

四川裂腹鱼和重口裂腹鱼形态差异的多元分析

李忠利^{①③} 陈永祥^{②③*} 胡思玉^{②③} 赵海涛^{②③}

① 铜仁学院生物与农林工程学院 铜仁 554300; ② 贵州工程应用技术学院生态工程学院 毕节 551700;

③ 贵州省教育厅生物资源开发与生态修复重点实验室 毕节 551700

摘要: 通过聚类分析、判别分析和主成分分析 3 种多元分析方法, 对乌江总溪河 89 尾四川裂腹鱼 (*Schizothorax kozlovi*) 和岷江青衣江 33 尾重口裂腹鱼 (*S. davidi*) 的 10 个常规可量性状与 20 个框架性状进行了比较研究。聚类分析结果显示, 3 次采集的四川裂腹鱼聚为一支, 而重口裂腹鱼单独为一支; 主成分分析结果显示, 提取的 8 个主成分对总方差的累计贡献率为 73.762%, 贡献率大的性状集中在吻端和躯干后侧; 通过两次判别分析, 最终建立四川裂腹鱼和重口裂腹鱼两个判别方程, 综合判别率为 100%。研究结果显示, 四川裂腹鱼和重口裂腹鱼是独立的两个种, 在形态上的主要差异体现在吻端和躯干后侧, 运用多元分析方法能有效地将其区分开来, 而 3 次采样的四川裂腹鱼为同一种群。

关键词: 四川裂腹鱼; 重口裂腹鱼; 形态差异; 多元分析

中图分类号: Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2015) 04-547-08

Multivariate Analysis on the Morphological Differentiation of Kozlov's Schizothoracin (*Schizothorax kozlovi*) and David's Schizothoracin (*S. davidi*)

LI Zhong-Li^{①③} CHEN Yong-Xiang^{②③*} HU Si-Yu^{②③} ZHAO Hai-Tao^{②③}

① College of Biology and Agro-forestry Engineering, Tongren University, Tongren 554300; ② College of Ecological Engineering,

Guizhou University of Engineering Science, Bijie 551700; ③ Key Laboratory of Biological Resources Exploitation

and Ecological Restoration of Guizhou Provincial Education Department, Bijie 551700, China

Abstract: The interspecific and intraspecific morphological variations of 89 specimens of Kozlov's schizothoracin (*Schizothorax kozlovi*) collected from Wujiang River and 33 specimens of David's schizothoracin (*S. davidi*) from Minjiang River were analyzed by three multivariate analysis methods based on 10 traditional morphological parameters and 20 truss network features. The methods of hierarchical cluster analysis consisted of euclidean distance and between-groups linkage, and the plots of dendrogram showed highest similarity of *S. kozlovi* from three collections and contrasted with the lowest of *S. davidi* (Fig. 2). In principal component analysis of covariance matrix, 8 principal components were extracted with the

基金项目 贵州省教育厅自然科学重点项目(黔教科 2006219), 贵州省农业科技攻关项目(黔科合 NY 字[2008]3);

* 通讯作者, E-mail: charles_chen8@sina.com;

第一作者介绍 李忠利, 男, 硕士; 研究方向: 鱼类生态学; E-mail: lzl1982505@163.com。

收稿日期: 2014-10-08, 修回日期: 2015-04-07 DOI: 10.13859/j.cjz.201504006

cumulative contribution rate of the total variance of 72.762%, and the most contributions of characters were focused on snout and posterior torso (Table 3). Based on two steps of discriminant analysis by Fisher's function Coefficients, 122 specimens were finally divided into two groups and the total discriminant accuracy reached 100% (Fig. 4). All results suggested that two fishes were significantly different from each other, and the distinct differences were snout and posterior torso. The samples of *S. kozlovi* collected in three years were from the same population, and *S. kozlovi* and *S. davidi* could be identified by the three multivariate analysis methods.

Key words: Kozlov's schizothoracin (*Schizothorax kozlovi*); David's schizothoracin (*S. davidi*); Morphological variations; Multivariate analysis

从表型性状来快速检测遗传变异是最古老而又最简便易行的方法, 在动植物分类学上广泛应用。通常所利用的表型性状主要有单基因性状(如质量性状、稀有突变等)和多基因决定的数量性状(如大多数形态性状、生活史性状)。在鱼类分类上, 传统的形态特征研究是以点、线为单位进行测量和简单对比, 涵盖鱼体的信息有限, 且测量数据经常有重叠, 在比较分析上存在一定的局限性。近年来, 随着框架分析方法在各个领域的广泛应用, 在鱼类物种判别上的运用也越来越多。该方法通过选取特征坐标点的方式将鱼体分成若干网格单元来进行全面地多维空间度量(横向、纵向和斜向), 再运用多元统计分析方法来筛选存在差异的形态变量, 能够快速有效地反映种间及种内不同地理种群的形态差异(Park et al. 1994, 谢仲桂等 2003)。

青藏高原的隆升对形成错综复杂的水生态环境起着重要的作用, 同时也对产生丰富多样的裂腹鱼类有着深远的影响。作为裂腹鱼亚科(Schizothoracinae)裂腹鱼属(*Schizothorax*)裂尻鱼亚属(*Racoma*)的典型代表, 四川裂腹鱼(*S. kozlovi*)和重口裂腹鱼(*S. davidi*)主要分布于长江上游支流, 形态特征极为相似, 故历史资料对二者的分类说法不一(武云飞等 1991a, 丁瑞华 1994, 乐佩琦 2000)。随着鱼类资源保护和开发需求的不断加强, 对裂腹鱼种类的准确鉴定、原种资源的优化选择要求也越来越高, 常规的形态学数据及检测方法难以

达到鉴定及评价的要求, 而分子水平的鉴定往往费时且费用高。有关这两种鱼的遗传多样性分析, 目前较多的集中在四川裂腹鱼上, 邹习俊(2009)和陈永祥(2013)从 mtDNA 控制区序列和染色体核型对其进行了研究, 林艳红等(2010)和冉光鑫等(2011)通过多变量分析对四川裂腹鱼和裂腹鱼亚属(*Schizothorax*)的鱼类进行了比较。而对于重口裂腹鱼, 仅见李渝成等(1987)对其染色体组型进行了研究。有关四川裂腹鱼和重口裂腹鱼的种间差别, He 等(2006)和 Yang 等(2012)通过 DNA 水平的比较认为两种鱼没有区别, 其他资料至今未见报道。本研究采集了乌江上游总溪河四川裂腹鱼和岷江上游青衣江重口裂腹鱼标本, 以常规形态学数据和框架测量数据相结合, 通过聚类分析、主成分分析和判别分析 3 种多元分析方法来快速地定量比较其形态学差异, 为深入探讨裂腹鱼类种间形态学特征和种质资源特性, 进一步认识青藏高原的隆升对裂腹鱼类多样性的形成与进化的影响, 为野生资源的种质鉴定与评价、合理保护与利用提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 实验材料

在进行种类鉴定时, 以侧线上鳞数和背鳍末根不分枝鳍条的强弱作为两种鱼区别的主要依据(丁瑞华 1994, 乐佩琦 2000)。鉴定后得到 89 尾乌江上游总溪河的四川裂腹鱼和 33 尾岷江上游青衣江的重口裂腹鱼, 随后用 10% 甲

醛溶液浸泡保存，详细采集信息见表 1。

1.2 形态参数测量

测定了传统形态性状和框架性状的 31 个参数，共 3 782 个原始数据。其中传统形态性状通过游标卡尺测量了 11 个参数（图 1a）。框

架数据测量参照李思发等（1990）和 Yu 等（2010）的方法，共设置 10 个坐标点，用游标卡尺测量点与点之间的直线距离，共产生 20 个参数，见测量示意图（图 1b）。

表 1 采集标本的基本信息

Table 1 General information of the samples

物种 Species	采集水系 Collection basin	采集时间（年-月） Collection time (Year-month)	样本数 Number	体长 Standard length (mm)	
				范围 Range	均值 Average
四川裂腹鱼 <i>Schizothorax kozlovi</i>	乌江总溪河 Zongxihe River of Wujiang River	2008-07	30	150 ~ 228	180.50 ± 20.39
		2009-02	18	160 ~ 289	195.00 ± 35.01
		2010-01	41	105 ~ 310	181.10 ± 44.05
重口裂腹鱼 <i>S. davidi</i>	岷江青衣江 Qingyijian River of Mingjiang River	2008-06	33	110 ~ 196	163.33 ± 20.48

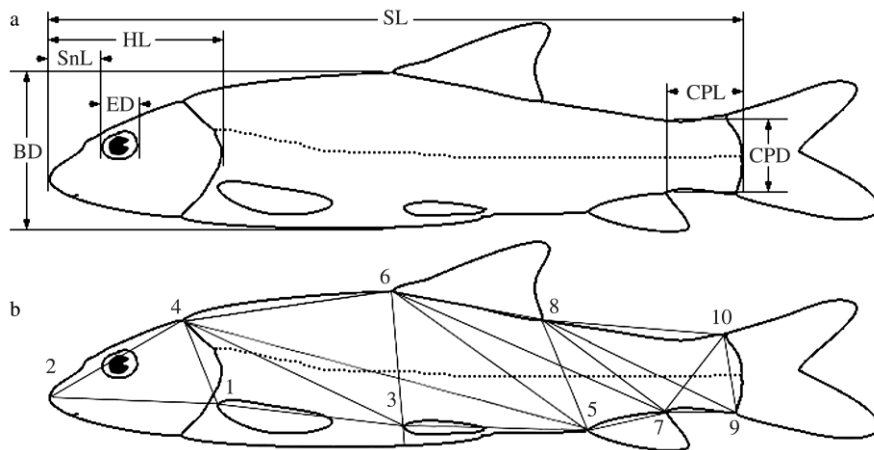


图 1 样本可量性状测量示意图

Fig. 1 Morphometric measurements of the samples

a. 11 个传统形态性状：BD. 体高；CPD. 尾柄高；CPL. 尾柄长；ED. 眼径；EHL. 眼后头长；HL. 头长；IW. 眼间距；MBL. 颌须长；RBL. 吻须长；SL. 体长；SnL. 吻长。b. 10 个框架坐标点：1. 胸鳍基部起点；2. 吻前端；3. 腹鳍基部起点；4. 枕骨后端；5. 臀鳍基部起点；6. 背鳍基部起点；7. 臀鳍基部末端；8. 背鳍基部后端；9. 尾鳍基部腹部起点；10. 尾鳍基部背部起点；10 个定位点之间的距离为 20 个框架数据，如 D_{1-2} 表示定位点 1 与 2 之间的距离。

a. Eleven general characters: BD. Body depth; CPD. Depth of caudal peduncle; CPL. Length of caudal peduncle; ED. Eye diameter; EHL. Head length after eyes; HL. Head length; IW. Interorbital width; MBL. Length of maxillary barbell; RBL. Length of rostral barbell; SL. Standard length; SnL. Snout length. b. Ten landmarks of truss network measurements: 1. Origin of operculum fin base; 2. Tip of snout; 3. Origin of pelvic fin base; 4. Distal tip of occiput; 5. Origin of anal fin base; 6. Origin of dorsal fin base; 7. Posterior end of anal fin; 8. Posterior end of dorsal-fin base; 9. Ventral origin of caudal fin base; 10. Dorsal origin of caudal fin base; 20 truss parameter measurements are the distances between the two of 10 landmark points, e.g., D_{1-2} denotes the distance between landmark point 1 and 2.

1.3 数据处理与分析

用 SPSS Statistics 17.0 进行统计分析。为了消除异速生长对参数值的影响,提高各组数据的正态分布性,可量性状在进行多元分析前参照李思发等(1991)的方法,传统可量性状和框架性状数据先转换成相对于体长的比值,然后取自然对数值,共得到 30 组比例性状参数。数据分析中所有性状数据均为处理后参数,如体高为 $\ln(\text{体高}/\text{体长})$ 。

聚类分析以欧式距离和组间联接法进行系统聚类,种群间的亲疏程度用树形图显示;主成分分析首先进行相关性检验,再依据方差-

协方差矩阵提取主成分,计算各主成分的贡献率和累计贡献率;判别分析用逐步判别分析法进行判别,建立判别公式(张鄂等 2004, 赵建等 2007, Härdle et al. 2012)。

2 结果

四川裂腹鱼和重口裂腹鱼的 30 组参数的比例性状见表 2。经单因素方差分析(ANOVA),两种鱼的 D_{3-5} 、 D_{4-6} 和 D_{5-7} 差异不显著(P 值分别为 0.298、0.254 和 0.709),其余 27 项比例性状数据均存在显著性差异($P < 0.05$)。

表 2 重口裂腹鱼和四川裂腹鱼的比例性状数据

Table 2 Data of proportional characters for *Schizothorax davidi* and *S. kozlovi*

采集时间 Collection year	重口裂腹鱼 <i>Schizothorax davidi</i>		四川裂腹鱼 <i>S. kozlovi</i>	
	2008	2008	2009	2010
体高 Body depth	- 1.38 ± 0.07	- 1.44 ± 0.07	- 1.52 ± 0.09	- 1.44 ± 0.06
头长 Head length	- 1.47 ± 0.18	- 1.42 ± 0.06	- 1.40 ± 0.09	- 1.34 ± 0.04
吻长 Snout length	- 2.54 ± 0.14	- 2.39 ± 0.13	- 2.35 ± 0.15	- 2.34 ± 0.08
眼径 Eye diameter	- 2.99 ± 0.10	- 3.12 ± 0.13	- 3.02 ± 0.15	- 2.93 ± 0.11
眼间距 Interorbital width	- 2.46 ± 0.07	- 2.45 ± 0.12	- 2.44 ± 0.15	- 2.37 ± 0.06
眼后头长 Head length after eyes	- 2.11 ± 0.07	- 2.26 ± 0.16	- 2.30 ± 0.20	- 2.02 ± 0.04
吻须长 Length of rostral barbel	- 2.87 ± 0.18	- 2.64 ± 0.14	- 2.60 ± 0.17	- 2.62 ± 0.11
颌须长 Length of maxillary barbel	- 2.74 ± 0.16	- 2.44 ± 0.11	- 2.45 ± 0.15	- 2.44 ± 0.09
尾柄长 Length of caudal peduncle	- 1.93 ± 0.09	- 1.80 ± 0.10	- 1.73 ± 0.11	- 1.89 ± 0.09
尾柄高 Depth of caudal peduncle	- 2.14 ± 0.08	- 2.29 ± 0.09	- 2.37 ± 0.10	- 2.29 ± 0.07
D ₁₋₂ Distance between point 1 and 2	- 1.48 ± 0.08	- 1.42 ± 0.05	- 1.40 ± 0.14	- 1.40 ± 0.07
D ₁₋₃ Distance between point 1 and 3	- 1.16 ± 0.04	- 1.27 ± 0.13	- 1.27 ± 0.08	- 1.31 ± 0.05
D ₁₋₄ Distance between point 1 and 4	- 1.82 ± 0.07	- 1.93 ± 0.19	- 1.89 ± 0.07	- 1.80 ± 0.09
D ₂₋₄ Distance between point 2 and 4	- 1.79 ± 0.13	- 1.61 ± 0.10	- 1.60 ± 0.08	- 1.67 ± 0.08
D ₃₋₄ Distance between point 3 and 4	- 0.88 ± 0.03	- 1.03 ± 0.18	- 0.98 ± 0.06	- 0.98 ± 0.04
D ₃₋₅ Distance between point 3 and 5	- 1.43 ± 0.05	- 1.42 ± 0.11	- 1.45 ± 0.09	- 1.41 ± 0.07
D ₃₋₆ Distance between point 3 and 6	- 1.42 ± 0.11	- 1.48 ± 0.08	- 1.47 ± 0.12	- 1.48 ± 0.05
D ₄₋₅ Distance between point 4 and 5	- 0.45 ± 0.05	- 0.52 ± 0.03	- 0.51 ± 0.05	- 0.50 ± 0.09
D ₄₋₆ Distance between point 4 and 6	- 1.10 ± 0.30	- 1.04 ± 0.10	- 1.01 ± 0.08	- 1.06 ± 0.08
D ₅₋₆ Distance between point 5 and 6	- 1.07 ± 0.03	- 1.18 ± 0.05	- 1.15 ± 0.05	- 1.15 ± 0.04
D ₅₋₇ Distance between point 5 and 7	- 2.56 ± 0.31	- 2.59 ± 0.11	- 2.54 ± 0.18	- 2.60 ± 0.06
D ₅₋₈ Distance between point 5 and 8	- 1.43 ± 0.10	- 1.61 ± 0.10	- 1.61 ± 0.07	- 1.56 ± 0.05
D ₆₋₇ Distance between point 6 and 7	- 0.98 ± 0.07	- 1.11 ± 0.23	- 1.04 ± 0.07	- 1.04 ± 0.03
D ₆₋₈ Distance between point 6 and 8	- 2.05 ± 0.07	- 2.06 ± 0.06	- 1.95 ± 0.10	- 2.02 ± 0.08
D ₇₋₈ Distance between point 7 and 8	- 1.35 ± 0.08	- 1.45 ± 0.06	- 1.47 ± 0.14	- 1.45 ± 0.05
D ₇₋₉ Distance between point 7 and 9	- 1.84 ± 0.18	- 1.94 ± 0.11	- 1.81 ± 0.16	- 1.86 ± 0.09
D ₇₋₁₀ Distance between point 7 and 10	- 1.61 ± 0.11	- 1.70 ± 0.17	- 1.63 ± 0.12	- 1.67 ± 0.06
D ₈₋₉ Distance between point 8 and 9	- 0.95 ± 0.03	- 1.05 ± 0.04	- 1.01 ± 0.09	- 1.02 ± 0.03
D ₈₋₁₀ Distance between point 8 and 10	- 1.05 ± 0.04	- 1.17 ± 0.08	- 1.10 ± 0.11	- 1.13 ± 0.05
D ₉₋₁₀ Distance between point 9 and 10	- 2.13 ± 0.07	- 2.20 ± 0.08	- 2.23 ± 0.18	- 2.19 ± 0.06

2.1 聚类分析

经聚类分析，2008、2009 和 2010 年 3 次采集的四川裂腹鱼种群聚为一支；2008 年采集的重口裂腹鱼单独为一支（图 2）。

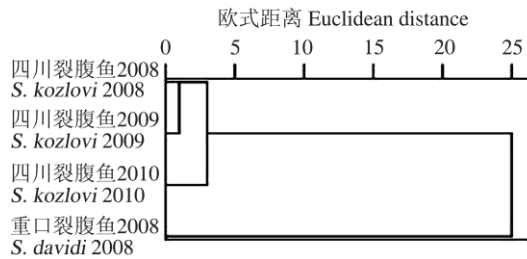


图 2 4 个样本组的聚类分析图

Fig. 2 Cluster dendrogram of four samples

2.2 主成分分析

对 30 组性状参数进行相关性分析，KMO (Kaiser-Meyer-Olkin measure) 统计量 (KMO = 0.733) 和 Bartlett 球型检验结果 ($P < 0.01$) 显示，变量之间相关性强，相关系数矩阵不是单位阵，适宜进行因子分析降维。

采用主成分分析法，共提取 8 个主成分，对总方差的累计贡献率为 73.762%，前 3 个主成分为 48.625%（表 3）。其中主成分 1 对总变异的贡献率为 24.509%，主要取决于性状颌须长、吻须长、吻长、 D_{2-4} 、 D_{5-8} 、 D_{5-6} 、尾柄高和 D_{1-2} ，主成分 2 中贡献最大的是 D_{5-7} 和 D_{4-6} ，主成分 3 为眼径、眼后头长和 D_{1-4} (|负荷值| > 0.5)。

表 3 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 3 Loadings of components matrix and contributions on principal components to total variance of principal component analysis

性状 Character	主成分 Principal components							
	1	2	3	4	5	6	7	8
体高 Body depth	-0.414	0.355	0.005	-0.195	0.413	0.102	-0.129	-0.094
头长 Head length	0.440	0.025	0.440	-0.244	-0.071	0.101	0.393	0.039
吻长 Snout length	0.693	-0.101	0.135	0.058	0.212	-0.289	0.455	-0.142
眼径 Eye diameter	0.087	0.128	0.719	0.168	-0.296	-0.122	0.196	0.310
眼间距 Interorbital width	0.303	0.160	0.423	-0.109	-0.005	0.178	0.235	0.202
眼后头长 Head length after eyes	-0.125	0.196	0.665	-0.566	-0.206	0.226	-0.103	-0.081
吻须长 Length of rostral barbel	0.875	-0.020	0.105	0.000	0.074	-0.119	-0.385	0.097
颌须长 Length of maxillary barbel	0.942	-0.029	0.094	-0.025	0.066	0.005	-0.170	0.076
尾柄长 Length of caudal peduncle	0.490	-0.043	-0.124	0.463	0.113	0.440	0.066	0.038
尾柄高 Depth of caudal peduncle	-0.555	0.211	0.211	-0.122	0.513	-0.045	-0.098	-0.180
D_{1-2} Distance between point 1 and 2	0.537	0.063	0.334	0.010	0.201	0.284	0.132	-0.024
D_{1-3} Distance between point 1 and 3	-0.489	0.136	0.010	0.303	0.374	0.044	0.075	0.307
D_{1-4} Distance between point 1 and 4	0.001	0.108	0.511	-0.056	0.266	-0.226	0.037	-0.430
D_{2-4} Distance between point 2 and 4	0.685	-0.073	-0.062	-0.043	0.365	0.333	-0.020	-0.109
D_{3-4} Distance between point 3 and 4	-0.356	0.173	0.360	0.136	0.283	0.198	-0.185	0.106
D_{3-5} Distance between point 3 and 5	0.018	-0.043	-0.020	-0.118	0.004	-0.348	0.036	0.286
D_{3-6} Distance between point 3 and 6	-0.196	0.223	0.174	0.014	0.549	0.329	-0.005	-0.042
D_{4-5} Distance between point 4 and 5	-0.318	0.121	0.123	0.025	0.157	-0.090	-0.168	0.196
D_{4-6} Distance between point 4 and 6	0.313	0.831	-0.205	0.052	0.109	0.049	0.203	0.109
D_{5-6} Distance between point 5 and 6	-0.592	0.077	0.297	0.096	0.338	-0.080	-0.169	0.266
D_{5-7} Distance between point 5 and 7	-0.125	-0.899	0.208	0.019	0.187	-0.038	0.060	0.160
D_{5-8} Distance between point 5 and 8	-0.605	0.125	0.287	-0.028	0.276	0.164	-0.197	0.249
D_{6-7} Distance between point 6 and 7	-0.169	0.428	0.216	0.089	0.021	-0.529	-0.194	-0.066
D_{6-8} Distance between point 6 and 8	0.275	-0.110	0.213	0.156	0.263	-0.172	0.075	-0.040
D_{7-8} Distance between point 7 and 8	-0.363	0.439	-0.011	0.026	0.134	-0.189	-0.149	0.390
D_{7-9} Distance between point 7 and 9	0.068	0.197	0.404	0.721	-0.218	0.044	-0.124	-0.161
D_{7-10} Distance between point 7 and 10	-0.242	-0.192	0.332	0.593	-0.055	0.167	-0.068	-0.281
D_{8-9} Distance between point 8 and 9	-0.487	0.129	0.316	0.377	-0.012	0.042	0.087	0.231
D_{8-10} Distance between point 8 and 10	-0.372	0.219	0.257	0.378	-0.011	0.001	0.112	0.268
D_{9-10} Distance between point 9 and 10	-0.202	0.072	0.142	-0.009	0.670	-0.211	0.112	0.046
贡献率 Variance (%)	24.509	13.700	10.416	7.235	5.935	4.344	4.259	3.365
累计贡献率 Cumulative variance (%)	24.509	38.209	48.625	55.860	61.795	66.138	70.397	73.762

将主成分 1、2 和 3 的因子得分作散点图(图 3)，2008、2009 和 2010 年 3 次采集的四川裂腹鱼种群在主成分空间上的分布出现较大的重叠，而重口裂腹鱼则明显的独立开来。

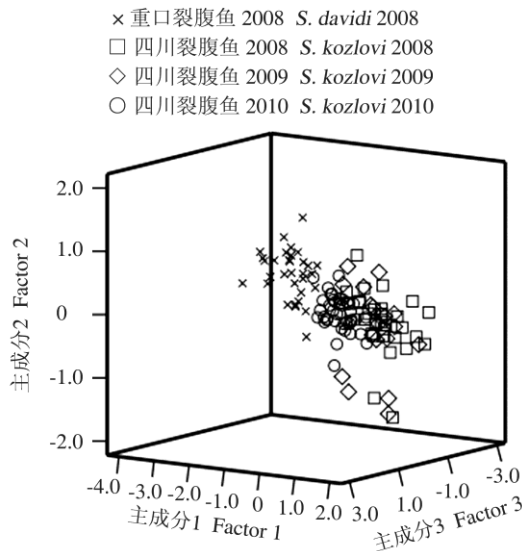


图 3 主成分分析第 1、2、3 主成分因子得分散布图

Fig. 3 Distribution of scores on the first three principal components of morphometric characters

2.3 判别分析

采用逐步判别法，筛选出体高、眼径、眼后头长、颌须长、尾柄长、尾柄高、 D_{1-3} 、 D_{1-4} 、 D_{5-6} 和 D_{6-8} 10 个判别贡献大的性状，对四个样本组进行判别(表 4)。判别成功率分别为 97.0%、90.0%、66.7% 和 100%，其中四川裂腹鱼 2009 年采集的标本有 5 尾误判入 2008 年，1 尾误判入 2010 年，误判率高达 33.3%。将判别能力最强的两个特征性状 D_{5-6} 和眼径做判别分析图(图 4)，3 次采集的四川裂腹鱼标本有不同程度的重叠。尝试将 3 次采集的四川裂腹鱼样本合并进行分析，建立新的判别函数方程。四川裂腹鱼： $Y = -1487.245 - 54.793X_1 - 129.600X_2 - 81.441X_3 - 392.491X_4 - 229.670X_5 + 54.055X_6 - 360.948X_7 - 187.092X_8 - 406.978X_9$ ，重口裂腹鱼： $Y = -1350.638 - 66.325X_1 - 121.433X_2 - 100.762X_3 - 359.971X_4 - 201.250X_5 + 47.422X_6 - 329.969X_7 - 168.656X_8 - 375.710X_9$ ，式中， $X_1 \sim X_9$ 分别代表吻长、眼径、颌须长、尾柄高、 D_{1-3} 、 D_{4-6} 、 D_{5-6} 、 D_{7-8} 和 D_{8-9} ，将样本代入判别公式检验预

表 4 4 组样本判别分析的 Fisher 判别函数系数和判别成功率

Table 4 Fisher's function coefficients and accuracy rate of discriminant analysis from four groups of samples

采集时间 Collection year	重口裂腹鱼 <i>Schizothorax davidi</i>	四川裂腹鱼 <i>S. kozlovi</i>		
	2008	2008	2009	2010
体高 Body depth	-210.122	-193.192	-207.979	-188.159
眼径 Eye length	-246.890	-274.960	-270.745	-253.893
眼后头长 Head length after eyes	-155.873	-170.691	-172.007	-153.169
颌须长 Length of maxillary barbel	-30.813	-0.511	-8.087	-6.749
尾柄长 Length of caudal peduncle	-67.240	-46.878	-37.535	-66.713
尾柄高 Depth of caudal peduncle	-186.785	-216.400	-228.375	-217.020
D_{1-3} Distance between point 1 and 3	-176.429	-199.416	-196.737	-202.917
D_{1-4} Distance between point 1 and 4	-92.585	-112.342	-108.324	-99.088
D_{5-6} Distance between point 5 and 6	-451.088	-557.059	-533.578	-525.129
D_{6-8} Distance between point 6 and 8	-212.644	-189.088	-169.636	-189.129
常数 Constant	-1633.420	-1812.933	-1777.382	-1700.259
判别成功率 (%) Discriminant accuracy rate	97.0	90.0	66.7	100

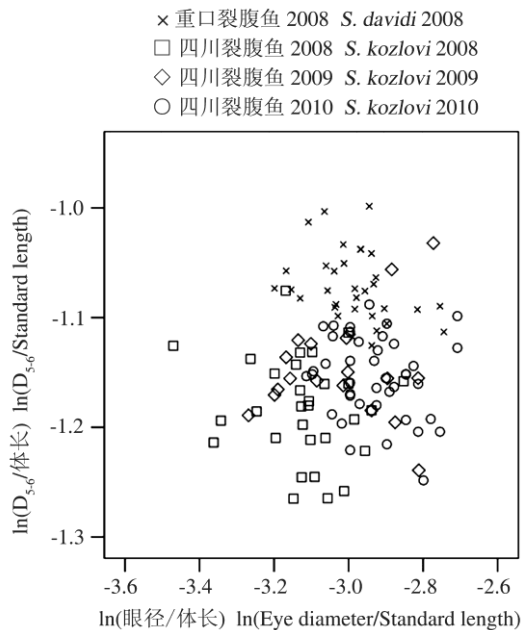


图 4 判别分析的特征性状散布图

Fig. 4 Scatterplot of canonical characters of discrimination analysis

测分类，四川裂腹鱼和重口裂腹鱼判别准确率均为 100%。

3 讨论

3.1 多元分析的合理性

鱼类形态学特性是多个性状的集合，因此选择合理恰当的分析方法对种类进行区分至关重要。在种的鉴别上，传统的可数性状和可量性状描述只是进行简单的数据比较，不具备统计意义的量化区分，不能准确反映种间及种内群体的亲缘关系。框架性状的结合弥补了传统可量性状的缺陷，从多维空间度量鱼体外部形态，结合多变量统计分析方法，能够全面地概括鱼体表的全部信息，更准确更系统地反映鱼体的形态差异，更全面更有效地辨别种间及种内群体。当前以传统可量性状和框架性状相结合的多元分析方法已被广泛应用于鱼类种间分类、种内群体划分和育种选育等方面，并取得了较好的效果。本研究中，聚类分析根据 4 个样本组相似程度的大小进行了初步的定量归类，将 3 次采集的四川裂腹鱼标本定为一个种

群，而重口裂腹鱼明显独立；主成分分析将 30 个性状参数整合成少数能说明两种鱼差异的因子，所提取的负荷值大的性状集中在吻端和躯干后侧；判别分析分成两步，通过数据和图像进行初步判别，将四川裂腹鱼合为一个群，再建立两种鱼的判别函数，从而对种类进行合理的判别分类，其中判别能力强的性状主要位于吻端、躯干后侧和尾柄。三种分析方法从不同的角度反映种类间的差异，彼此之间不能相互代替 (Li et al. 2005)。三种方法的结果均显示，四川裂腹鱼与重口裂腹鱼差异明显，而 3 次采集的四川裂腹鱼为同一种群。

3.2 分析方法的准确性

单一的分析方法存在局限性，如聚类分析只是对数据进行初步归类，可以直观地体现样本组间差异的大小，但无法进一步挖掘样本的潜在信息。数据的处理方式会对结果产生影响，本研究中主成分分析参照李旭等 (2008) 对褶鲃属鱼类的处理方法仅对原始数据进行对数转换，分析结果与其相近，KMO 值为 0.961，球形检验 $P < 0.01$ ，最终提取三个主成分，累计贡献率 83.675% (三个主成分贡献率分别为 72.208%、7.288% 和 4.179%)，但主成分 1 所有性状负荷值均大于 0.7，体现不出特征性状，需要做进一步处理，因此合理的数据处理方式至关重要。分析结果也需要有说服力，4 组样本建立的判别公式误判率高，判别结果不合理，通过分析后合并四川裂腹鱼样本，重新建立判别公式，取得了很好的判别效果。

3.3 两种裂腹鱼的有效性

裂腹鱼类是青藏高原阶梯式隆升的产物，伴随自然条件的改变，裂腹鱼亚科纵向形态的特化和横向食性的趋异有效地填充了高原水生态系统的生态位，由此形成了多样化的类群及与之相适应的特殊形态结构特征和生理生态特性 (曹文宣等 1981, 武云飞等 1991b)。通过形态特征来研究裂腹鱼种间亲缘关系已有较多报道，如 Chen 等 (2001) 通过骨骼、口和须的 41 个形态特征对 12 个裂腹鱼特化种和亚种进行了有效鉴别。对于处在原始等级的两个种，

四川裂腹鱼主要分布在金沙江、雅砻江和乌江等水系，重口裂腹鱼主要分布在岷江、嘉陵江和金沙江等水系(丁瑞华 1994, 乐佩琦 2000)。武云飞等(1991a)在《青藏高原鱼类》中仅提到重口裂腹鱼一个种，但同时也指出岷江水系个体在背鳍末根不分支鳍条上存在细软的特征，丁瑞华(1994)和乐佩琦(2000)根据侧线鳞和背鳍末根不分支鳍条的差异，将两种鱼进一步区别开来。本研究结合传统可量性状和框架性状数据，通过系统的多元分析方法，更直观地显示了两者的外部形态的差异，其中主成分分析和判别分析所提取的特征性状都体现在吻端和躯干后侧，这也反应了裂腹鱼类本身的形态差异，研究结果证实四川裂腹鱼和重口裂腹鱼是两个独立的有效种。

致谢 数据测量过程中得到了毕节学院地理与生命科学学院生物科学专业学生洪丹、董文娟、余江、余永凤的大力帮助，在此一并致谢。

参 考 文 献

- Chen Z M, Chen Y F. 2001. Phylogeny of the specialized schizothoracine fishes (Teleostei: Cypriniformes: Cyprinidae). *Zoological Studies*, 40(2): 147–157.
- Härdle W K, Simar L. 2012. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. 3rd ed. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 269–347.
- He D K, Chen Y F. 2006. Biogeography and molecular phylogeny of the genus *Schizothorax* (Teleostei: Cyprinidae) in China inferred from cytochrome *b* sequences. *Journal of Biogeography*, 33(8): 1448–1460.
- Li S F, Wang C H, Cheng Q Q. 2005. Morphological variations and phylogenesis of four strains in *Cyprinus carpio*. *Journal of Fisheries of China*, 29(5): 606–611.
- Park L K, Moran P. 1994. Developments in molecular genetic techniques in fisheries. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 4(3): 272–299.
- Yang J, Yang J X, Chen X Y. 2012. A re-examination of the molecular phylogeny and biogeography of the genus *Schizothorax* (Teleostei: Cyprinidae) through enhanced sampling, with emphasis on the species in the Yunnan – Guizhou Plateau, China. *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research*, 50(3): 184–191.
- Yu H X, Tang W Q, Li S F. 2010. Ontogenetic changes in meristic measurements of silver carp and bighead carp. *Zoological Research*, 31(2): 169–176.
- 曹文宣, 陈宜瑜, 武云飞, 等. 1981. 裂腹鱼类的起源和演化及其与青藏高原隆起的关系//中国科学院青藏高原综合科学考察队. 青藏高原隆起的时代、幅度和形式问题. 北京: 科学出版社, 118–130.
- 陈永祥. 2013. 四川裂腹鱼 (*Schizothorax kozlovi* Nikolsky) 种质特征及其遗传多样性研究. 雅安: 四川农业大学博士学位论文, 61–92.
- 丁瑞华. 1994. 四川鱼类志. 成都: 四川科学技术出版社, 380–383.
- 李思发, 蔡完其, 周碧云. 1991. 团头鲂种群间的形态差异和生化遗传差异. *水产学报*, 15(3): 204–211.
- 李思发, 吴力钊, 王强, 等. 1990. 长江、珠江、黑龙江鲢、鳙、草鱼种质资源研究. 上海: 上海科学技术出版社, 109–124.
- 李旭, 李凤莲, 刘恺, 等. 2008. 中国伊洛瓦底江和怒江褶鳃属鱼类的形态差异及分类地位. *动物学研究*, 29(1): 83–88.
- 李渝成, 李康, 桂建芳, 等. 1987. 中国鲤科鱼类染色体组型的研究 XI. 裂腹鱼亚科二种鱼和鳅鲃亚科三种鱼的染色体组型. *水生生物学报*, 11(2): 184–186.
- 林艳红, 安苗, 姜海波. 2010. 3 种裂腹鱼的形态差异研究. *贵州农业科学*, 38(10): 121–126.
- 冉光鑫, 代应贵, 岳晓炯. 2011. 喀斯特地区四川裂腹鱼和光唇裂腹鱼的外形特征及差异性分析. *江苏农业科学*, 39(5): 490–494.
- 武云飞, 谭齐佳. 1991b. 青藏高原鱼类区系特征及其形成的地史原因分析. *动物学报*, 37(2): 135–152.
- 武云飞, 吴翠珍. 1991a. 青藏高原鱼类. 成都: 四川科学技术出版社, 317–323.
- 谢仲桂, 谢从新, 张鄂. 2003. 我国华鳊属鱼类形态差异及其物种有效性的研究. *动物学研究*, 24(5): 321–330.
- 乐佩琦. 2000. 中国动物志: 硬骨鱼纲 鲤形目 (下卷). 北京: 科学出版社, 327–330.
- 张鄂, 谢仲桂, 谢从新. 2004. 大眼华鳊和伍氏华鳊的形态差异及其物种有效性. *水生生物学报*, 28(5): 511–518.
- 赵建, 朱新平, 陈永乐, 等. 2007. 珠江卷口鱼不同地理种群的形态变异. *动物学报*, 53(5): 921–927.
- 邹习俊. 2009. 四川裂腹鱼核型及遗传多样性研究. 贵阳: 贵州大学硕士学位论文, 23–48.