

濒危鱼类稀有白甲鱼沅江种群与西江种群 形态度量学性状的差异性*

代应贵** 岳晓炯 尹邦一

(贵州大学动物科学学院, 贵阳 550025)

摘要 分别以采自沅江水系 142 例和西江水系 92 例稀有白甲鱼标本为材料, 采用差异系数法、方差分析法、判别分析法和主成分分析法, 研究了稀有白甲鱼沅江种群、西江种群包括 10 个可数性状和 31 个比例性状等形态度量学性状的差异性。方差分析表明, 2 个种群之间共有 6 个可数性状和 27 个比例性状存在着显著性差异 ($P < 0.05$)。判别分析筛选出了 9 个对区分 2 个种群贡献较大的比例性状, 并建立了 2 个种群的判别函数式。主成分分析显示, 稀有白甲鱼种群鱼体沿背腹轴、头尾轴分别有 16 和 6 个比例性状表现出了明显的变化, 在尾部有 2 个比例性状差异明显。可见 2 个种群之间形态度量学性状已显示了明显的分化。这可能是两个种群长期隔离, 在不同水系生态环境中产生了适应性进化的结果。然而, 差异系数的计算结果表明, 两个种群之间形态度量学性状的差异尚未达到亚种分化的水平。

关键词 稀有白甲鱼; 形态度量学性状; 差异系数; 方差分析; 主成分分析

中图分类号 Q959.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2013)3-0641-07

Morphometrics differences between the populations of endangered species *Onychostoma rara* from Yuanjiang River and Xijiang River systems, Southwest China. DAI Ying-gui**, YUE Xiao-tong, YIN Bang-yi (College of Animal Sciences, Guizhou University, Guiyang 550025, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(3): 641–647.

Abstract: By the methods of coefficient of difference, variance analysis, discriminant analysis, and principal component analysis (PCA), this paper studied the morphometrics differences, including 10 countable characteristics and 31 proportional characteristics, between the 142 and 92 specimens of endangered species *Onychostoma rara* collected from the Yuanjiang River and Xijiang River systems, respectively. The variance analysis showed that a total of 6 countable characteristics and 27 proportional characteristics had significant differences between the populations of *O. rara* from the Yuanjiang River and the Xijiang River systems, respectively ($P < 0.05$). The discriminant analysis revealed that there were 9 proportional characteristics being important to differentiate the two populations from each other, and the discriminant functions for the two populations were established, respectively. Based on the results of PCA, there were 16 proportional characteristics along the dorsal-ventral axis, 6 proportional characteristics along the anterior-posterior axis, and 2 proportional characteristics along the caudal peduncle of fish body among the individuals of *O. rara* presenting obvious differences. As a result, the morphometrics of the two populations had shown obvious differentiation, probably due to the long-term segregation of the two populations and their adaptive evolution in different river systems. However, the coefficient of difference demonstrated that the morphometrics differences between the two populations were still under subspecies level.

Key words: *Onychostoma rara*; morphometrics; coefficient of difference; variance analysis; principal component analysis (PCA).

* 国家自然科学基金项目(30960297)资助。

** 通讯作者 E-mail: daiygui@163.com

收稿日期: 2012-08-09 接受日期: 2012-12-08

稀有白甲鱼 (*Onychostoma rara*) 隶属于鲤形目鲤科鮡亚科白甲鱼属, 仅分布于中国长江中游沅江水系和珠江流域西江水系(单乡红等, 2000)。由于电站建坝、水域污染和过度捕捞等原因, 稀有白甲鱼资源量已急剧减少, 野生资源正濒临枯竭, 残存分布区日趋缩小, 现已被《中国物种红色名录》列为濒危鱼类(汪松和解焱, 2004)。

沅江、西江分属长江、珠江水系, 不同的水系导致了稀有白甲鱼沅江种群与西江种群的长期隔离, 进而为两个种群之间发生形态性状乃至遗传上的分化提供了可能性。鱼类的形态度量学性状包括可数性状和比例性状两类(褚新洛和陈银瑞, 1989)。目前有关稀有白甲鱼的研究主要集中在其形态分类、肉质营养及种群遗传多样性等方面(湖南省水产科学研究所, 1979; 郑慈英, 1989; 单乡红等, 2000; 代应贵和王晓辉, 2007; 彭珊和代应贵, 2009; 冉光鑫等, 2012), 而有关稀有白甲鱼种群外部形态度量学性状差异、分化的研究则未见报道。本文结合传统形态学和多变量形态度量学方法, 系统比较分析了稀有白甲鱼沅江种群与西江种群的外部形态度量学性状的差异, 旨在为深入开展该种鱼类形态分类分化、生态变异研究以及种质资源的鉴定、开发利用与保护等提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 材料来源

本研究所检测的稀有白甲鱼标本分别于 2010 年 10 月采自于贵州清水江(沅江水系)和 2011 年 1 月采自广西巴马盘阳河(西江水系), 并按照单乡红等(2000)的方法进行标本鉴定。其中采自清水江的标本为 142 例, 体长(201.4±32.1) mm, 采自盘阳河的标本为 92 例, 体长(159.9±39.7) mm。全部标本均达性成熟, 生长良好, 无畸形。

1.2 研究方法

1.2.1 可数性状的计数 在采集的稀有白甲鱼研究标本中, 随机选取沅江种群 120 例标本、西江种群 70 例标本进行 9 个可数性状的计数, 包括背鳍分支鳍条、胸鳍分支鳍条、腹鳍分支鳍条、尾鳍分支鳍条、侧线鳞、侧线上鳞、侧线下鳞、围尾柄鳞、背鳍前鳞(褚新洛和陈银瑞, 1989)。此外, 对余下的两个种群各 22 例标本, 经过解剖、水煮后分离出脊柱, 进行脊椎骨的计数。

1.2.2 比例性状的测量 在进行可数性状计数的

同时, 还分别对选取的沅江种群 120 例标本、西江种群 70 例标本进行包括框架测量性状和传统测量性状在内的可量性状的测量。本研究在稀有白甲鱼体表设立了 10 个坐标原点(Brzeski & Doyle, 1995; 李思发等, 1998), 共计测量了 22 个框架测量性状, 包括 AB、AC、BC、BD、BF、CD、CF、DF、DE、DG、DH、EF、EG、EH、EI、EJ、GH、GI、GJ、HI、HJ、IJ(图 1)。框架结构测量的距离为点与点之间的直线距离。此外, 还测量了 9 个传统测量性状, 包括体长、体高、头长、吻长、眼后头长、眼径、眼间距、尾柄长和尾柄高(褚新洛和陈银瑞, 1989)。测量值精确到 1 mm。全部可量性状分别除以头长、体长, 换算为比例性状。

1.2.3 分析方法 全部形态度量学性状用 EXCEL 软件和 SPSS 17.0 软件进行数据分析。

(1) 差异系数法。计算稀有白甲鱼 10 个可数性状、31 个比例性状(22 个框架测量比例性状和 9 个传统测量比例性状)在其沅江种群和西江种群之间的差异系数(coefficient of difference, CD), 进行该两个种群之间差异性的分析。计算参照公式 $CD = |MA - MB| / (SDA + SDB)$, MA 和 MB 分别为 A、B 种群某性状参数的平均值, SDA 和 SDB 为标准差(Mayr et al., 1953)。

(2) 方差分析法。对两个种群的 10 个可数性状、31 个比例性状用方差分析法进行差异显著性检验。如果方差分析检验为差异显著($P < 0.05$)、极显著($P < 0.01$), 则进行 Duncan 多重比较分析。

(3) 判别分析法。用 SPSS 17.0 软件对两个种群进行逐步判别分析, 从 31 个比例性状中筛选出对区分两个种群贡献较大的比例性状, 分别建立该 2 个种群的判别函数式, 并检验其判别准确率。

(4) 主成分分析法。将两个种群合并在一起,

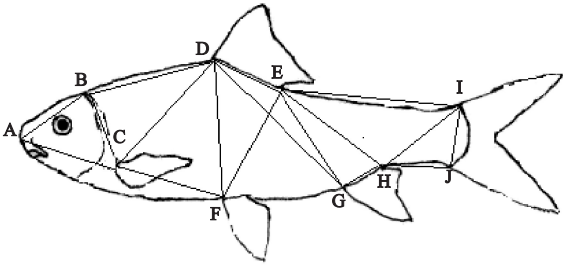


图 1 稀有白甲鱼框架图
Fig. 1 Frame diagram of *Onychostoma rara*
A: 吻端; B: 上枕骨后端; C: 胸鳍起点; D: 背鳍起点; E: 背鳍基末端; F: 腹鳍起点; G: 臀鳍起点; H: 臀鳍基末端; I: 尾鳍基背部起点; J: 尾鳍基腹部起点。

表1 稀有白甲鱼两个种群的可数性状

Table 1 Countable characteristics of *Onychostoma rara* populations from Yuanjiang River and Xijiang River systems

可数性状	沅江种群			西江种群			差异系数	方差分析	
	平均值	区间	标准差	平均值	区间	标准差		<i>F</i>	<i>P</i>
背鳍分支鳍条数	8	—	0.000	8	—	0.000	—	—	—
胸鳍分支鳍条数	14.73	13~18	0.809	14.11	12~18	0.627	0.563	29.521	0.000
腹鳍分支鳍条数	8	—	0.000	8	—	0.000	—	—	—
尾鳍分支鳍条数	16.55	16~18	0.696	16.09	16~18	0.408	0.417	25.896	0.000
侧线鳞数	44.13	43~45	0.549	44.24	43~48	1.028	0.070	0.917	0.340
侧线上鳞数	6.21	6~7	0.408	6.01	6~7	0.120	0.379	15.063	0.000
侧线下鳞数	5.22	4~6	0.439	5.04	5~6	0.204	0.683	10.689	0.001
围尾柄鳞数	16	—	0.000	16	—	0.000	—	—	—
背鳍前鳞数	12.15	10~16	0.950	11.67	10~17	1.018	0.483	10.650	0.001
脊椎骨数	36.41	32~43	2.906	39.27	33~43	2.585	0.521	11.926	0.001

用 SPSS 17.0 软件对其 31 个比例性状进行主成分分析,找出存在显著性变异的比例性状。采用 KMO 检验和 Bartlett 检验验证该 31 个比例性状是否适合做因子分析。

2 结果与分析

2.1 形态度量学性状的差异性

2.1.1 可数性状 由表 1 可知,稀有白甲鱼全部可数性状在两个种群之间均无间断分布。差异性分析结果显示(表 1),两个种群胸鳍分支鳍条、尾鳍分支鳍条、侧线上鳞、侧线下鳞、背鳍前鳞、脊椎骨数目均存在差异,但差异系数(CD)值均显著小于亚种分化的阈值 1.28(Mayr *et al.*, 1953)。可见 2 个种群之间可数性状的差异尚未达到亚种分化的水平。

2.1.2 比例性状表 2 表明,稀有白甲鱼 31 个比例性状在沅江种群和西江种群之间的 CD 值均<1.28(Mayr *et al.*, 1953),可见这些性状在两个种群之间的分化也均未达到亚种水平。然而,由于长期适应于不同的水系环境,2 个种群之间在尾柄高、尾柄长、背鳍与腹鳍起点间距、背鳍与臀鳍起点间距、背鳍基末端至臀鳍起点间距等可量性状上均显示了不同程度的差异。

2.2 形态度量学性状的方差分析

2.2.1 可数性状 方差分析显示(表 1),在 10 个可数性状中,稀有白甲鱼沅江种群胸鳍分支鳍条、尾鳍分支鳍条、侧线上鳞、侧线下鳞、背鳍前鳞数目显著多于西江种群($P<0.01$),但脊椎骨数目则显著少于西江种群($P<0.01$)。

2.2.2 比例性状 方差分析表明(表 2),在 31 个比例性状中,除 AB/体长、AC/体长、DE/体长和 EJ/体长等 4 个性状在两个种群之间无显著性差异外,

其余各比例性状在 2 个种群之间的差异均显著($P<0.05$),这主要表现在沅江种群个体头部、躯干部较宽短,而西江种群个体尾柄较细长。

2.3 比例性状的判别

采用逐步判别法,从 31 个比例性状中共筛选出了 9 个对区分稀有白甲鱼 2 个种群贡献较大的比例性状,即头长/体长(X_1)、尾柄高/尾柄长(X_2)、眼间距/头长(X_3)、CF/体长(X_4)、DE/体长(X_5)、EG/体长(X_6)、EH/体长(X_7)、EI/体长(X_8)、GI/体长(X_9)。当以该 9 个比例性状为自变量时,判别函数判别效果的显著性检验结果为:对 2 个种群进行判别分析得到 2 组特征值的典型相关系数为 0.857, Wilks' $\lambda=0.266$, χ^2 值为 243.240, $P=0.000$,表明以 9 个比例性状为自变量建立的判别函数其判别效果具有极显著的意义。以这 9 个比例性状为自变量建立的稀有白甲鱼 2 个种群的判别函数式为:

沅江种群: $Y_1 = 1585.783X_1 - 16.386X_2 + 489.380X_3 + 1275.830X_4 + 47.432X_5 - 1310.108X_6 + 1568.268X_7 + 633.902X_8 + 659.868X_9 - 763.951$;

西江种群: $Y_2 = 1701.980X_1 - 44.597X_2 + 513.896X_3 + 1316.319X_4 + 106.178X_5 - 1427.688X_6 + 1465.366X_7 + 719.678X_8 + 736.789X_9 - 797.691$ 。

用上述 2 式分别对稀有白甲鱼沅江种群、西江种群的个体进行判别分类,获得了较高的判别准确率(表 3)。

2.4 比例性状的主成分分析

对两个种群的 31 个比例性状进行了主成分分析,结果显示,其前 8 个主成分因子载荷的累积贡献率达 78.23%,其中前 3 个主成分因子载荷的累积贡献率则达 55.16%(表 4)。在贡献率最大的前 3 个主成分 PC1、PC2、PC3 中,对第 1 主成分(PC1)载

表 2 稀有白甲鱼 2 个种群的比例性状

Table 2 Proportional characteristics of *Onychostoma rara* populations from Yuanjiang River and Xijiang River systems

比例性状	沅江种群			西江种群			差异系数	F	P
	平均值	区间	标准差	平均值	区间	标准差			
体高 / 体长	0.364	0.299 ~ 0.468	0.035	0.337	0.303 ~ 0.415	0.204	0.113	34.869	0.000
头长 / 体长	0.224	0.191 ~ 0.272	0.018	0.230	0.209 ~ 0.254	0.010	0.214	7.483	0.007
尾柄长 / 体长	0.164	0.131 ~ 0.252	0.015	0.184	0.154 ~ 0.209	0.012	0.741	95.100	0.000
尾柄高/体长	0.130	0.113 ~ 0.158	0.009	0.121	0.084 ~ 0.133	0.007	0.563	65.962	0.000
尾柄高 / 尾柄长	0.802	0.517 ~ 1.030	0.081	0.657	0.424 ~ 0.821	0.061	1.021	169.824	0.000
吻长 / 头长	0.333	0.263 ~ 0.440	0.033	0.319	0.250 ~ 0.387	0.026	0.237	10.478	0.001
眼径 / 头长	0.239	0.183 ~ 0.324	0.028	0.251	0.176 ~ 0.300	0.028	0.214	7.949	0.005
眼间距 / 头长	0.546	0.462 ~ 0.742	0.041	0.525	0.467 ~ 0.600	0.034	0.280	13.214	0.000
眼径 / 眼间距	0.442	0.283 ~ 0.667	0.067	0.481	0.308 ~ 0.600	0.069	0.287	15.031	0.000
AB/体长	0.182	0.156 ~ 0.205	0.011	0.182	0.158 ~ 0.205	0.010	0.000	0.296	0.587
AC/体长	0.235	0.165 ~ 0.286	0.015	0.233	0.203 ~ 0.258	0.011	0.077	0.887	0.348
BC/体长	0.212	0.155 ~ 0.257	0.015	0.199	0.185 ~ 0.233	0.009	0.542	37.623	0.000
BD/体长	0.303	0.257 ~ 0.353	0.018	0.297	0.261 ~ 0.323	0.013	0.194	7.996	0.005
BF/体长	0.433	0.321 ~ 0.481	0.025	0.425	0.397 ~ 0.459	0.012	0.216	6.778	0.010
CD/体长	0.366	0.313 ~ 0.412	0.019	0.351	0.305 ~ 0.395	0.015	0.441	33.000	0.000
CF/体长	0.301	0.252 ~ 0.343	0.019	0.307	0.287 ~ 0.337	0.013	0.188	6.275	0.013
DF/体长	0.354	0.298 ~ 0.461	0.018	0.330	0.308 ~ 0.401	0.019	0.649	32.898	0.000
DE/体长	0.187	0.148 ~ 0.303	0.032	0.189	0.167 ~ 0.209	0.009	0.049	1.224	0.270
DG/体长	0.450	0.378 ~ 0.502	0.022	0.426	0.391 ~ 0.496	0.016	0.632	61.763	0.000
DH/体长	0.479	0.409 ~ 0.544	0.021	0.464	0.427 ~ 0.514	0.015	0.417	27.451	0.000
EF/体长	0.320	0.190 ~ 0.412	0.032	0.295	0.268 ~ 0.354	0.018	0.500	34.153	0.000
EG/体长	0.305	0.252 ~ 0.362	0.021	0.278	0.252 ~ 0.309	0.012	0.818	97.807	0.000
EH/体长	0.310	0.270 ~ 0.343	0.015	0.289	0.261 ~ 0.332	0.014	0.724	88.230	0.000
EL/体长	0.379	0.323 ~ 0.449	0.024	0.391	0.335 ~ 0.453	0.025	0.245	11.919	0.001
EJ/体长	0.425	0.375 ~ 0.478	0.019	0.425	0.375 ~ 0.470	0.019	0.000	0.001	0.972
GH/体长	0.092	0.070 ~ 0.113	0.009	0.085	0.065 ~ 0.104	0.008	0.412	31.881	0.000
GI/体长	0.301	0.209 ~ 0.349	0.023	0.310	0.273 ~ 0.344	0.012	0.257	7.991	0.005
GJ/体长	0.257	0.194 ~ 0.324	0.020	0.268	0.214 ~ 0.309	0.019	0.282	13.768	0.000
HI/体长	0.222	0.167 ~ 0.261	0.016	0.229	0.168 ~ 0.248	0.012	0.250	11.008	0.001
HJ/体长	0.176	0.141 ~ 0.240	0.020	0.191	0.134 ~ 0.228	0.015	0.429	30.259	0.000
IJ/体长	0.133	0.113 ~ 0.170	0.011	0.123	0.091 ~ 0.139	0.00	0.909	40.269	0.000

表 3 稀有白甲鱼 2 个种群的判别结果

Table 3 Discriminant results of *Onychostoma rara* populations from Yuanjiang River and Xijiang River systems

观测种群	预测种群		合计	判别准确率 (%)
	沅江种群	西江种群		
沅江种群	114	6	120	95.0
西江种群	2	68	70	97.1
综合判别率 (%)				95.8

荷量较大的因子有 16 个,分别是体高/体长、尾柄高/体长、尾柄高/尾柄长、眼径/头长、眼间距/头长、眼径/眼间距、BC/体长、BF/体长、CD/体长、DF/体长、DG/体长、DH/体长、EF/体长、EG/体长、EH/体

长和 IJ/体长,它们主要反映了鱼体沿背腹轴比例性状的差异。对第 2 主成分(PC2)载荷量较大的因子有 6 个,分别为头长/体长、尾柄长/体长、GI/体长、GJ/体长、HI/体长和 HJ/体长,它们主要反映了鱼体沿头尾轴比例性状的变化。对第 3 主成分(PC3)载荷量较大的因子是 EL/体长和 EJ/体长。因此第 3 主成分的生物学解释则着重体现了鱼体尾部的形态变异。

本文选用的比例性状 KMO 值为 0.814, Bartlett 检验达极显著水平 ($P<0.01$) (表 5), 可见所选比例性状适合做因子分析。

表 4 稀有白甲鱼比例性状主成分分析中的因子负荷矩阵及主成分对总变异的贡献率

Table 4 Component matrix and contribution ratios of principal components in PCA of proportional characteristics in *Onychostoma rara*

性状	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
体高/体长	0.882	0.104	0.003	-0.070	0.002	0.143	0.130	-0.015
头长/体长	0.341	0.444	-0.196	0.498	-0.301	-0.403	-0.089	-0.054
尾柄长/体长	-0.230	0.744	0.432	-0.087	0.062	-0.023	0.102	0.026
尾柄高/体长	0.837	-0.003	-0.137	0.073	-0.111	0.317	-0.041	-0.105
尾柄高/尾柄长	0.625	-0.539	-0.389	0.096	-0.103	0.170	-0.087	-0.065
吻长/头长	0.157	-0.059	-0.110	-0.413	-0.189	0.315	0.485	0.108
眼径/头长	-0.549	0.007	-0.048	0.320	0.141	0.635	-0.046	0.219
眼间距/头长	0.552	-0.116	0.073	-0.437	-0.070	0.045	0.371	-0.035
眼径/眼间距	-0.662	0.061	-0.070	0.447	0.138	0.466	-0.202	0.179
AB/体长	0.371	0.449	-0.200	0.436	-0.280	0.016	0.234	0.021
AC/体长	0.438	0.391	-0.301	0.439	-0.084	0.143	0.147	0.114
BC/体长	0.799	0.041	-0.192	0.179	-0.012	-0.065	-0.186	0.123
BD/体长	0.181	-0.328	0.087	0.162	0.699	-0.076	-0.075	-0.124
BF/体长	0.627	0.207	-0.150	0.093	0.416	-0.131	0.239	0.179
CD/体长	0.800	0.010	-0.087	-0.031	0.373	-0.028	0.061	-0.086
CF/体长	-0.064	0.133	-0.306	0.256	0.530	-0.204	0.394	0.153
DF/体长	0.925	0.135	-0.028	-0.014	-0.001	0.037	0.019	-0.035
DE/体长	0.408	0.086	0.224	0.135	-0.222	-0.319	-0.078	0.484
DG/体长	0.906	-0.122	0.153	-0.058	0.042	0.007	-0.063	0.157
DH/体长	0.768	-0.225	0.390	0.075	0.030	-0.071	-0.099	0.251
EF/体长	0.879	0.091	-0.063	-0.033	0.042	0.017	0.001	-0.119
EG/体长	0.902	-0.155	0.088	0.094	0.000	0.122	-0.049	-0.015
EH/体长	0.702	-0.415	0.370	0.086	0.081	0.145	-0.083	0.034
EI/体长	-0.143	-0.285	0.693	0.487	-0.040	-0.032	0.201	-0.082
EJ/体长	0.253	-0.135	0.771	0.222	-0.118	0.126	0.214	0.029
GH/体长	0.560	-0.026	-0.011	-0.356	0.062	0.021	-0.333	0.276
GI/体长	0.392	0.565	0.195	-0.020	0.084	-0.020	-0.230	-0.270
GJ/体长	0.047	0.727	0.127	-0.371	0.163	0.101	-0.186	0.250
HI/体长	0.283	0.582	0.238	0.074	0.129	0.152	-0.077	-0.469
HJ/体长	-0.087	0.790	0.145	-0.163	0.052	0.202	0.038	0.137
IJ/体长	0.820	0.091	-0.125	0.028	-0.168	0.184	-0.049	-0.123
贡献率(%)	35.40	12.30	7.47	6.73	4.92	4.50	3.60	3.32
累计贡献率(%)	35.40	47.70	55.16	61.89	66.81	71.31	74.91	78.23

PC1-PC8 为第 1-8 主成分。

表 5 KMO 检验和 Bartlett 检验结果

Table 5 Results of Kaiser-Meyer-Olkin Test and Bartlett's Test

KMO 检验	Bartlett 检验		
	卡方值	自由度	显著水平
0.814	6296.705	465	0.000

分别以 PC1、PC2、PC3 为 X、Y 轴,利用因子负荷数据,对两个种群进行二维图相关分析,得到了如图 2、3、4 所示的主成分分析结果散点图。图 2、3、4 表明,这 2 个种群的个体分布并未明显分离。

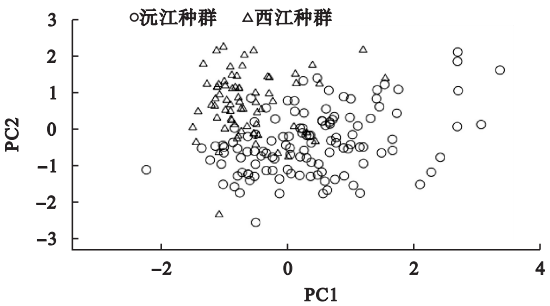


图 2 稀有白甲鱼比例性状第一、二主成分(PC1、PC2)散点图

Fig. 2 Scatter plots of scores on PC1 and PC2 extracted from proportion characteristics of *Onychostoma rara*

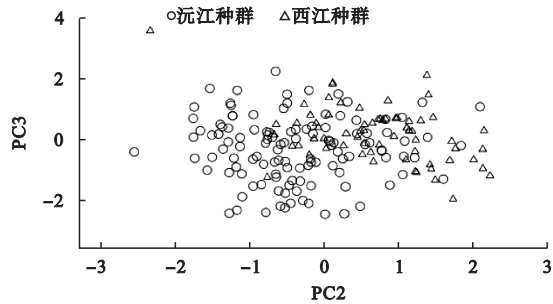


图 3 稀有白甲鱼比例性状第二、三主成分 (PC2、PC3) 散点图

Fig. 3 Scatter plots of scores on PC2 and PC3 extracted from proportion characteristics of *Onychostoma rara*

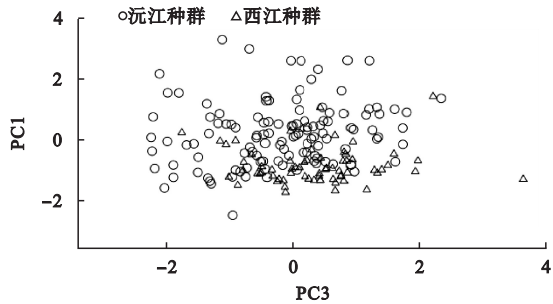


图 4 稀有白甲鱼比例性状第一、三主成分 (PC1、PC3) 散点图

Fig. 4 Scatter plots of scores on PC1 and PC3 extracted from proportion characteristics of *Onychostoma rara*

3 讨论

由于地理屏障,一个种群往往与同种的另一个种群有着某种程度的隔离,进而形成形态、生理、生态甚至遗传上的差异(李思发等, 1998)。本研究中,方差分析显示,稀有白甲鱼沅江种群、西江种群之间共有 6 个可数性状($P<0.01$)和 27 个比例性状($P<0.05$)存在着显著性差异(表 1、2)。在统计学中,方差分析是一种单元统计方法,其优点在于计算方法简单,判别效果明显,缺点是在对鱼类的群体作划分与鉴定时,当群体之间某些单项性状差异程度很小时,其判别效果不明显(任明荣, 1998)。为了弥补单元统计方法的不足,不少学者试图采用多元统计的方法探讨鱼类的外部形态差异,其中应用得较多的是主成分分析、判别分析及聚类分析(俞菊华等, 2003;李思发等, 2005)。主成分分析可以澄清多项性状之间的关系,把全部性状的总方差分解成数目较少的不相关的新变量即主成分,进而揭示群体变异的来源。本文主成分分析表明,包含沅江种群和西江种群在内的稀有白甲鱼种群鱼体沿背腹轴、头尾轴分别有 16 和 6 个比例性状表现出了较明

显的变化,在尾部有 2 个比例性状差异较明显(表 4)。然而,主成分分析对各个比例性状的量化程度不如判别分析具体。在多元统计中,判别分析尤其是逐步判别分析法,在形态判别上优于主成分分析。除了具有主成分分析的优点外,判别分析还可以建立判别公式,对群体进行判别。本研究通过逐步判别分析共筛选出了 9 个对区分稀有白甲鱼 2 个种群贡献较大的比例性状,建立的判别函数式对沅江和西江两个种群的判别准确率分别达到了 95.0%、97.1%(表 3)。由此,稀有白甲鱼沅江种群和西江种群之间形态度量学性状已显示了明显的分化,其原因很可能是由于该两个种群长期生活于相互隔离的河流水系而导致的适应性进化。本文用单元统计的方差分析、多元统计的主成分分析和判别分析所揭示的稀有白甲鱼 2 个种群比例性状的差异性基本上是一致的。这 3 种统计分析方法从不同的角度阐述了两个种群之间在外形上存在的差异,它们之间不能相互替代,但却可以相互印证。

方差分析是对多个样本平均数差异显著性进行检验的一种方法,而主成分分析研究的是如何将多个指标综合简化为数量较少的新指标,即原指标的主成分(李春喜等, 2000)。本文主成分分析中,前 8 个主成分因子载荷的累积贡献率达 78.23%。其中,前 3 个主成分(PC1、PC2、PC3)对总变异的贡献率分别为仅 35.40%、12.30%、7.47%,并分别主要反应了鱼体沿背腹轴、头尾轴和尾部比例性状的变异,可见前 3 个主成分远未完全再现稀有白甲鱼种群形态度量学性状总的变异。因此,在本研究中,尽管方差分析显示稀有白甲鱼沅江种群与西江种群之间共有 27 个比例性状存在着显著性差异($P<0.05$)(表 2),但主成分散点图(图 2、3、4)却显示,无论在 PC1 轴、PC2 轴还是 PC3 轴,这两个种群的个体分布并未明显分离。

分类学家一般把亚种作为最小的分类单元。然而,Mayr 等(1953)认为亚种还可以进一步分为不同的地理种群,指出“亚种是由很多地理种群构成的,这些地理种群在基因频率和很多可量性状上的平均值有些微的差异”;进而提出了 75% 原则和差异系数的概念,认为如果能将属于同种的 75% 的 A 群体个体和 97% 的 B 群体个体分开,那么这 2 个群体之间差异系数值应为 1.28,则 2 个群体应分属不同的亚种,即 1.28 是亚种分界的临界值或阈值。当属于同种的 2 个群体间形态特征的差异系数值大于

1.28 时,表明它们之间的差异达到亚种水平;反之,则属于不同的地理种群。另一方面,Mayr 等(1953)在提出用差异系数指标区分亚种的同时还强调指出:“……方法并没有可能考虑到许多在亚种确认上的生物学和生物地理学的因素。……还必须借助其他资料,予以估量”。例如,地理隔离对于亚种分化乃至新物种的形成是至关重要的。目前,在鱼类形态分化研究中,以形态度量学性状差异系数阈值 1.28 作为亚种划分的依据时,研究者更倾向于持谨慎的态度(杨雨壮等,2002;杨琴等,2011)。本研究中,稀有白甲鱼沅江种群与西江种群之间 10 个可数性状和 31 个比例性状的差异系数值均 <1.28 ,同时这些性状的变异范围在两个种群之间又高度重叠。由此,一方面稀有白甲鱼沅江种群和西江种群由于长期栖息于不同的水系,不同的河流生境使它们产生了适应性进化,本研究表明,在一些形态特征上 2 个种群之间有了明显的变化和差异,另一方面它们的这些差异还属于种内不同地理种群的差异,未上升到亚种水平。这种现象也见于其他鱼类种群(王金秋和梁鸿子,2008)。

生物的表形是其特定的遗传基因在具体的外部生态环境中表达的结果。遗传变异的存在是进化生态的一个主要原因(Futuyma, 1986)。稀有白甲鱼沅江种群与西江种群的形态特征决定于其各自遗传基因和栖息环境的生态因子。本文仅从形态度量学角度探讨了稀有白甲鱼 2 个种群形态分化、差异的特点。为了深入揭示稀有白甲鱼该 2 个种群之间隔离分化的特点,还需要结合生态学资料,采用线粒体 DNA、核 DNA 分子遗传学标记等方法进行稀有白甲鱼种群遗传学的研究。

参考文献

- 褚新洛,陈银瑞. 1989. 云南鱼类志(上册). 北京:科学出版社.
- 代应贵,王晓辉. 2007. 稀有白甲鱼含肉率及肌肉营养成分分析. 水产科学, **26**(1): 7-11.
- 单乡红,林人瑞,乐佩琪,等. 2000. 白甲鱼属//乐佩琪,中国动物志·硬骨鱼纲·鲤形目(下卷). 北京:科学出版社:126-147.
- 湖南省水产科学研究所. 1979. 湖南鱼类志. 长沙:湖南科学技术出版社.
- 李春喜,王志和,王文林. 2000. 生物统计学. 北京:科学出版社.
- 李思发,李晨虹,李家乐. 1998. 尼罗罗非鱼品系间形态差异分析. 动物学报, **44**(4): 450-457.
- 李思发,王成辉,程起群. 2005. 红鲤四品系的形态差异和种系关系. 水产学报, **29**(5): 606-611.
- 彭珊,代应贵. 2009. 濒危鱼类稀有白甲鱼清水江种群 mtDNA D-loop 序列多态性. 水产学报, **33**(2): 196-200.
- 冉光鑫,代应贵,岳晓炯. 2012. 稀有白甲鱼西江种群 mtDNA D 环区的结构及遗传多样性. 上海海洋大学学报, **21**(2): 176-182.
- 任明荣. 1998. 逐步判别在鱼类形态判别上的应用. 上海水产大学学报, **7**(3): 258-264.
- 汪松,解焱. 2004. 中国物种红色名录第一卷:红色名录. 北京:高等教育出版社.
- 王金秋,梁鸿子. 2008. 基于形态性状的松江鲈鱼(*Trachidermus fasciatus*)种群鉴别. 海洋与湖沼, **39**(4): 348-353.
- 杨琴,周伟,舒树森. 2011. 云南盘鮠不同地理居群的形态变异及分化. 动物分类学报, **36**(1): 117-124.
- 杨雨壮,殷丽洁,秦大公,等. 2002. 镜泊湖江鳕的性状变异和分类地位. 北京大学学报(自然科学版), **38**(6): 850-854.
- 俞菊华,夏德全,杨弘,等. 2003. 奥利亚罗非鱼(♀)×鳊(♂)杂交后代的形态. 水产学报, **27**(5): 431-435.
- 郑慈英. 1989. 珠江鱼类志. 北京:科学出版社.
- Brzeski VJ, Doyle RW. 1995. A test of an on-farm selection procedure for tilapia growth in Indonesia. *Aquaculture*, **137**: 219-230.
- Futuyma DJ. 1986. *Evolutionary Biology*. Sunderland, MA: Sinauer Associates Inc.
- Mayr E, Linsley EG, Usinger RL. 1953. *Methods and Principles of Systematic Zoology*. New York: McGraw-Hill.

作者简介 代应贵,男,1968 年生,教授,从事鱼类学和水产资源学研究。E-mail: daiygui@163.com

责任编辑 李凤芹