

陈鸿禄, 易少奎, 李军涛, 等. 我国七大流域大鳞副泥鳅形态学比较分析[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(3): 230-237.

DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.03.026

我国七大流域大鳞副泥鳅形态学比较分析

陈鸿禄¹, 易少奎², 李军涛³, 王卫民¹

1. 华中农业大学水产学院/农业动物遗传育种与繁育教育部重点实验室/

农业农村部淡水生物繁育重点实验室, 武汉 430070;

2. 湖州师范学院生命科学学院, 湖州 313000; 3. 中国热带农业科学院热带生物技术研究所, 海口 571101

摘要 基于线性回归分析、单因素方差分析、判别分析、主成分分析与聚类分析等方法对珠江水系、长江水系、淮河水系、辽河水系、海河水系、松花江水系 19 个自然群体共 646 个个体的外部可量性状进行形态学比较。线性回归分析结果显示, 大鳞副泥鳅前驱长(D_{AC})/体长(L_B)与纬度呈负相关($r = -0.782$), 尾柄长(L_{CP})/体长(L_B)与纬度呈正相关($r = 0.834$)。单因素方差分析结果显示, 松花江流域和辽河流域的形态学无显著差异, 同时松辽流域与其他流域在全长(L_B)、尾柄长(L_{CP})以及前驱长(D_{AC})表现出显著性差异。判别分析结果显示, 松辽流域和南方水系的判别准确率为 100%, 两者之间没有错判。主成分分析结果显示, 主成分 1 贡献率为 38.1%, 3 个主成分可以解释大鳞副泥鳅不同地理群体形态差异的 62.9%, 这 3 个主成分主要反映在体高(H_B)、体宽(W_B)、尾柄高(H_{CP})、尾柄宽(L_{CP})。聚类分析结果显示, 我国七大流域大鳞副泥鳅大致分为南北两大支。南方水系和北方水系大鳞副泥鳅在外部形态上存在一定程度差异, 根据 75% 识别和划分规则, 认为松辽流域和南方水系部分群体的大鳞副泥鳅形态学差异可能达到亚种水平。

关键词 大鳞副泥鳅; 地理群体; 形态差异; 种质资源; 种群结构; 比较分析; 聚类分析; 亲缘地理学

中图分类号 Q 959.46⁺8 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)03-0230-08

形态学研究是分类学的最原始和最基础的方法, 从形态学的水平对遗传变异与适应性进化进行检测和研究也是最直接和最快速的^[1]。水产动物环境适应性最直接的外在表现是形态表型差异, 不同地理分布的群体, 会随着环境出现适应性进化^[2]。

大鳞副泥鳅(*Paramisgurnus dabryanus*), 隶属于鲤形目(Cypriniformes)、鳅科(Cobitinae)、花鳅亚科(Cobitinae)、副泥鳅属(*Paramisgurnus*), 除青藏高原地区外, 在我国的各大水域均有自然分布^[3], 因而是研究种间遗传变异与适应性进化的理想材料^[4]。之前也有关于大鳞副泥鳅在各流域分布的报道^[5], 但只是调查了大鳞副泥鳅在某一个或两个流域的资源分布情况, 对我国整个水域(七大流域: 长江流域、海河流域、淮河流域、珠江流域、海河流域、辽河流域、松花江流域)大鳞副泥鳅缺乏系统的分析。近年来, 研究者开始调查不同地理群体大

鳞副泥鳅的种内群体形态差异情况^[6-7]。也有学者根据线粒体 DNA 的 Cytb 基因序列、D-Loop 序列、线粒体全基因组以及微卫星^[8-11]对其群体进行遗传变异分析。尽管目前分子标记提供了较为丰富的群体遗传学数据, 但是群体间形态学差异仍没有得到很好的结果, 同时国内对于大鳞副泥鳅的研究只局限于流域水平, 因此, 对全国各流域的大鳞副泥鳅种内形态变异特点及划分规律具有重大意义。本研究比较大鳞副泥鳅不同地理群体间的形态差异, 旨在为大鳞副泥鳅种群的遗传学研究提供一些基础材料, 同时也为大鳞副泥鳅种质资源的保护及开发利用补充部分材料。

1 材料与方法

1.1 材料

本研究所用样品于 2013—2016 年的 5 月至 9 月份采集, 为确保所采集的样品为大鳞副泥鳅自然

收稿日期: 2020-12-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(31372180)

陈鸿禄, E-mail: 3031128041@qq.com

通信作者: 王卫民, E-mail: wangwm@mail.hzau.edu.cn

群体,一是采集大鳞副泥鳅样品所选取的地点避开大鳞副泥鳅的人工养殖区。二是大鳞副泥鳅样本由研究人员使用地笼捕获,或直接雇用当地农民捕捞。

本研究在我国七大水系的各个水体及附属水体共选取了 19 个采样点(表 1),采样进行鱼类形态学的观察、测量并记录。

表 1 大鳞副泥鳅形态采样信息表

Table 1 Sample details for *P. dabryanus* in China

群体 Population	地理坐标 Location	样本数量/尾 Sample	体长/mm Body length	体质量/g Body weight
钟祥 Zhongxiang	112°59E 31°18N	33	110.09 ± 26.68	12.78 ± 7.29
嘉鱼 Jiayu	113°94E 29°98N	45	135.54 ± 16.05	22.23 ± 8.41
从化 Conghua	113°59E 23°55N	30	100.94 ± 10.01	7.70 ± 2.30
梅州 Meizhou	116°13E 24°31N	32	101.33 ± 8.19	8.37 ± 1.71
颍上 Yingshang	116°26E 32°66N	30	126.35 ± 19.18	21.20 ± 9.79
高邮 Gaoyou	119°47E 32°79N	35	116.62 ± 13.22	13.18 ± 4.20
承德 Chengde	117°97E 40°96N	36	126.52 ± 10.83	14.67 ± 3.48
宁河 Ninghe	117°83E 39°34N	28	105.52 ± 17.37	8.28 ± 3.68
聊城 Liaocheng	115°98E 36°46N	30	108.82 ± 12.02	10.82 ± 3.34
开封 Kaifeng	114°31E 34°81N	35	144.83 ± 16.07	24.93 ± 8.80
洪洞 Hongdong	111°69E 36°27N	35	144.45 ± 17.13	13.59 ± 4.66
利津 Lijin	118°26E 37°50N	29	107.06 ± 10.51	9.15 ± 2.66
盘锦 Panjin	122°08E 41°12N	35	106.64 ± 9.19	8.66 ± 2.26
本溪 Benxi	123°71E 41°50N	35	123.49 ± 8.62	11.40 ± 2.31
彰武 Zhangwu	122°54E 42°40N	35	124.85 ± 9.68	13.10 ± 2.96
吉林 Jilin	126°61E 43°88N	35	138.92 ± 14.82	16.37 ± 5.28
依兰 Yilan	129°56E 46°35N	35	111.21 ± 10.84	9.18 ± 2.83
齐齐哈尔 Qiqihaer	123°92E 47°38N	35	125.43 ± 20.21	13.07 ± 6.45
松原 Songyuan	124°86E 45°16N	38	117.16 ± 6.35	10.79 ± 1.55

1.2 方 法

形态学的测量参考周小云^[12]方法。选择健康有活力的个体,观察体型、体色,舍弃腹部膨大的个体,然后使用氨甲酸乙酯(100 mg/L)麻醉,用电子游标卡尺(精确度为 0.01 cm)测量外部可量性状,包括吻长(L_S)、体长(L_B)、尾柄高(H_{CP})、头长(L_H)、体高(H_B)、全长(L_T)、前躯长(D_{PR})、眼间距(W_L)、尾柄长(L_{CP})、体宽(W_B)和腹鳍臀鳍间距(D_{AC})。本研究以秦岭淮河为分界线,将我国七大流域分为南北水系,其中南方水系包括长江流域、珠江流域和淮河流域,北方水系包括黄河流域、海河流域、辽河流域和松花江流域。

1.3 数据分析

本研究中数据结果均使用平均值±标准差(Mean±SD)表示。为消除年龄的影响,测量的形态性状均利用尾柄长、体长与头长进行标准化,同时眼间距,尾柄高与吻长分别使用头长与尾柄长对其

进行标准化处理。数据的统计分析使用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 19.0 完成,制图使用 Photoshop 和 OriginPro 2019。前躯长/体长、尾柄长/体长与纬度的相关分析采用 Pearson 相关分析,双侧检验。Pearson 相关系数: $r = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \sum (Y - \bar{Y})^2}}$ 。采用 SPSS 19.0 进行单因素方差分析和多重比较(P>0.05 时,用 LSD 法;P<0.05 时,用 Dunnett 法),然后参照 Mayr 等^[13]计算变异系数(coefficient of variation, CV),其公式为:CV=(M1-M2)/(S1+S2)。用 SPSS 19.0 软件对 10 组形态性状比例参数采用逐步判别的方法进行判别分析。使用 OriginPro 2019 软件对 10 组形态性状比例参数进行主成分分析,得到 2 个主成分的贡献率和负荷值,同时绘制主成分散点图。用 SPSS 19.0 软件采用欧式距离的方法对 10 组形态性状比例参数的平均值进行聚类分析。

2 结果与分析

2.1 前驱长/体长、尾柄长/体长与纬度的线性回归分析

大鳞副泥鳅前驱长/体长与纬度呈强负相关($r = -0.782$),尾柄长/体长与纬度呈极强正相关($r = 0.834$)。其结果显示,大鳞副泥鳅前驱长/体长随着纬度上升而下降,而尾柄长/体长则随着纬度的上升而上升(表2)。

2.2 单因素方差分析

对我国七大流域的19个大鳞副泥鳅采集点样本的10项形态特征进行单因素方差分析。辽河流

域和松花江流域的大鳞副泥鳅除体宽有差异之外,其他形态特征均不显著;长江流域、珠江流域、淮河流域、黄河流域和海河流域相互之间的体宽以及眼间距均存在显著差异;若将流域以南北水系进行划分,南方大鳞副泥鳅和北方大鳞副泥鳅群体在尾柄长、尾柄高、前驱长、体高、体宽、眼间距以及腹鳍臀鳍间距均有显著性差异。对不同流域大鳞副泥鳅群体的形态特征进行差异分析,差异系数比较结果:不同流域大鳞副泥鳅群体的全长、体高、吻长、前驱长、体高、体宽、腹鳍臀鳍间距的最大差异系数均小于1.28;尾柄长、尾柄高和眼间距的差异系数大于1.28,主要表现在南方水系和北方水系之间(表3)。

表2 大鳞副泥鳅群体前驱长/体长、尾柄长/体长与纬度关系表

Table 2 Latitude and $D_{AC}/L_B, L_{CP}/L_B$ of *P. dabryanus* in China

群体 Population	纬度 Latitude	前驱长/体长 D_{AC}/L_B	尾柄长/体长 L_{CP}/L_B
从化 Conghua	23°55'N	0.16 ± 0.02	0.17 ± 0.01
梅州 Meizhou	24°31'N	0.19 ± 0.02	0.16 ± 0.01
嘉鱼 Jiayu	29°98'N	0.17 ± 0.01	0.15 ± 0.01
钟祥 Zhongxiang	31°18'N	0.17 ± 0.01	0.15 ± 0.01
颍上 Yingshang	32°66'N	0.18 ± 0.02	0.16 ± 0.01
高邮 Gaoyou	32°79'N	0.18 ± 0.01	0.16 ± 0.02
开封 Kaifeng	34°81'N	0.15 ± 0.02	0.16 ± 0.01
洪洞 Hongdong	36°27'N	0.15 ± 0.01	0.18 ± 0.01
聊城 Liaocheng	36°46'N	0.17 ± 0.10	0.18 ± 0.02
利津 Lijin	37°50'N	0.15 ± 0.01	0.17 ± 0.01
宁河 Ninghe	39°34'N	0.14 ± 0.01	0.18 ± 0.01
承德 Chengde	40°96'N	0.14 ± 0.01	0.20 ± 0.01
盘锦 Panjin	41°12'N	0.14 ± 0.01	0.20 ± 0.01
本溪 Benxi	41°50'N	0.14 ± 0.01	0.20 ± 0.01
彰武 Zhangwu	42°40'N	0.15 ± 0.01	0.20 ± 0.01
吉林 Jilin	43°88'N	0.14 ± 0.01	0.20 ± 0.01
依兰 Yilan	46°35'N	0.14 ± 0.01	0.20 ± 0.01
齐齐哈尔 Qiqihaer	47°38'N	0.14 ± 0.01	0.20 ± 0.01
松原 Songyuan	45°16'N	0.14 ± 0.01	0.20 ± 0.01

表3 大鳞副泥鳅群体单因素方差分析结果及最大变异系数

Table 3 One-way ANOVA results among *P. dabryanus* population and maximum coefficient of variance

项目 Item	长江流域 Yangtze River	珠江流域 Pearl River	淮河流域 Huaihe River	黄河流域 Yellow River	海河流域 Haihe River	辽河流域 Liaohe River	松花江流域 Songhua River	CV
L_T/L_B	1.15 ± 0.03bc	1.16 ± 0.03d	1.16 ± 0.03cd	1.15 ± 0.02bc	1.15 ± 0.02b	1.13 ± 0.02a	1.13 ± 0.02a	0.675
L_H/L_B	0.16 ± 0.01abc	0.16 ± 0.01b	0.16 ± 0.01a	0.15 ± 0.01c	0.16 ± 0.06ab	0.15 ± 0.01abc	0.15 ± 0.01abc	0.730
L_S/L_H	0.39 ± 0.03ab	0.40 ± 0.04b	0.38 ± 0.03ab	0.40 ± 0.05ab	0.39 ± 0.05b	0.39 ± 0.03a	0.39 ± 0.03a	0.285
L_{CP}/L_B	0.15 ± 0.01e	0.17 ± 0.02d	0.16 ± 0.01e	0.17 ± 0.01c	0.19 ± 0.02b	0.20 ± 0.01a	0.20 ± 0.01a	1.951
H_{CP}/L_{CP}	0.85 ± 0.12a	0.74 ± 0.11c	0.83 ± 0.10b	0.67 ± 0.09c	0.60 ± 0.08b	0.53 ± 0.06a	0.53 ± 0.06a	1.898
D_{PR}/L_B	0.56 ± 0.02e	0.58 ± 0.04c	0.58 ± 0.03d	0.55 ± 0.03b	0.55 ± 0.02b	0.54 ± 0.02a	0.53 ± 0.04a	0.974
H_B/L_B	0.14 ± 0.01cd	0.14 ± 0.01d	0.15 ± 0.01e	0.14 ± 0.01b	0.13 ± 0.01ab	0.12 ± 0.01a	0.13 ± 0.01a	1.258
W_B/L_B	0.09 ± 0.01f	0.09 ± 0.01b	0.09 ± 0.02a	0.08 ± 0.01e	0.08 ± 0.01cd	0.07 ± 0.01de	0.07 ± 0.01c	1.220
W_L/L_H	0.31 ± 0.06f	0.15 ± 0.01d	0.13 ± 0.02e	0.26 ± 0.04c	0.24 ± 0.04b	0.25 ± 0.03ab	0.23 ± 0.02a	5.968
D_{AC}/L_B	0.17 ± 0.01c	0.17 ± 0.03c	0.17 ± 0.01c	0.15 ± 0.01ab	0.15 ± 0.06b	0.14 ± 0.01ab	0.14 ± 0.01a	1.377

注:不同字母表示差异显著,相同表示差异不显著($P < 0.05$)。Note: The scripts indicate difference among populations different scripts indicate significant difference and other situations indicated non-significant difference($P < 0.05$).

2.3 判别分析

对 10 项比例参数进行判别分析,得到 7 个流域大鳞副泥鳅的费歇尔判别函数。

代入判别函数进行判别,预测分析结果见表 4,其中海河流域和辽河流域的大鳞副泥鳅判别准确率为低于 50%;将流域以南北方水系进行划分,松花江

流域和辽河流域与南方水系各水域大鳞副泥鳅群体的判别准确率为 100%,表明松花江流域和辽河流域与南方水域大鳞副泥鳅群体差异显著;同时,南方水系和北方水系的判别率均大于 90%;通过判别函数对全国七大流域大鳞副泥鳅的综合判别率为 65.9%。

长江流域: $Y = -2015.478 + 2453.538L_T/L_B + 254.227L_H/L_B + 2488.774L_{CP}/L_B + 345.699H_{CP}/L_{CP} + 694.901D_{PR}/L_B + 261.898W_L/L_H + 1640.100W_B/L_B + 202.881L_S/L_H - 1483.621H_B/L_B$

珠江流域: $Y = -2015.206 + 2479.015L_T/L_B + 209.659L_H/L_B + 2499.845L_{CP}/L_B + 323.578H_{CP}/L_{CP} + 713.319D_{PR}/L_B + 122.028W_L/L_H + 1521.919W_B/L_B + 200.010L_S/L_H - 1296.674H_B/L_B$

淮河流域: $Y = -2006.154 + 2472.211L_T/L_B + 182.305L_H/L_B + 2496.173L_{CP}/L_B + 333.758H_{CP}/L_{CP} + 714.931D_{PR}/L_B + 100.048W_L/L_H + 1505.311W_B/L_B + 178.730L_S/L_H - 1243.829H_B/L_B$

黄河流域: $Y = -1975.034 + 2446.421L_T/L_B + 243.013L_H/L_B + 2475.907L_{CP}/L_B + 316.938H_{CP}/L_{CP} + 687.470D_{PR}/L_B + 219.091W_L/L_H + 1499.637W_B/L_B + 210.381L_S/L_H - 1346.577H_B/L_B$

海河流域: $Y = -1972.251 + 2442.333L_T/L_B + 249.978L_H/L_B + 249.978L_{CP}/L_B + 313.963H_{CP}/L_{CP} + 686.139D_{PR}/L_B + 202.578W_L/L_H + 1453.029W_B/L_B + 200.841L_S/L_H - 1321.218H_B/L_B$

辽河流域: $Y = -1941.886 + 2415.293L_T/L_B + 235.749L_H/L_B + 2590.695L_{CP}/L_B + 313.432H_{CP}/L_{CP} + 681.997D_{PR}/L_B + 210.370W_L/L_H + 1455.352W_B/L_B + 202.035L_S/L_H - 1374.705H_B/L_B$

松花江流域: $Y = -1936.624 + 2417.562L_T/L_B + 228.267L_H/L_B + 2593.277L_{CP}/L_B + 313.309H_{CP}/L_{CP} + 678.614D_{PR}/L_B + 190.050W_L/L_H + 1390.216W_B/L_B + 203.691L_S/L_H - 1322.986H_B/L_B$

表 4 大鳞副泥鳅群体判别分析结果

Table 4 Discriminant results of *P. dabryanus* populations

群体 Population	数量 Number	正确率/% Accuracy	预测分类 Predicated species membership						
			长江流域 Yangtze River	珠江流域 Pearl River	淮河流域 Huaihe River	黄河流域 Yellow River	海河流域 Haihe River	辽河流域 Liaohe River	松花江流域 Songhua River
长江流域 Yangtze River	78	85.9	67	2	0	8	1	0	0
珠江流域 Pearl River	62	75.8	0	47	12	2	1	0	0
淮河流域 Huaihe River	65	83.1	0	11	54	0	0	0	0
黄河流域 Yellow River	99	69.7	13	0	0	69	4	9	4
海河流域 Haihe River	94	24.5	2	2	0	25	23	18	24
辽河流域 Liaohe River	105	48.6	0	0	0	6	9	51	39
松花江流域 Songhua River	143	80.4	0	0	0	2	1	25	115

2.4 主成分分析

对大鳞副泥鳅 10 组形态性状比例参数进行主成分分析,结果显示,前 3 个主成分的累计贡献率达到 62.9%,其第一主成分贡献率为 38.1%,其他 2 个主成分的贡献率分别为 13.8%、11.0%。第一主成分主要反映在尾柄高、尾柄长、体高和体宽等指标;

第二主成分主要反映在体高和吻长等指标;第三主成分主要反映在全长、吻长和眼间距等指标。根据 3 个主成分绘制散点图(图 1),我国七大流域明显分为两大支,一支为南方水系,另一支为北方水系,两大支间存在部分个体交叉现象,其中辽河流域和松花江流域形成一个相对集中的组,和南方水系

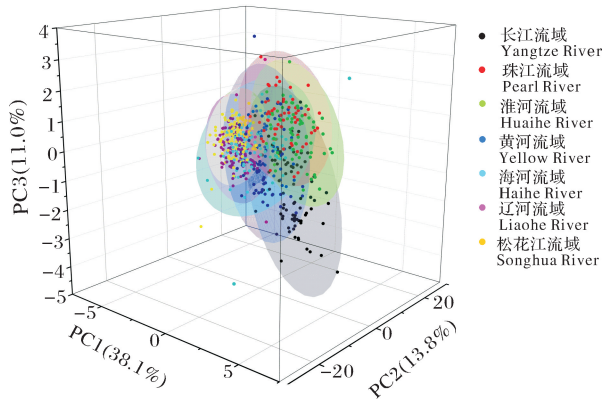


图 1 大鳞副泥鳅主成分散点图

Fig.1 Scatter plots of *P. dabryanus* populations

没有交叉现象;海河流域和黄河流域与南方水系存在个体交叉混合。

2.5 聚类分析

对七大流域 19 个大鳞副泥鳅采集点所有样本校正值的平均值进行聚类,聚类结果和主成分分析的结果相似。其结果显示七大流域大鳞副泥鳅大致聚为两大类,南方水系大鳞副泥鳅除从化群体之外聚为一类,而北方水系聚为一类;对于北方水系大鳞

副泥鳅,大致聚为两大类,辽河流域、松花江流域和海河流域的大鳞副泥鳅聚为一支,黄河流域的聊城群体和开封群体为一支;南方水系大鳞副泥鳅中,位于珠江流域的梅州群体与淮河流域大鳞副泥鳅先聚为一类,再与长江流域大鳞副泥鳅聚为一类。

表 5 大鳞副泥鳅群体主成分分析结果

Table 5 Results of principal component analysis of *P. dabryanus* populations

项目 Item	主成分 Principal component		
	1	2	3
L_T/L_B	0.232 52	-0.043 10	0.408 41
L_H/L_B	0.111 59	-0.662 52	-0.050 93
L_S/L_H	-0.005 96	0.610 91	0.459 59
L_{CP}/L_B	-0.428 84	-0.119 35	0.112 61
H_{CP}/L_{CP}	0.469 74	0.086 27	-0.146 43
D_{PR}/L_B	0.284 89	0.002 13	0.268 02
H_B/L_B	0.426 35	0.012 23	-0.071 62
W_B/L_B	0.413 37	0.071 66	-0.303 09
W_L/L_H	-0.107 18	0.398 63	-0.628 22
D_{AC}/L_B	0.289 12	0.010 95	0.147 57
累积贡献率/% Cumulative contribution ratio	38.1	13.8	11.0

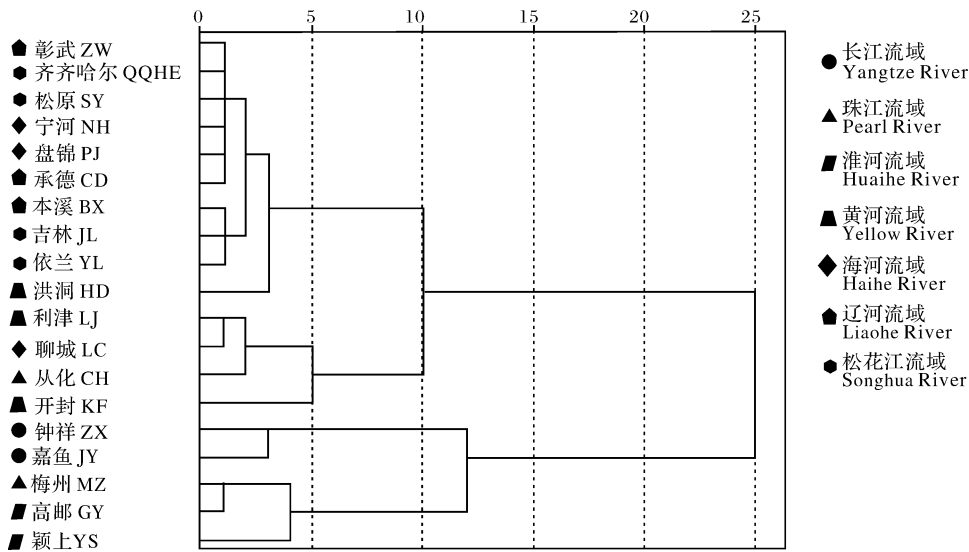


图 2 大鳞副泥鳅群体聚类关系树

Fig.2 Dendrogram showing the relationship of *P. dabryanus* populations

3 讨论

形态学比较分析是研究物种遗传结构的有效方法之一,它能够提供与物种的生态和功能角色有关的信息^[14]。本研究利用多种统计方法对我国七大流域大鳞副泥鳅进行形态学研究。单因素方差分

析、判别分析、主成分分析和聚类分析结果均表明松花江流域和辽河流域的大鳞副泥鳅形态差异较小,且松辽流域和其他流域之间的大鳞副泥鳅形态差异较大。松辽流域位于我国的东北部,由南向北跨越了暖温带-中温带-寒温带 3 个不同的自然温度地带,据统计,该流域 1980—2014 年的气温平均值为

5.11 °C^[15]。温度作为鱼类生长发育的重要影响因素,会直接影响鱼类整个形态特征^[16]。Yi等^[17]对我国泥鳅属3种鱼类进行转录组序列分析,发现生活在我国北方地区的北方泥鳅和黑龙江泥鳅其机体抵抗冬季极限温度有关的许多跨膜蛋白基因呈现快速进化与正向选择。据此推测,松辽流域大鳞副泥鳅在低温环境下,可能出现了环境适应性变化。在本研究中,松辽流域与其他流域的大鳞副泥鳅在全长、尾柄长以及前驱长表现出显著性差异,相较其他流域,松辽流域大鳞副泥鳅其体型尾部较长,头部较短。李雅娟等^[18]通过对泥鳅属鱼类的形态差异比较分析,其研究结果表明泥鳅属鱼类的形态差异表现最为明显的部位是头部和尾部。本研究发现,大鳞副泥鳅不同地理群体间的形态差异主要集中在头部和尾部,和其结论是一致的,因此推测头部和尾部是花鳅亚科物种进化过程中变化较为迅速的表型。

鱼类在特定的栖息环境条件,最直接的适应性进化就是形态变异^[19]。从线性回归分析结果可以得知,大鳞副泥鳅的体型随着纬度的上升而更细长,这可能与群体对环境的长期适应性、自身有限的迁移能力和地理隔离等因素有关。从单因素方差分析结果得知,我国南北水系的大鳞副泥鳅形态上存在较大差异,从体型上看,南方水系的大鳞副泥鳅较为粗短,而北方水系的大鳞副泥鳅较为细长。据此推测,大鳞副泥鳅可能由于南北地理隔离,出现栖息环境适应性进化。从判别分析结果得知,海河流域和辽河流域的大鳞副泥鳅判别准确率偏低。辽河流域大鳞副泥鳅个体错判的主要集中在松花江流域,其结果表明松花江流域和辽河流域的大鳞副泥鳅形态差异不明显;海河流域大鳞副泥鳅的判别准确率仅为24.9%,推测其可能原因有3个:一是海河流域与松辽流域及黄河流域地理位置较近,大鳞副泥鳅存在着丰富的基因交流。二是南水北调工程以及京杭大运河,为大鳞副泥鳅从南方水系向海河流域地迁移提供了渠道^[20]。三是洪水促进了黄河流域和海河流域之间大鳞副泥鳅的基因流动^[21]。松辽流域和南方水系大鳞副泥鳅之间的判别准确率为100%,其可能原因一是松辽流域位于我国东北部,和南方距离较远,流域之间存在一定程度的地理隔离;二是大鳞副泥鳅迁徙能力较弱。对七大流域大鳞副泥鳅进行判别分析,综合判别率为65.9%。其综合判别准确率较低,推测其有以下两个原因:一是本研究中的形态判别为种内判别;二是大鳞副泥鳅

作为我国重要的淡水养殖鱼类,水产养殖运输频繁,使其在不同流域扩散。从主成分分析结果可以得知,七大流域大鳞副泥鳅的差异主要集中在尾部,体型肥瘦程度以及头部等方面。聚类分析结果中,七大流域的大鳞副泥鳅大致分为两大支,南方水系除从化群体之外为一支,北方水系为一支。聚类分析结果和主成分分析结果大体上是一致的,表明不同地理群体的大鳞副泥鳅在形态上既相似,同时又有一定程度的差异^[22]。此研究结果和之前学者对我国甘肃省裂腹鱼的地理种群分化研究结果类似^[23]。不同地理条件下的鱼类会产生与其栖息环境相适应的形态变异^[24],如嘉陵江中游饵料资源丰富,中游的蛇鮈群体通过增加头长等方式来提高摄食频率^[25]。推测其造成大鳞副泥鳅南北分化的原因可能有两个:一是南北方在气候、气温、降水量等自然因素存在差异^[26];二是大鳞副泥鳅迁徙能力较弱。

综上所述,基于外部形态性状对我国七大流域大鳞副泥鳅进行区分具有一定的局限性,在今后的研究中,仍需结合更敏感的基因标记(如线粒体基因标记、核基因标记)对我国七大流域的大鳞副泥鳅的种群结构做进一步研究。

参考文献 References

- [1] CADRIN S X. Advances in morphometric identification of fishery stocks[J]. Reviews in fish biology and fisheries, 2000, 10(1):91-112.
- [2] KEAST A, WEBB D. Mouth and body form relative to feeding ecology in the fish fauna of a small lake, lake Opinicon Ontario [J]. Journal of the fisheries research board of Canada, 1966, 23(12):1845-1874.
- [3] 印杰,熊传喜,李圣华,等.四倍体和二倍体泥鳅及大鳞副泥鳅营养成分分析[J].水生生态学杂志, 2008, 29(6):67-70. YIN J, XIONG C X, LI S H, et al. Analysis of nutritional composition in tetraploid loach, diploid loach and *Paramisgurnus dabryanus* [J]. Journal of hydroecology, 2008, 29(6):67-70 (in Chinese with English abstract).
- [4] 易少奎.我国泥鳅属鱼类系统发育、群体结构及其适应性进化研究[D].武汉:华中农业大学, 2017. YI S K. The phylogeny-population structure and adaptive evolution of *Misgurnus* species in China [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [5] 仲嘉,易少奎,于永耀,等.长江流域泥鳅与大鳞副泥鳅种质资源调查与研究[J].水产学报, 2015, 39(8):1089-1098. ZHONG J, YI S K, YU Y Y, et al. Investigation of *Misgurnus anguilli-*

- caudatus* and *Paramisgurnus dabryanus* in the Yangtze River basin[J]. Journal of fisheries of China, 2015, 39(8): 1089-1098 (in Chinese with English abstract).
- [6] 马来艳, 仲嘉, 王卫民. 泥鳅和大鳞副泥鳅杂交子代与其亲本形态特征比较[J]. 华中农业大学学报, 2019, 38(5): 35-42. MA L Y, ZHONG J, WANG W M. Comparison of morphological characteristics between *Paramisgurnus dabryanus* × *Misgurnus anguillicaudatus* hybrids and their parents[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(5): 35-42 (in Chinese with English abstract).
- [7] 黄涛, 赵波, BABACAR Diakhate, 等. 舟山群岛大鳞副泥鳅与台湾泥鳅的形态差异性分析[J]. 水生态学杂志, 2016, 37(2): 83-87. HUANG T, ZHAO B, DIAKHATE B, et al. Analysis of morphological differences between *Paramisgurnus dabryanus* and *Misgurnus anguillicaudatus formosa* cultured in Zhoushan archipelago[J]. Journal of hydroecology, 2016, 37(2): 83-87 (in Chinese with English abstract).
- [8] 胡建华, 祖国掌, 荣朝振, 等. 大鳞副泥鳅 mtDNA Cytb 基因序列分析及分子系统发育研究[J]. 水产科学, 2011, 30(9): 551-554. HU J H, ZU G Z, RONG C Z, et al. Analysis of mitochondrial DNA cytochrome b gene sequence and molecular phylogeny in *Paramisgurnus dabryanus* Sauvage[J]. Fisheries science, 2011, 30(9): 551-554 (in Chinese with English abstract).
- [9] 白晓慧, 杨华, 孟一耕, 等. 大鳞副泥鳅群体线粒体 DNA D-loop 序列遗传变异分析[J]. 水产科学, 2018, 37(5): 658-664. BAI X H, YANG H, MENG Y G, et al. Genetic variations in mitochondrial DNA D-loop sequence of large scale loach *Paramisgurnus dabryanus*[J]. Fisheries science, 2018, 37(5): 658-664 (in Chinese with English abstract).
- [10] ZHU M, LIU F. Mitochondrial genome sequence of *Paramisgurnus dabryanus* from the Yellow River estuary: implication for Cobitidae phylogeny[J]. Mitochondrial DNA, 2016, 27(4): 3039-3040.
- [11] 叶竹青, 凌去非, 李彩娟, 等. 5 个大鳞副泥鳅家系的遗传结构分析[J]. 水生态学杂志, 2015, 36(1): 66-73. YE Z Q, LING Q F, LI C J, et al. Genetic structure analysis of five families of *Paramisgurnus dabryanus*[J]. Journal of hydroecology, 2015, 36(1): 66-73 (in Chinese with English abstract).
- [12] 周小云. 湖北省多倍体泥鳅分布格局及泥鳅育种基础研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009. ZHOU X Y. Biogeographic patterns of polyploid *Misgurnus anguillicaudatus* in Hubei Province and basic studies on its breeding[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009 (in Chinese with English abstract).
- [13] MAYR E. Methods and principles of systematic zoology[J]. Quarterly review of biology, 1953, 118: 117-118.
- [14] FARRÉ M, LOMBARTE A, RECASENS L, et al. Habitat influence in the morphological diversity of coastal fish assemblages[J]. Journal of sea research, 2015, 99: 107-117.
- [15] 温馨. 松辽流域近 35 年气候变化及其典型县气候变化对潜在土壤侵蚀的影响[D]. 长春: 东北师范大学, 2018. WEN X. Climate change in Songliao River Basin and response of potential soil erosion to climate change in typical County in recent 35 years[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [16] MARCIL J, SWAIN D, PHUTCHINGS J A. Genetic and environmental components of phenotypic variation in body shape among populations of Atlantic cod (*Gadus morhua* L.)[J]. Biological journal of the linnean society, 2006, 88(3): 351-365.
- [17] YI S K, WANG S, ZHONG J, et al. Comprehensive transcriptome analysis provides evidence of local thermal adaptation in three loaches (genus: *Misgurnus*) [J/OL]. International journal of molecular sciences, 2016, 17(12): 1943 [2020-12-21]. <http://dx.doi.org/10.3390/ijms17121943>.
- [18] 李雅娟, 张明昭, 于卓, 等. 黑龙江泥鳅、北方泥鳅和泥鳅的形态差异分析[J]. 大连海洋大学学报, 2010, 25(5): 397-401. LI Y J, ZHANG M Z, YU Z, et al. Morphological variations in Amur weatherfish *Misgurnus mohoity* northern weatherfish *Misgurnus bipartitus* and oriental weatherfish *Misgurnus anguillicaudatus* in China[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2010, 25(5): 397-401 (in Chinese with English abstract).
- [19] KINSEY S T, ORSOY T, BERT T M, et al. Population structure of the Spanish sardine *Sardinella aurita*: natural morphological variation in a genetically homogeneous population[J]. Marine biology, 1994, 118(2): 309-317.
- [20] 刘辉, 狄乾斌. 南水北调东线“一期”工程对京杭大运河沿线城市经济发展的影响分析: 基于合成控制法的实证[J]. 资源开发与市场, 2020, 36(11): 1185-1191. LIU H, DI Q B. Analysis on the influence of the first phase of the south-to-north water transfer east route project on the economic development of cities along the Beijing-Hangzhou grand canal: evidence based on synthetic control method[J]. Resource development & market, 2020, 36(11): 1185-1191 (in Chinese with English abstract).
- [21] 汪达, 汪丹. 浅析我国七大流域洪涝灾害及其防治[J]. 水利发展研究, 2017, 17(1): 51-53, 70. WANG D, WANG D. Analysis on the flood disasters and their prevention in the seven major river basins[J]. Water resources development research, 2017, 17(1): 5351-5370 (in Chinese).
- [22] 钱荣华. 中国五大湖三角帆蚌种群形态、生长与分子遗传比较研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2003. QIAN R H. Comparative analysis on the morphology growth and molecular genetics of geographic populations of *Hyriopsis cumingii* in China's five large lakes[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2003 (in Chinese with English abstract).
- [23] 娄晋铭, 张智, 王太, 等. 甘肃省 3 种裂腹鱼遗传多样性与地理种群分化[J]. 华中农业大学学报, 2019, 38(4): 77-84. LOU J M, ZHANG Z, WANG T, et al. Genetic diversity and population differentiation of three Schizothoracinae fishes in Gansu Province[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(4): 77-84 (in Chinese with English abstract).
- [24] 何杰, 徐跑, 朱健. 南北水系中华绒螯蟹形态差异分析[J]. 海洋湖沼通报, 2009(3): 79-86. HE J, XU P, ZHU J. Morphological

variations and species validity of *Eriocheir sinensis* in the north and south drainage systems of China[J]. Transactions of oceanology and limnology, 2009(3): 79-86 (in Chinese with English abstract).

- [25] 肖瑾, 曾燊, 张富斌, 等. 嘉陵江不同江段蛇鮈的形态差异比较[J]. 水产学报, 2020, 44(11): 1832-1840. XIAO J, ZENG Y, ZHANG F B, et al. Comparison of morphological differences

of *Saurogobio dabryi* in different reaches of Jialing River[J]. Journal of fisheries of China, 2020, 44(11): 1832-1840 (in Chinese with English abstract).

- [26] 王家鼎, 李爱兰. 中国南北方地理分界线及其差异[J]. 地理教育, 2009(6): 16. WANG J D, LI A L. Geographical boundary lines and differences between north and south China[J]. Education of geography, 2009(6): 16 (in Chinese).

Morphological comparative analysis of *Paramisgurnus dabryanus* in seven water systems in China

CHEN Honglu¹, YI Shaokui², LI Juntao³, WANG Weimin¹

1. College of Fisheries/Key Lab of Freshwater Animal Breeding, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. School of Life Sciences, Huzhou University, Huzhou 313000, China;

3. Institute of Tropical Bioscience and Biotechnology, Haikou 571101, China

Abstract Eleven morphological characters of 19 *Paramisgurnus dabryanus* populations from 7 water systems were analyzed by using GLM linear regression analysis one-way ANOVA discriminant analysis principal component analysis and cluster analysis. The GLM linear regression analysis showed that the anal-caudal fin distance (D_{AC}) / body length (L_B) was negatively correlated with latitude ($r = -0.782$) and the caudal peduncle length (L_{CP}) / body length (L_B) was positively correlated with latitude ($r = 0.834$). The results of one-way ANOVA indicated that the morphological differences were not significant between the Songhua River and the Liaohe River populations; Songliao population was characterized by a shorter total length a longer caudal peduncle length and a shorter anal-caudal fin distance. Discriminant analysis showed that the comprehensive correct discrimination rate was 65.9% and the accuracy of the discrimination between the populations from Songliao and the southern was 100%. The principal component analysis result indicated that 62.9% of the variance was explained by three major components. The first and most important component explained 38.1% of the original variation and the parameters with strong positive discriminating power (load value > 0.4) were body height (H_B) body width (W_B) caudal peduncle height (H_{CP}) caudal peduncle length (L_{CP}). The result of clustering analysis revealed two distinct clusters: the north and the south populations. The present study showed that there was significant difference in the morphological characteristics of *P. dabryanus* between the southern and northern water system in China. According to the Mayr's 75% rule most morphology differences of *P. dabryanus* between the Songliao and some southern water systems may characterize subspecies. The present study provides morphological basis for the taxonomic status of the *P. dabryanus* population in China. It also provides useful information for the population assessment management and conservation of *P. dabryanus*.

Keywords *Paramisgurnus dabryanus*; geographical population; morphological difference; germplasm resource; population structure; comparative analysis; cluster analysis; phylogeography