现象。另外,本研究对于鼠害的防治也可提供一定的理论基础,其中理想的鼠害防治技术便是不育控制技术,而该技术的关键在于明确鼠类的婚配制度,尤其是针对单配制和一雄多雌制动物效果最佳。陈琴等(2011)提出在竞争性繁殖干扰的策略下,达到防治鼠害的效果。从生态学的角度,在繁殖期内,增加不育药物的投放,同时增加人工雌鼠干扰,达到循序渐进的灭鼠目的,为生态和谐提供支持与帮助。

参 考 文 献

- Ala-Honkola O, Friman E, Lindström K. 2011. Costs and benefits of polyandry in a placental poeciliid fish *Heterandria formosa* are in accordance with the parent-offspring conflict theory of placentation. *Journal of Evolutionary Biology*, 24(12): 2600–2610.
- Cheylan G, Granjon L, Britton-Davidian J. 2010. Distribution of genetic diversity within and between Western Mediterranean island populations of the black rat *Rattus rattus* (L. 1758). *Biological Journal of the Linnean Society*, 63(3): 393–408.
- Costa F, Richardson J L, Dion K, et al. 2016. Multiple paternity in the Norway rat, *Rattus norvegicus*, from urban slums in Salvador, Brazil. *Journal of Heredity*, 107(2): 181–186.
- Costello A K, Pultorak J D, Meikle D B. 2009. Do male house mice

- (*Mus musculus*) discriminate between females that differ in nutritional status? *Behavioural Processes*, 82(2): 119–125.
- Frankham G J, Reed R L, Eldridge M D B, et al. 2013. The genetic mating system of the long-nosed potoroo (*Potorous tridactylus*) with notes on male strategies for securing paternity. *Australian Journal of Zoology*, 60(4): 225–234.
- Galeotti P, Rubolini D, Pupin F, et al. 2008. Sperm removal and ejaculate size correlate with chelae asymmetry in a freshwater crayfish species. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 62(11): 1739–1745.
- Glass G E, Gardnersantana L C, Holt R D, et al. 2009. Trophic garnishes: cat-rat interactions in an urban environment. *PLoS One*, 4(6): e5794.
- Huo Y J, Wan X R, Wolff J O, et al. 2010. Multiple paternities increase genetic diversity of offspring in Brandt's voles. *Behavioural Processes*, 84(3): 745–749.
- Janse M, Kappe A L, van Kuijk B L. 2013. Paternity testing using the poisonous sting in captive white-spotted eagle rays *Aetobatus narinari*: a non-invasive tool for captive sustainability programmes. *Journal of Fish Biology*, 82(3): 1082–1085.
- Jones A G. 2001. Gerud 1.0: a computer program for the reconstruction of parental genotypes from progeny arrays using multilocus DNA data. *Molecular Ecology Resources*, 1(3): 215–218.
- Klemme I, Bäumer J, Eccard J A, et al. 2014. Polyandrous females produce sons that are successful at post-copulatory competition. *Journal of Evolutionary Biology*, 27(3): 457–465.
- Li Q, Zhang L. 2010. Parent-offspring recognition in Brandt's voles, *Lasiopodomys brandti*. *Animal Behaviour*, 79(4): 797–801.
- Losos J B, Ricklefs R E. 2009. Adaptation and diversification on islands. *Nature*, 457(7231): 830–836.
- Mayr E. 1967. The challenge of island faunas. *Australian Natural History*, 15: 369–374.
- Millien V. 2006. Morphological evolution is accelerated among island mammals. *PLoS Biology*, 4(10): e321.
- Nunn C L, Scully E J, Kutsukake N, et al. 2014. Mating competition, promiscuity and life history traits as predictors of sexually transmitted disease risk in primates. *International Journal of Primatology*, 35(3): 764–786.
- Ojeda G N, Amavet P S, Rueda E C, et al. 2016. Mating system of *Caiman yacare* (Reptilia: Alligatoridae) described from microsatellite genotypes. *Journal of Heredity*, 108(2): 135–141.
- Orsetti D M, Rutowski R L. 2003. No material benefits, and a fertilization cost, for multiple mating by female leaf beetles. *Animal Behaviour*, 66(3): 477–484.
- Patzenhauerová H, Šklíba J, Bryja J, et al. 2013. Parentage analysis of Ansell's mole-rat family groups indicates a high reproductive skew despite relatively relaxed ecological constraints on dispersal. *Molecular Ecology*, 22(19): 4988–5000.
- Portnoy D S, Heist E J. 2012. Molecular markers: progress and prospects for understanding reproductive ecology in elasmobranchs. *Journal of Fish Biology*, 80(5): 1120–1140.
- Thrall P H, Antonovics J, Bever J D. 1997. Sexual transmission of disease and host mating systems: within-season reproductive success. *American Naturalist*, 149(3): 485–506.
- Townsend R, Stow A, Asmyhr M, et al. 2015. Multiple paternity in captive grey nurse sharks (*Carcharias taurus*): implications for the captive breeding of this critically endangered species. *Pacific Conservation Biology*, 21(4): 122–125.
- Wodinsky J. 2008. Reversal and transfer of spermatophores by *Octopus vulgaris*, and *O. hummelincki*. *Marine Biology*, 155(1): 91–103.
- Wright S. 1950. The Genetical Structure of Populations. *Nature*, 166(4215): 247–249.
- 陈琴, 刘全生, 秦姣, 等. 2011. 黄毛鼠婚配制度初探: 熟悉性对两性间行为的影响. *四川动物*, 30(6): 845–849.
- 郭永旺. 2014. 2014 年全国农区鼠害发生趋势预报. *中国植保导刊*, 34(2): 53–55.
- 韩金巧, 谭江东, 王艳妮, 等. 2017. 跨物种筛选黄毛鼠的微卫星分子标记. *浙江师范大学学报: 自然科学版*, 40(3): 312–317.
- 刘汉武, 王荣欣, 张凤琴, 等. 2011. 我国害鼠不育控制研究进展. *生态学报*, 31(19): 5484–5494.
- 吕俊宣, 奚雷. 1984. 分光光度法测定 DNA 或 RNA 含量. *生物化学与生物物理进展*, (5): 74.
- 庆宁, 马天峰, 梁晓旭, 等. 2011. 华南地区黑眶蟾蜍的遗传变异和地理分化. *动物分类学报*, 36(2): 356–367.
- 王鸿祯, 刘本培. 1980. 地史学教程. 北京: 地质出版社, 120–211.
- 武汉地质学院地史教研室. 1980. 地史学教程. 北京: 地质出版社,

- 1-96.
- 徐卫祥, 王中生, 王志科, 等. 2012. 海洋岛屿特有种的分化形成与维持. 南京林业大学学报: 自然科学版, 36(5): 148-154.
- 姚丹丹, 冯志勇, 隋晶晶, 等. 2013. 黄毛鼠对抗凝血杀鼠剂回避行为的初步研究. 中国媒介生物学及控制杂志, 24(3): 211-214.
- 张秀梅, 张东雪, 王亮. 2016. 水生动物多次交配繁殖策略与多重父权研究进展. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 46(11): 22-31.
- 赵新春, 贾智英, 李盛文, 等. 2016. 育成品种易捕鲤 F5 代保种群体的遗传结构研究. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 44(3): 28-36.
- 周乐, 杨生妹, 于智勇, 等. 2007. 高原鼠兔四个地理种群的遗传多样性与遗传分化. 兽类学报, 27(3): 221-228.

重引入丹顶鹤在黑龙江林甸和江苏盐城成功繁育后代

滑荣^① 崔多英^{①*} 刘佳^① 赵永强^② 陈国远^② 赵思棋^① 杜洋^① 吕士成^②

① 北京动物园圈养野生动物技术北京市重点实验室 北京 100044; ② 江苏盐城湿地珍禽国家级自然保护区 盐城 224057

Successful Breeding of Re-introduced Red-Crowned Cranes in Lindian, Heilongjiang Province and Yancheng, Jiangsu Province, China

丹顶鹤 (*Grus japonensis*) 是国家 I 级重点保护野生动物, IUCN 濒危物种 (EN), 野外种群数量仅 2 600 只左右 (崔多英等 2017)。根据 2015 至 2017 年对江苏盐城丹顶鹤越冬种群数量调查, 丹顶鹤西部迁徙种群的数量呈逐年下降趋势, 原因尚不得而知。中国动物园有圈养丹顶鹤 1 248 只 (崔多英等 2017), 分布在中国动物园协会所属 62 家会员单位。开展濒危物种重引入项目是恢复、壮大野生丹顶鹤种群的有效措施, 将为拯救濒危物种——丹顶鹤提供有益的实践经验和科学数据。

动物园是野生动物迁地保护的重要基地, 可以为重引入项目提供动物来源, 并开展濒危物种的重引入生物学研究。2013 年 11 月、12 月和 2015 年 1 月、3 月, 在江苏盐城湿地珍禽国家级自然保护区 (14 只) 和黑龙江林甸湿地 (2 只) 共释放 16 只丹顶鹤。放归野外的丹顶鹤均为圈养繁育个体。其中, 来自合肥野生动物园 4 只、石家庄动物园 2 只、北京动物园 6 只、沈阳森林动物园 2 只、吉林向海国家级自然保护区 2 只。利用卫星定位信号发射器 (湖南环球信士, 太阳能, 背包式, 15 g) 和野外直接观察法进行跟踪监测发现, 重引入丹顶鹤主要在野化放归地点附近活动, 与野生丹顶鹤有鸣叫、对鸣、齐鸣、展翅、振翅、衔物、跳跃、舞蹈等社群行为, 但是并未参加迁徙。16 只重引入丹顶鹤释放后 1 a 内, 野外存活 9 只, 死亡 4 只, 失联 2 只, 1 只被野狗咬伤回收笼养, 其在野外的存活率达到 9/16 至 11/16。从 2015 至 2017 年, 共有 3 只上述野放丹顶鹤个体在林甸、盐城野外配对成功, 并且成功筑巢、产卵, 共孵化出 3 只幼鹤。

(下转第 614 页)

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 31470460), 中国动物园协会大熊猫及珍稀野生动物保护基金项目;

* 通讯作者, E-mail: cuiduoying@hotmail.com;

第一作者介绍 滑荣, 女, 硕士研究生; 研究方向: 野生动物研究与保护; E-mail: 595606817@qq.com.

收稿日期: 2018-02-12, 修回日期: 2018-04-03 DOI: 10.13859/j.cjz.201804023