

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.19389

沅江与西江水系大眼华鲮的形态差异

李忠利¹, 巴家文¹, 赵海涛², 梅杰¹, 刘阳¹

1. 铜仁学院农林工程与规划学院, 贵州省普通高校工程中心铜仁学院水产养殖工程中心, 贵州省梵净山地区生物多样性保护与利用重点实验室, 贵州 铜仁 554300;
2. 贵州工程应用技术学院生态工程学院, 贵州 毕节 551700

摘要: 为了探讨沅江和西江水系大眼华鲮(*Sinibrama macrops*)的形态差异及分化程度, 对两个水系 5 个种群的 147 个样本进行了测量, 共获得 9 个可量性状和 21 个框架性状, 通过多元分析方法进行了比较。Friedman 非参数检验的结果显示, 5 个种群间的体侧各部分面积存在显著性差异($P < 0.01$)。聚类分析将 5 个种群分为三支, 其中西江两个种群为一支, 沅江干流和沅江锦江种群为一支, 沅江清水江种群单独为一支。主成分分析共提取出 6 个主成分, 对总方差的累计贡献率为 81.93%, 贡献率大的性状集中在尾柄部、头部和躯干前部。判别分析筛选出头部和尾柄部的 10 个性状, 分别建立了 5 个种群的判别函数, 判别成功率在 92%~100%。3 种多元分析方法从框架形态差异上将沅江和西江水系大眼华鲮的种群有效区分开来, 为 5 个种群的形态差异及资源评价提供了基础资料。

关键词: 大眼华鲮; 沅江; 西江; 长江; 形态差异; 多元分析

中图分类号: S93

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2020)08-0886-07

河流系统中鱼类的栖息地分散是普遍存在的, 产生的原因与地质造山运动、水利工程建设、相邻的水体间隔等地理隔离因素有关, 这对物种的形态、行为、生理甚至遗传变异等多样性分布有着重要的意义^[1-2]。地理隔离是物种进行选择的重要内容, 能促使鱼类的生态适应, 同时也导致了不同水系鱼类的差异, 在外部形态特征和内部遗传结构上发生不同程度的改变, 从而反映出鱼类种群的隔离、迁移、定居等事件^[3-5]。

华鲮属(*Sinibrama*)是中国长江以南各水系的一种常见小型鱼类, 在国外的越南红河和老挝 Nam Ma 河也有一定分布^[6-7]。自华鲮属模式种 [*Chanodichthys wui* Rendahl (1932)] 建立以来^[8], 相关学者通过形态学和分子生物学对其物种多样性及种间关系进行了研究。如罗雯^[9]进行了多变量形态学测量性状的主成分分析, 显示大眼华鲮(*S. macrops*)、伍氏华鲮(*S. wui*)和海南华鲮(*S.*

melrosei)大部分重叠, 而四川华鲮(*S. taeniatus*)存在明显差异。谢仲桂等^[8]和张鹗等^[10]通过多变量和传统形态度量学方法的结合分析, 发现伍氏华鲮是大眼华鲮的同物异名。罗雯^[9]通过两种华鲮的线粒体和核基因系统发育关系也证实了这一点。赵良杰等^[11]对浙江千岛湖 3 个水域的大眼华鲮种群进行了框架形态差异比较, 并结合线粒体序列分析认为千岛湖大眼华鲮属于随机交配群体。当前对长江、珠江的华鲮属种间差异已有较多的比较^[8-11], 而对于两个水系之间的种内差异比较还未见报道。

大眼华鲮个体小、生长快、适应性强、地域性突出, 在两大水系及附属水体都有分布, 是研究物种特性及差异的理想材料。五岭横亘于湖南、两广、江西之间, 是长江洞庭湖水系与珠江西江水系的主要分水岭, 形成典型的地理隔离^[12-13]。有关大眼华鲮的种内关系研究集中在千岛湖种群

收稿日期: 2019-12-27; 修订日期: 2020-02-14.

基金项目: 贵州省科学技术基金计划项目(黔科合基础[2016]1151); 贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔科合 KY 字[2017]31); 贵州省科技厅重点实验室项目(黔科合平台人才[2020]2003).

作者简介: 李忠利(1982-), 男, 副教授, 主要从事鱼类生态学研究. E-mail: lzl1982505@163.com

上, 主要对其不同居群进行了形态学和分子生物学比较, 而对其他水系种群还未见报道^[11]。本研究结合已有文献, 选择地理位置邻近的长江和珠江支流五个点进行取样, 通过传统形态学数据和框架数据的结合, 探讨大眼华鲮种内的形态学差异, 完善该鱼的生物学数据, 为鱼类的亲缘地理学研究补充基础资料。

1 材料与方法

1.1 样本采集

2016 年 7 月—2018 年 8 月, 147 尾大眼华鲮样本分别采集于长江中游沅江和珠江中游西江的干流和上游支流, 标本基本信息见表 1。种类的鉴定根据陈宜瑜^[6]描述, 以臀鳍分支鳍条数、第一鳃弓

外鳃耙数、眼径大小及背鳍刺强弱等特征作为主要分类依据。选取体型正常、体表无损伤的新鲜标本用 10% 福尔马林浸泡保存。

1.2 形态参数测量

用尼康数码相机带标尺拍照, 通过 tpsDIG 软件统一测量鱼体左侧的基本形态学数据和框架数据, 共得到 30 个性状, 其中传统形态学数据 9 个性状, 框架数据通过设定的 10 个坐标点测量相邻两点间的直线距离, 共测得 21 个性状(图 1, 如 D_{1-2} 表示定位点 1 与 2 之间的距离, cm)。

1.3 体侧面积计算

通过框架数据点将体侧划分出头部、躯干前部、躯干后部和尾柄部 4 个区域, 四个区域由 1~3 个三角形组成, 通过海伦公式计算三角形面积:

表 1 大眼华鲮采集信息表
Tab. 1 Collection information of *Sinibrama macrops*

采样点 collection site	经纬度 longitude and latitude	水系 collection basin	缩写 abbreviation	样本数 number	全长/cm total length	体高/cm body height	体高/全长 body height/ total length
湖南怀化 Huaihua in Hunan	110°11'34"E 28°00'22"N	长江沅江中游干流 main stream of Yuanjiang in the Yantze River	YMS	32	13.0–19.9 15.5±1.4	3.5–4.9 4.2±0.4	0.24–0.30 0.27±0.02
贵州铜仁 Tongren in Guizhou	109°11'33"E 27°43'03"N	长江沅江中游支流锦江 Jinjiang, tributary of Yuanjiang in the Yangtze River	YJJ	35	11.6–19.3 14.1±1.6	3.0–5.4 3.7±0.5	0.24–0.28 0.26±0.01
贵州剑河 Jianhe in Guizhou	108°27'22"E 26°44'56"N	长江沅江上游清水江 Qingshuijiang, upstream of Yuanjiang in the Yangtze River	YQS	31	9.2–14.2 13.3±1.1	2.8–4.5 3.6±0.3	0.20–0.25 0.23±0.01
广西荔浦 Lipu in Guangxi	110°24'08"E 24°29'31"N	珠江西江中游干流 main stream of Xijiang in the Pearl River	XMS	25	12.2–15.3 13.6±0.9	3.5–4.7 4.0±0.3	0.27–0.31 0.29±0.01
广西宜州 Yizhou in Guangxi	108°39'56"E 24°30'12"N	珠江西江上游柳江 Liujiang, upstream of Xijiang in the Pearl River	XLJ	24	10.2–18.8 14.4±2.4	2.7–5.9 4.1±0.9	0.24–0.32 0.28±0.02

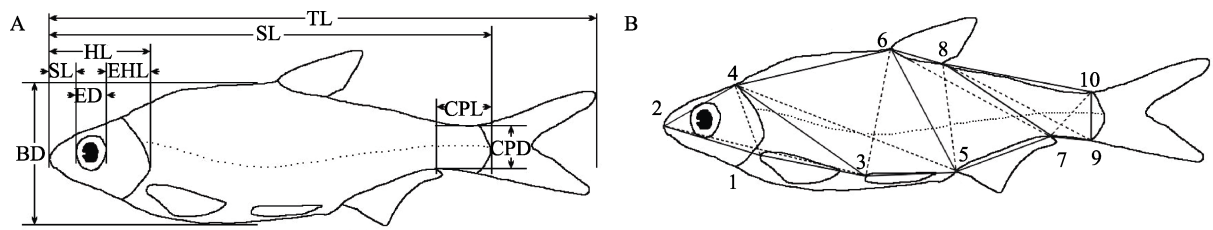


图 1 大眼华鲮测量示意图

A: 传统测量性状: BD—体高; CPD—尾柄高; CPL—尾柄长; ED—眼径; EHL—眼后头长; HL—头长; SL—体长; SnL—吻长; TL—全长。B: 框架坐标点: 1—胸鳍基部起点; 2—吻前端; 3—腹鳍基部起点; 4—枕骨后末端; 5—臀鳍基部起点; 6—背鳍基部起点; 7—臀鳍基部末端; 8—背鳍基部末端; 9—尾鳍腹部起点; 10—尾鳍背部起点。

Fig. 1 Measurement schematic diagram of *Sinibrama macrops*

A. Traditional measured characters: BH—body height; CPD—height of caudal peduncle; CPL—length of caudal peduncle; ED—eye diameter; EHL—head length after eyes; HL—head length; SL—standard length; SnL—snout length; TL—total length.

B. marker points 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.

设 3 条边边长为 a 、 b 、 c ，系数 $z=(a+b+c)/2$ ，面积 $S=\sqrt{z(z-a)(z-b)(z-c)}$ ；合并后得到 4 个区域 (S_{124} 、 S_{13456} 、 S_{5678} 和 S_{78910})的面积。

1.4 数据处理与分析

用 Microsoft Excel 2013 对原始数据进行初步整理，随后用 SPSS Statistics 17.0 进行统计分析。参考李思发等^[14]的方法对数据进行标准化处理，将所有原始测量数据转换成相对于全长的比值，共得到 29 组性状参数[例如结果中头长为(头长/全长)]。

各组数据采用单因素方差分析进行比较，当差异显著时则进行多重比较(Duncan 法)，显著性水平为 0.05。多元分析方法如下，聚类分析通过欧式距离和组间联接法聚类，并用树形图表示各种群之间的亲疏程度；主成分分析依次用相关性

检验、方差-协方差矩阵提取主成分，并计算各主成分的贡献率；判别分析用逐步判别法建立判别公式^[10, 15-16]。

2 结果与分析

2.1 体侧面积比较

计算了鱼体体侧的四部分面积及比例，结果见表 2。对面积比例进行了相关样本的非参数检验(Friedman 检验)，结果显示 $\chi^2=15.000$ ， $P=0.002$ ，说明 5 个种群间的面积存在显著性差异($P<0.01$)。

2.2 聚类分析

对 5 个种群的 29 个性状参数进行了聚类分析，图 2 显示，5 个种群分为三支，西江两个种群为一支，沅江干流和锦江种群为一支，沅江清水江种群单独为一支。

表 2 5 个种群大眼华鲮的体侧各部分面积
Tab. 2 Area of each body side from five populations of *Sinibrama macrops*

采样点 sampling site	面积/cm ² area				各面积比例均值 average proportion of each area
	S_{124}	S_{13456}	S_{5678}	S_{78910}	
沅江干流 YMS	2.4±0.5	16.6±2.6	7.5±1.2	4.9±1.1	8:53:24:15
沅江锦江 YJJ	2.1±0.5	14.0±3.8	6.0±1.6	4.6±1.1	8:53:22:17
沅江清水江 YQS	2.1±0.4	13.8±2.0	5.8±0.8	4.7±0.8	8:52:22:18
西江干流 XMS	2.2±0.4	13.9±2.0	6.0±1.0	3.8±0.7	8:54:23:15
西江柳江 XLJ	2.5±0.7	15.2±6.6	6.9±2.8	4.5±1.8	9:52:23:16

注：采样点详细信息见表 1。
Note: The detail information of sampling sites is shown in Tab. 1.

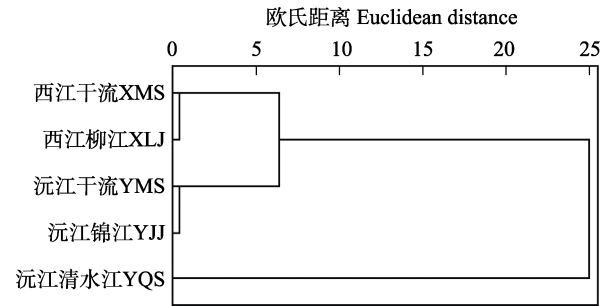


图 2 5 个种群大眼华鲮的聚类分析图
样本来源详细信息见表 1。

Fig. 2 Cluster dendrogram of five populations of *Sinibrama macrops*
The detail information of sampling sites is shown in Tab. 1.

2.3 主成分分析

对 29 组性状参数进行适合度检验，其中 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin measure)统计量为 0.713，Bartlett 球

型检验结果 $P=0.000$ ，变量之间相关性强，适宜进行因子分析降维。

选择 Kaiser 标准化的正交旋转法进行因子旋转，旋转在 10 次迭代之后收敛，共提取出 6 个主成分，对总方差的累计贡献率为 81.93% (表 3)。其中主成分 1 的贡献率为 29.22%，贡献大的特征性状依次为 D_{7-9} 、尾柄长、 D_{3-6} 、体高和 D_{7-9} 等，主要集中在尾柄部、头部和躯干前部，主成分 2 中贡献最大的特征性状是头长、 D_{1-2} 、吻长、 D_{2-4} 和 D_{2-3} ，都集中在头部(|负荷值|>0.5)。

对主成分 1、2 和 3 进行因子得分汇总，并作散点图(图 3)。5 个大眼华鲮种群中，沅江干流、沅江锦江、西江干流和西江柳江种群出现明显的重叠区，仅沅江清水江种群单独为一支。

表 3 5 个群体大眼华鲮主成分分析中的因子负荷系数

Tab. 3 Factors loadings of components matrix in Principal Component Analysis of five populations of *Sinibrama macrops*

性状 character	主成分 principal component						性状 character	主成分 principal component					
	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6
体长 body length	-0.149	0.427	0.514	0.468	0.142	0.130	D_{4-5}	0.251	-0.200	0.834	0.064	0.008	0.218
体高 body height	0.815	-0.038	0.346	0.242	-0.008	0.198	D_{4-6}	-0.067	-0.258	0.754	0.050	0.045	-0.408
头长 head length	-0.210	0.911	-0.200	-0.122	-0.007	-0.044	D_{5-6}	0.761	-0.182	0.359	0.280	0.022	0.311
吻长 snout length	-0.191	0.831	-0.305	-0.021	-0.026	0.000	D_{5-7}	0.758	-0.209	-0.189	0.127	-0.031	-0.037
眼径 eye diameter	0.639	0.478	-0.172	-0.157	-0.247	-0.154	D_{5-8}	0.762	-0.165	0.268	0.358	0.103	0.097
眼后头长 head length after eyes	-0.682	0.470	0.069	-0.076	0.202	0.041	D_{6-7}	0.734	-0.260	0.118	0.466	-0.017	0.287
尾柄长 length of caudal peduncle	-0.845	0.183	-0.022	0.222	0.195	0.057	D_{6-8}	0.073	0.028	0.153	-0.114	0.078	0.909
尾柄高 height of caudal peduncle	-0.341	0.150	0.151	0.017	0.762	0.050	D_{7-8}	0.708	-0.266	0.081	0.573	-0.039	-0.110
D_{1-2}	-0.032	0.897	-0.188	-0.202	0.087	-0.124	D_{7-9}	-0.849	0.066	-0.028	0.099	0.261	0.075
D_{1-3}	0.338	-0.253	0.662	-0.058	0.319	0.212	D_{7-10}	-0.770	0.108	-0.015	0.183	0.458	0.105
D_{1-4}	0.702	0.411	0.025	0.026	0.186	0.059	D_{8-9}	0.129	-0.185	0.036	0.920	0.079	-0.108
D_{2-3}	0.179	0.716	0.305	-0.181	0.390	0.161	D_{8-10}	0.118	-0.079	0.040	0.889	-0.092	-0.028
D_{2-4}	-0.245	0.814	-0.094	0.017	-0.029	0.098	D_{9-10}	-0.055	-0.037	0.010	-0.012	0.852	0.029
D_{3-4}	0.640	0.112	0.541	0.077	0.326	0.103	贡献率/% variance	29.22	17.04	11.81	10.27	8.18	5.42
D_{3-5}	-0.023	-0.304	0.582	0.096	-0.431	0.274	累计贡献率/% cumulative variance	29.22	46.26	58.07	68.34	76.51	81.93
D_{3-6}	0.837	-0.077	0.310	0.209	0.026	0.158							

注: D 表示图 1 中鱼体各点间的距离。
Note: D represents the distance between the fish points in Fig. 1.

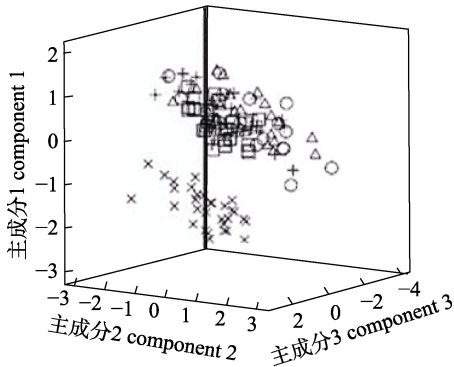


图 3 主成分 1、2、3 因子得分散布图
+沅江干流种群, □沅江锦江种群, ×沅江清水江种群,
△西江干流种群, ○西江柳江种群。
Fig. 3 Distribution of scores of the first three principal components
+YMS, □YJJ, ×YQS, △XMS, ○XLJ.

2.4 判别分析

通过逐步判别分析, 共筛选出体高、头长、

吻长、眼径、尾柄高、 D_{1-2} 、 D_{1-3} 、 D_{2-3} 、 D_{2-4} 和 D_{7-9} 等 10 个性状, 对 5 个种群进行判别, 综合差别准确率 92.3% (表 4)。其中沅江干流、沅江锦江、沅江清水江、西江干流和西江柳江的判别成功率分别为 95.8%、97.1%、100.0%、92.0%和 93.3%, 除沅江清水江外, 其余组在各自的干支流之间都存在误判, 误判率在 2.9%~8.0%之间。

3 讨论

3.1 不同种群大眼华鲮的形态差异

在形态学分析中, 常规的可数性状和可量性状在一定程度上能反映出不同种群间局部特征差异, 但不能有效反应出种群间的差异程度。而框架多元分析不仅将差异缩小量化, 还能将差异量化到具体部位^[17-18]。本研究中, 10 个框架坐标点

表 4 5 组大眼华鲮样本判别分析的 Fisher 判别函数系数和判别成功率
Tab. 4 Fisher's function coefficients and accuracy rate of discriminant analysis among five populations

性状 character	对应函数 function	沅江干流 YMS	沅江锦江 YJJ	沅江清水江 YQS	西江干流 XMS	西江柳江 XLJ
体高 body height	X_1	682.352	647.511	139.994	968.176	877.087
头长 head length	X_2	918.252	766.210	1552.194	807.297	927.702
吻长 snout length	X_3	-912.129	-982.871	-1228.238	-291.291	-536.722
眼径 eye diameter	X_4	-715.851	-792.244	-2982.888	-719.036	-1040.469
尾柄高 height of caudal peduncle	X_5	1388.941	993.684	1931.807	766.052	723.688
D_{1-2}	X_6	-142.338	-291.315	-252.164	-550.516	-483.444
D_{1-3}	X_7	334.505	-55.533	299.662	-24.634	-41.208
D_{2-3}	X_8	840.803	1329.072	1263.170	1234.924	1262.838
D_{2-4}	X_9	1361.834	1320.145	2018.365	1436.904	1498.358
D_{7-9}	X_{10}	1740.339	1862.544	2078.135	1895.258	1890.799
常数 constant	—	-558.679	-568.827	-704.700	-618.945	-608.150
判别成功率/% discriminant accuracy rate	—	95.8	97.1	100.0	92.0	93.3
误判归入种群及百分率/% misjudgement population	—	沅江锦江 (4.2)YJJ	沅江干流 (2.9)YMS	—	西江柳江 (8.0)XLJ	西江干流 (6.7)XMS

从纵向、横向、斜向将鱼体分成多个单元区，能较好地反映大眼华鲮各种群间的形态差异，而进一步的多元分析将差异明确到具体性状上。首先，聚类分析将两个水系的大眼华鲮种群明显分类开来，且沅江清水江种群单独聚为一支，通过欧氏距离量化出各种群间的差异程度；主成分分析通过相关矩阵将复杂的 29 个参数数据简化为 6 个主成分并进行排序，将差异缩小到几个主要特征性状上，并通过各因子得分散点图概括各种群的形态差异；判别分析对 5 个种群分别建立判别公式，进行判别归类，并显示出误判率及判入种群，从而间接反映出相邻种群间的亲疏程度。类似结果与大刺鲃(*Mastacembelus armatus*)、雅罗鱼属(*Leuciscus* sp.)、鲮(*Hemiculter leucisculus*)等的报道相近，且后两种方法能将差异具体到头部和尾柄部位的特征性状上，能够有效反映出种群间的差异部位及差异程度^[4, 18-19]。

3.2 形态差异与表型可塑性

表型是基因型和环境的产物，也是选择的焦点。环境是物种选择的媒介，是不同表型获得不同程度生存和繁殖成功的竞技场，它对一个特定基因型将产生的表型范围有重要影响^[20]。环境影响的表型在进化过程中受到选择和修饰，产生可塑性，影响着进化的方向。选择是鱼类种群产生

形态差异的主要驱动因素，通常都是向着有利于某种程度的表型可塑性^[20-21]。Cheng 等^[19]对长江中游 3 个湖泊鲮(*Hemiculter leucisculus*)的形态分化进行了比较，认为鱼体自身游泳能力和外界环境产生的表型可塑性可能导致鱼类产生形态差异。在本研究中，两个水系均受到不同程度的水利工程建设影响，其水环境特征都发生了变化，大眼华鲮的外部形态特征也发生了相应改变，多元分析的结果证实了这一点，不同种群间形态差异明显，尤其表现在头部和尾柄部的部分性状上；同时多重比较的结果也显示，5 个大眼华鲮种群间的体高与全长比都存在显著性差异，其中以沅江清水江种群最小，西江干流最大($P<0.05$ ，表 1)。

地理隔离下不同水系的环境压力可能是导致形态差异的主要原因，不同地理种群之间的形态变异往往是局域生境不同而引起的表型差异^[3-4]。表型差异可使种群利用不同程度的空间和时间环境条件^[5, 22]。物种内部对人为干扰(如河流蓄水、改变流态等)而形成一定的形态差异，Haas 等^[23]在真小鲤(*Cyprinella venusta*)的研究中认为水利工程建设产生了地理隔离，而新的水环境特征可能是种内多样化的进化驱动因素。鱼类通常通过改变自身的表型性状，使其成为种群动态平衡调节的杠杆，以此促进种群与新环境的适应，这

一点在不断变化的河流鱼类中表现尤为明显^[24]。胡俊仪等^[25]和杨慧荣等^[26]在对红河麦穗鱼(*Pseudorasbora parva*)及珠江大眼鲮(*Siniperca kneri*)的研究中认为鱼类的形态特征是遗传因子与环境因子共同影响下的外在表现。在本研究中, 几种分析方法都显示两个水系的大眼华鲮种群出现形态差异, 且沅江清水江种群差别明显, 这可能与不同环境下种群的时间、空间隔离程度有关^[5, 22], 清水江种群位于沅江水系支流上游, 地理隔离距离远, 受水利工程的影响, 河流水文特征以静水或缓流为主, 加上隔离时间的叠加影响, 导致形态差异显著。

《广西淡水鱼类志》^[27]将广西及邻近水系的淡水鱼类种类通过最大简约法构建了支序图, 结果发现沅江等长江南部 4 条支流合为一支后与西江等 15 条珠江支流合为姐妹群。本研究选择了两个水系的大眼华鲮进行比较, 得出了相似结论: (1) 5 个种群分为三支, 西江两个种群为一支, 沅江干流和锦江种群为一支, 沅江清水江种群单独为一支; (2) 5 个种群的形态差异主要集中在头部和尾柄部。

参考文献:

- [1] Fullerton A H, Burnett K M, Steel E A, et al. Hydrological connectivity for riverine fish: Measurement challenges and research opportunities[J]. *Freshwater Biology*, 2010, 55(11): 2215-2237.
- [2] Arthington A H, Dulvy N K, Gladstone W, et al. Fish conservation in freshwater and marine realms: Status, threats and management[J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2016, 26(5): 838-857.
- [3] Pan Y Z, Liu H P, Zhu T B. Morphological variations between two wild groups of *Glyptosternum maculatum* in Tibet[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2019, 26(5): 823-833. [潘瑛子, 刘海平, 朱挺兵. 西藏黑斑原鲃两个野生群体的形态差异[J]. *中国水产科学*, 2019, 26(5): 823-833.]
- [4] Shu H, Jiang X L, Yang H Q, et al. Analysis of morphological variations among seven wild populations of *Mastacembelus armatus* in South China area[J]. *Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition)*, 2017, 16(3): 8-14. [舒琥, 江小璐, 杨华强, 等. 华南地区 7 个大刺鲃野生群体的形态差异分析[J]. *广州大学学报(自然科学版)*, 2017, 16(3): 8-14.]
- [5] Senay C, Boisclair D, Peres-Neto P R. Habitat-based polymorphism is common in stream fishes[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2015, 84(1): 219-227.
- [6] Chen Y Y. Fauna Sinica-Osteichthyes-Cypriniformes II[M]. Beijing: Science Press, 1998: 142-148. [陈宜瑜. 中国动物志-硬骨鱼纲-鲤形目(中卷)[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 142-148.]
- [7] Kottelat M. Fishes of Laos[M]. Colombo: Wildlife Heritage Trust Publications, 2001: 196.
- [8] Xie Z G, Xie C X, Zhang E. Morphological variations among the Chinese species of *Sinibrama* (Pisces: Teleostei: Cyprinidae), with comments on their species validities[J]. *Zoological Research*, 2003, 24(5): 321-330. [谢仲桂, 谢从新, 张鄂. 我国华鲮属鱼类形态差异及其物种有效性的研究[J]. *动物学研究*, 2003, 24(5): 321-330.]
- [9] Luo W. The phylogenetic relationships and hybridization introgression of Chinese bream fishes in Cultrinae (Teleostei: Cypriniformes: Cyprinidae)[D]. Chongqing: Southwest University, 2016. [罗雯. 鲮属鱼类(鲤形目; 鲤科; 鲮亚科)系统发育关系及其杂交渐渗研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016.]
- [10] Zhang E, Xie Z G, Xie C X. Morphological variation between *Sinibrama macrops* and *S. wui*, with notes on their validities[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2004, 28(5): 511-518. [张鄂, 谢仲桂, 谢从新. 大眼华鲮和伍氏华鲮的形态差异及其物种有效性[J]. *水生生物学报*, 2004, 28(5): 511-518.]
- [11] Zhao L J, He G X, Zhou X Y, et al. Morphology and D-loop sequence analysis of *Sinibrama macrops* from Qiandaohu Lake[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2013, 37(3): 351-358. [赵良杰, 何光喜, 周小玉, 等. 千岛湖大眼华鲮形态度量学和 D-loop 序列分析[J]. *水产学报*, 2013, 37(3): 351-358.]
- [12] Zeng Z X, Huang S M. The Five Ridges[M]. Guangzhou: Guangdong People's Publishing House, 1977. [曾昭璇, 黄少敏. 五岭[M]. 广州: 广东人民出版社, 1977.]
- [13] Fu J J. Geography of Hunan Province[M]. Changsha: Hunan Education Publishing House, 2008. [傅角今. 湖南地理志[M]. 长沙: 湖南教育出版社, 2008.]
- [14] Li S F, Cai W Q, Zhou B Y. Morphological and biochemical genetic variations among populations of blunt snout bream (*Megalobrama amblycephala*)[J]. *Journal of fisheries of China*, 1991, 15(3): 204-211. [李思发, 蔡完其, 周碧云. 团头鲂种群间的形态差异和生化遗传差异[J]. *水产学报*, 1991, 15(3): 204-211.]
- [15] Härdle W K, Simar L. Applied Multivariate Statistical Analysis[M]. Third edition. Heidelberg: Springer, 2012: 269-347.
- [16] Liu M, Li X Y, Feng C. Statistical Analysis and Comprehensive Case Explanation of SPSS 19.0[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014. [刘猛, 李小园, 封超. SPSS 19.0 统计分析综合案例详解[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.]
- [17] Xie Z G. Studies on morphological variations and interspecific phylogenetic relationship of the genus *Sinibrama* and molecular evolution of it and associated Cultrinae genera[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2003. [谢仲桂. 华鲮属鱼类形态变异和种间系统发育关系及其与鲮亚科相关类群分子进化的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2003.]
- [18] Wang Y N, Li S Z, Liu C L. Multivariate analysis on the morphological among three species of *Leuciscus* in Xinjiang[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2019, 26(4): 636-645. [王业宁, 李胜忠, 刘长龙. 新疆 3 种雅罗鱼的多元形态[J]. *中国水产科学*, 2019, 26(4): 636-645.]
- [19] Cheng F, Zhao S B, Schmidt B V, et al. Morphological but

- no genetic differentiation among fragmented populations of *Hemiculter leucisculus* (Actinopterygii, Cyprinidae) from a lake complex in the middle Yangtze, China[J]. *Hydrobiologia*, 2018, 809(1): 185-200.
- [20] West-Eberhard M J. Phenotypic plasticity and the origins of diversity[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1989, 20(1): 249-278.
- [21] Haddaway N R, Mortimer R J G, Christmas M, et al. Morphological diversity and phenotypic plasticity in the threatened British white-clawed crayfish (*Austropotamobius palipes*)[J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2012, 22(2): 220-231.
- [22] Helland I P, Vøllestad L A, Freyhof J, et al. Morphological differences between two ecologically similar sympatric fishes[J]. *Journal of Fish Biology*, 2009, 75(10): 2756-2767.
- [23] Haas T C, Blum M J, Heins D C. Morphological responses of a stream fish to water impoundment[J]. *Biology Letters*, 2010, 6(6): 803-806.
- [24] Franssen N R, Stewart L K, Schaefer J F. Morphological divergence and flow-induced phenotypic plasticity in a native fish from anthropogenically altered stream habitats[J]. *Ecology and Evolution*, 2013, 3(14): 4648-4657.
- [25] Hu J Y, Yang L P, Zheng W J, et al. Morphological differentiation of *Pseudorasbora parva* among different geographical populations from Lixianjiang[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2018, 27(4): 603-610. [胡俊仪, 杨丽萍, 郑文佳, 等. 云南红河水系李仙江麦穗鱼不同地理居群的形态分化[J]. *上海海洋大学学报*, 2018, 27(4): 603-610.]
- [26] Yang H R, Ouyang P H, Li G F, et al. Morphological differentiation among three wild populations of *Siniperca kneri* in Pearl River[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2016, 23(2): 447-457. [杨慧荣, 欧阳徘徊, 李桂峰, 等. 珠江流域 3 个野生大眼鲈群体的形态差异[J]. *中国水产科学*, 2016, 23(2): 447-457.]
- [27] Fisheries Research Institute of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences. *Freshwater Fisheries of Guangxi, China*[M]. 2nd Edition. Nanning: Guangxi People's Publishing House, 2006. [广西壮族自治区水产研究所, 中国科学院动物研究所. 广西淡水鱼类志[M]. 第 2 版. 南宁: 广西人民出版社, 2006.]

Morphological variations of *Sinibrama macrops* between the Yuanjiang River and Xijiang River basin

LI Zhongli¹, BA Jiawen¹, ZHAO Haitao², MEI Jie¹, LIU Yang¹

1. College of Agroforestry Engineering and Planning, Tongren University; Tongren University Engineering Center of Aquaculture of Guizhou University Engineering Center, Guizhou Key Laboratory of Biodiversity Conservation and Utilization in the Fanjing Mountain Region, Tongren 554300, China;
2. College of Ecological Engineering, Guizhou University of Engineering Science, Bijie 551700, China

Abstract: *Sinibrama macrops* is widely distributed in the southwest of the Yangtze River in China. To determine the morphological variations and distribution of five populations in the Yuanjiang River and Xijiang River basin, 147 samples were collected from main streams and tributaries and nine traditional morphological parameters and 21 truss network features were analyzed by three multivariate analysis methods. There were significant differences in the body area of each part of the lateral surface among the five populations, according to Friedman non-parametric tests. Cluster analysis divided the five populations into three groups: one in the main stream and tributary of the Xijiang River, one in the main stream of the Yuanjiang River and the Jinjiang River tributary, and the other in the Qingshuijiang River. Six principal components were extracted by principal component analysis, and the cumulative contribution to the total variance was 81.93%. The characters of higher contribution rate were concentrated in the caudal peduncle, the head, and the anterior part of trunk. Discriminant analysis screened 10 characters of the head and caudal peduncle and established discriminant functions for the five populations, with a range of individual discrimination accuracy between 92% and 100%. Our results suggest that there are significant morphological differences among *S. macrops* in the five populations of the Yuanjiang River and the Xijiang River basin, which provide basic data for population identification and resource evaluation for the species.

Key words: *Sinibrama macrops*; Yuanjiang River; Xijiang River; Yangtze River; morphological variations; multivariate analysis

Corresponding author: LI Zhongli. E-mail: lzl1982505@163.com