

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20210510002

http://www.yykxjz.cn/

王新月, 张永杰, 刘斐, 陈生熬, 林旭元, 李大鹏. 叶尔羌高原鳅不同地理群体形态差异分析. 渔业科学进展, 2022, 43(6): 199–206

WANG X Y, ZHANG Y J, LIU F, CHEN S A, LIN X Y, LI D P. Analysis on the morphological differences of *Triplophysa yarkandensis* in different geographic populations. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(6): 199–206

## 叶尔羌高原鳅不同地理群体形态差异分析\*

王新月<sup>1</sup> 张永杰<sup>1</sup> 刘斐<sup>1</sup> 陈生熬<sup>1,2①</sup> 林旭元<sup>3</sup> 李大鹏<sup>2</sup>

(1. 塔里木大学生命科学学院/塔里木珍稀鱼类研究中心 新疆 阿拉尔 843300;

2. 华中农业大学水产学院 湖北 武汉 430070;

3. 新疆生产建设兵团水产技术推广总站 新疆 乌鲁木齐 830002)

**摘要** 本研究基于多变量形态度量学的方法,对叶尔羌高原鳅(*Triplophysa yarkandensis*) 3个地理群体共计 509 尾样本的 11 个形态指标和 22 个框架指标进行多元统计分析。非参数检验显示,叶尔羌高原鳅 3 个地理群体的 31 项比例性状中,4~9/体长(BL)存在显著差异( $P<0.05$ ),体高(BD)/BL 等 26 项比例性状存在极显著差异( $P<0.01$ )。主成分分析显示,前 3 个主成分贡献率分别为 25.0%、14.0% 和 9.3%,累计贡献率为 48.3%,差异主要体现在机体头部和躯干前段;聚类分析与主成分分析结果基本一致,叶尔羌河群体与塔里木河群体先汇为一支,后与和田河群体汇为一支,即叶尔羌河群体与塔里木河群体形态差异较小,和田河较另外 2 个群体形态差异较大。构建判别方程并进行交互验证,判别成功率分别为 88.48%、88.89% 和 87.73%,综合判别率为 88.37%,表明由判别分析筛选出 9 个形态比例性状对叶尔羌高原鳅不同地理群体的判定是可行的。研究表明,塔里木河水系的特殊性造成不同河流生境中叶尔羌高原鳅群体存在形态差异,可通过多元分析对其进行有效区分,但栖息环境的不同可能是引起机体形态学特征差异或适应进化的主要原因。

**关键词** 叶尔羌高原鳅; 形态差异; 多变量形态度量学; 多元统计分析

**中图分类号** Q954 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2022)06-0199-08

叶尔羌高原鳅(*Triplophysa yarkandensis*)是新疆塔里木河水系的特有鱼类,是栖息海拔最高的鱼类之一(郭焱等, 2012)。由于人类活动加剧、外来物种入侵等,加剧水生态环境压力,降低了土著鱼类生境适宜性,2019 年《新疆维吾尔自治区重点保护水生野生动物名录》中已将其列为 II 级重点保护水生动物(Gorgonio *et al.*, 2003; Zahorska *et al.*, 2009; 谢春刚等, 2015)。近年来,

叶尔羌高原鳅研究主要集中在生长繁殖(陈生熬, 2019)、养殖及毒性实验(陈生熬等, 2016)、遗传多样性及种间差异(Liu *et al.*, 2016; Chen *et al.*, 2016、2020; 王锦秀等, 2020)等方面。

单一的传统形态学方法在解释鱼类形态信息方面具有一定的局限性,难以体现形态多变的空间格局。20 世纪 80 年代,框架法作为一种新的形态学描

\* 国家自然科学基金项目(31360635)、农业农村部财政专项(西北地区重点水域渔业资源与环境调查)、兵团科技局项目(2017DB003)和华中农业大学-塔里木大学联合基金(HNLH202006)共同资助 [This work was supported by National Natural Science Foundation of China (31360635), Special Agriculture and Rural Finance Project (Investigation on Fishery Resources and Environment in Key Waters of Northwest China), Corps Science and Technology Bureau Project (2017DB003), and Huazhong Agricultural University and Tarim University United Fund (HNLH202006)]. 王新月, E-mail: 1072247070@qq.com

① 通信作者: 陈生熬, 教授, E-mail: chenshengao@163.com

收稿日期: 2021-05-10, 收修改稿日期: 2021-07-29

述方法被提出(Bookstein, 1986), 通过连接生物体上具有代表性的坐标点, 在横纵及交叉方向分区域对鱼体形态特征进行了描述(Murta, 2000), 它弥补了传统形态指标在空间格局上的不足, 更精确地反映了种群间的外形差异。

为明确叶尔羌高原鳅不同地理群体的形态分类特征, 本研究结合传统形态学方法和框架法, 对新疆叶尔羌河、和田河和塔里木河叶尔羌高原鳅 3 个群体的 33 个形态指标进行测定, 采用非参数检验筛选指标, 通过主成分分析、判别分析和聚类分析对其形态差异进行比较分析, 旨在为叶尔羌高原鳅种群判别、

种质资源保护提供基础数据, 为进一步验证该物种应对塔里木河水劣化产生适应性进化特征提供佐证。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

2018 年 10 月—2020 年 10 月, 在新疆叶尔羌河、和田河、塔里木河 3 处使用刺网和地笼(网目  $2a=2\text{ cm}$ ) 等, 采集叶尔羌高原鳅样本 509 尾(表 1), 现场进行生物学测定后(殷名称, 1995), 使用 10% 甲醛溶液固定, 带回实验室进行后续处理。

表 1 叶尔羌高原鳅样本信息  
Tab.1 Sample information of *T. yarkandensis*

群体 Population	样本量 Number	体长 Body length /mm		体重 Weight /g	
		范围 Range	平均 Average	范围 Range	平均 Average
叶尔羌河 Yarkand River	217	51.15~142.09	86.85±15.46	2.46~35.66	12.56±6.00
和田河 Hotan River	220	42.43~179.73	78.80±23.67	0.51~50.11	8.72±8.11
塔里木河 Tarim River	72	34.90~162.23	87.90±29.39	0.75~61.94	12.98±14.11

### 1.2 形态测量

使用传统形态学测量和框架法测量。传统形态学数据包括全长(total length, TL)、体长(body length, BL)、体高(body depth, BD)、体宽(body width, BW)、头长(head length, HL)、吻长(snout length, SL)、眼径(eye diameter, ED)、眼间距(eye interval, EI)、尾柄长(caudal peduncle length, CPL)、尾柄高(depth of caudal peduncle, DCP)共 10 项指标(图 1)。图 1 中未标出体宽和眼间距, 鱼体左右侧的最大距离为体宽, 头背部两眼间距离为眼间距。坐标点选择参照李思发等(1998)的方法, 框架数据包括 1~2 (表示坐标点 1 到坐标点 2 间的距离, 下同)、2~3、3~4、4~5、5~6、6~7、7~8、8~9、9~10、10~1、1~9、2~10、2~9、2~8、3~10、3~9、3~8、3~7、4~9、4~7、4~6、5~7 共 22 项指标(图 2)。



图 1 叶尔羌高原鳅的形态测量

Fig.1 Morphological measurement of *T. yarkandensis*

- 1: 全长; 2: 体长; 3: 体高; 4: 体宽(未标); 5: 头长; 6: 吻长; 7: 眼径; 8: 眼间距(未标); 9: 尾柄长; 10: 尾柄高  
1: Total length; 2: Body length; 3: Body depth; 4: Body width (unlabeled); 5: Head length; 6: Snout length; 7: Eye diameter; 8: Eye interval (unlabeled); 9: Caudal peduncle length; 10: Depth of caudal peduncle

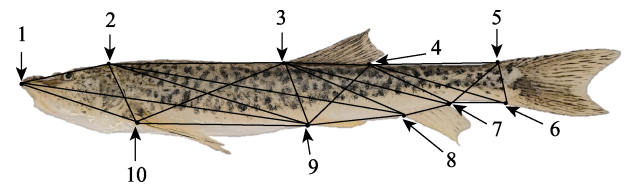


图 2 叶尔羌高原鳅的框架测量

Fig.2 Frame measurement of *T. yarkandensis*

- 1: 吻端; 2: 枕后; 3: 背鳍起点; 4: 背鳍后基; 5: 尾鳍背部起点; 6: 尾鳍腹部起点; 7: 臀鳍后基; 8: 臀鳍起点; 9: 腹鳍起点; 10: 胸鳍起点  
1: Tip of snout; 2: The last end of the frontal maxilla; 3: Origin of dorsal fin; 4: Terminus of dorsal fin; 5: Dorsal origin of caudal fin; 6: Ventral origin of caudal fin; 7: Terminus of anal fin; 8: Origin of anal fin; 9: Insertion of pelvic fin; 10: Insertion of pectoral fin

采用数显游标卡尺(CD67-S15PS)测量长度(精度为 0.01 mm), 电子天平(LE403E)称量体重(精度为 0.01 g)。

### 1.3 数据分析

为消除样本规格差异对形态参数值产生的影响, 每尾样本的所有实测长度数据采用头部特征除以头长、其他特征除以体长的方法予以校正, 得到 31 项比例性状。

显著性水平设为 0.05, 比较群体间差异显著性; 依据协方差矩阵提取主成分, 计算贡献率, 构建主成分散点图; 基于群体欧氏形态距离, 采用邻接法构建不同群体间的聚类关系; 采用逐步判别分析法, 提取形态差异作用最显著的多项参数建立判别公式, 计算

判别准确率及综合判别准确率(李振通等, 2019)。

采用 Microsoft Excel 2010、SPSS 18.0 和 Origin 9.0 软件进行数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 非参数检验

对 31 项比例性状进行非参数检验, Kruskal-Wallis 检验显示(表 2), 4~9/BL 在不同群体间存在显著差异 ( $P<0.05$ ), BD/BL 等 26 项比例性状存在极显著差异 ( $P<0.01$ )。

### 2.2 主成分分析

经 KMO 统计( $KMO=0.740$ )及 Bartlett's 球度检验 ( $P<0.01$ ), 变量之间相关性强, 表明叶尔羌高原鳅不同地理群体形态差异适合进行主成分分析。从表 3 可以看出, 前 3 个主成分贡献率分别为 25.0%、14.0% 和 9.3%, 累计贡献率为 48.3%。主成分 1 中载荷较大的参数有 HL/BL、SL/BL、2~3/BL、2~8/BL, 负荷值均高于 0.700, 主要反映的是头部和横向躯干部特征; 主成分 2 中载荷较大的参数有 BD/BL、3~9/BL、4~9/BL ( $>0.700$ ), 主要反映的是纵向躯干部特征。

表 2 不同群体叶尔羌高原鳅比例性状(平均值  $\pm$  标准差)

Tab.2 Data of character for *T. yarkandensis* in different geographic populations (Mean $\pm$ SD)

比例性状 Proportion of character	叶尔羌河 Yarkand River	和田河 Hotan River	塔里木河 Tarim River	<i>F</i>	<i>P</i>
全长/体长 TL/BL	1.22 $\pm$ 0.03	1.23 $\pm$ 0.04	1.22 $\pm$ 0.04	0.991	0.372
体高/体长 BD/BL	0.18 $\pm$ 0.02	0.18 $\pm$ 0.03	0.18 $\pm$ 0.02	8.295	0
体宽/体长 BW/BL	0.14 $\pm$ 0.02	0.15 $\pm$ 0.03	0.16 $\pm$ 0.02	21.743	0
头长/体长 HL/BL	0.25 $\pm$ 0.02	0.24 $\pm$ 0.02	0.26 $\pm$ 0.02	46.888	0
吻长/头长 SL/HL	0.39 $\pm$ 0.03	0.41 $\pm$ 0.05	0.40 $\pm$ 0.03	23.958	0
眼径/头长 ED/HL	0.14 $\pm$ 0.04	0.17 $\pm$ 0.04	0.15 $\pm$ 0.04	38.725	0
眼间距/头长 EI/HL	0.33 $\pm$ 0.03	0.36 $\pm$ 0.05	0.33 $\pm$ 0.03	52.390	0
尾柄长/体长 CPL/BL	0.15 $\pm$ 0.02	0.15 $\pm$ 0.02	0.14 $\pm$ 0.02	7.321	0.001
尾柄高/体长 DCP/BL	0.08 $\pm$ 0.01	0.08 $\pm$ 0.01	0.08 $\pm$ 0.01	8.843	0
1~2/体长 1~2/BL	0.20 $\pm$ 0.02	0.20 $\pm$ 0.03	0.19 $\pm$ 0.02	7.922	0
2~3/体长 2~3/BL	0.35 $\pm$ 0.05	0.33 $\pm$ 0.03	0.33 $\pm$ 0.03	8.587	0
3~4/体长 3~4/BL	0.14 $\pm$ 0.01	0.13 $\pm$ 0.02	0.14 $\pm$ 0.02	7.785	0
4~5/体长 4~5/BL	0.33 $\pm$ 0.02	0.33 $\pm$ 0.02	0.30 $\pm$ 0.03	40.222	0
5~6/体长 5~6/BL	0.09 $\pm$ 0.01	0.08 $\pm$ 0.01	0.09 $\pm$ 0.01	6.411	0.002
6~7/体长 6~7/BL	0.13 $\pm$ 0.02	0.10 $\pm$ 0.02	0.12 $\pm$ 0.02	18.853	0
7~8/体长 7~8/BL	0.10 $\pm$ 0.01	0.09 $\pm$ 0.01	0.10 $\pm$ 0.01	42.804	0
8~9/体长 8~9/BL	0.21 $\pm$ 0.02	0.22 $\pm$ 0.02	0.22 $\pm$ 0.02	13.995	0
9~10/体长 9~10/BL	0.31 $\pm$ 0.03	0.34 $\pm$ 0.03	0.31 $\pm$ 0.03	62.151	0
10~1/体长 10~1/BL	0.25 $\pm$ 0.02	0.25 $\pm$ 0.02	0.27 $\pm$ 0.02	43.362	0
1~9/体长 1~9/BL	0.55 $\pm$ 0.03	0.57 $\pm$ 0.04	0.56 $\pm$ 0.03	18.161	0
2~10/体长 2~10/BL	0.15 $\pm$ 0.01	0.15 $\pm$ 0.02	0.16 $\pm$ 0.01	12.834	0
2~9/体长 2~9/BL	0.39 $\pm$ 0.06	0.40 $\pm$ 0.09	0.39 $\pm$ 0.02	4.840	0.008
2~8/体长 2~8/BL	0.59 $\pm$ 0.04	0.60 $\pm$ 0.06	0.58 $\pm$ 0.04	2.070	0.127
3~10/体长 3~10/BL	0.33 $\pm$ 0.02	0.34 $\pm$ 0.03	0.32 $\pm$ 0.02	23.154	0
3~9/体长 3~9/BL	0.17 $\pm$ 0.01	0.17 $\pm$ 0.02	0.17 $\pm$ 0.02	1.354	0.259
3~8/体长 3~8/BL	0.29 $\pm$ 0.02	0.29 $\pm$ 0.02	0.29 $\pm$ 0.02	1.050	0.351
3~7/体长 3~7/BL	0.36 $\pm$ 0.03	0.34 $\pm$ 0.03	0.36 $\pm$ 0.03	17.912	0
4~9/体长 4~9/BL	0.19 $\pm$ 0.02	0.18 $\pm$ 0.02	0.19 $\pm$ 0.02	4.325	0.014
4~7/体长 4~7/BL	0.23 $\pm$ 0.02	0.22 $\pm$ 0.02	0.22 $\pm$ 0.02	15.633	0
4~6/体长 4~6/BL	0.35 $\pm$ 0.02	0.34 $\pm$ 0.02	0.31 $\pm$ 0.04	53.374	0
5~7/体长 5~7/BL	0.16 $\pm$ 0.02	0.17 $\pm$ 0.02	0.15 $\pm$ 0.02	29.490	0

表3 不同群体叶尔羌高原鳅比例性状的因子载荷系数  
Tab.3 Factor loadings about proportion of character of *T. yarkandensis* in different geographic populations

比例性状 Proportion of character	主成分 Principle component		
	1	2	3
全长/体长 TL/BL	0.124	0.475	-0.066
体高/体长 BD/BL	-0.449	0.700	0.191
体宽/体长 BW/BL	-0.627	0.383	0.111
头长/体长 HL/BL	-0.736	0.258	0.382
吻长/头长 SL/HL	0.701	-0.040	0.195
眼径/头长 ED/HL	0.227	-0.009	-0.107
眼间距/头长 EI/HL	-0.047	0.081	0.190
尾柄长/体长 CPL/BL	-0.634	-0.121	-0.150
尾柄高/体长 DCP/BL	0.007	0.304	0.340
1~2/体长 1~2/BL	-0.676	0.379	0.091
2~3/体长 2~3/BL	0.781	-0.147	0.014
3~4/体长 3~4/BL	-0.023	0.406	0.112
4~5/体长 4~5/BL	0.201	-0.263	-0.182
5~6/体长 5~6/BL	-0.092	0.121	0.682
6~7/体长 6~7/BL	0.192	-0.035	-0.092
7~8/体长 7~8/BL	-0.041	0.231	0.181
8~9/体长 8~9/BL	0.042	-0.007	0.026
9~10/体长 9~10/BL	0.212	-0.053	0.015
10~1/体长 10~1/BL	-0.191	0.268	0.563
1~9/体长 1~9/BL	0.072	0.033	0.108
2~10/体长 2~10/BL	-0.141	0.448	0.316
2~9/体长 2~9/BL	0.172	0.345	-0.010
2~8/体长 2~8/BL	0.729	0.094	-0.030
3~10/体长 3~10/BL	0.241	0.188	-0.298
3~9/体长 3~9/BL	-0.246	0.726	0.032
3~8/体长 3~8/BL	0.291	0.157	0.196
3~7/体长 3~7/BL	-0.075	0.080	0.001
4~9/体长 4~9/BL	0.048	0.768	0.109
4~7/体长 4~7/BL	0.268	0.089	-0.180
4~6/体长 4~6/BL	0.343	0.038	-0.365
5~7/体长 5~7/BL	0.093	-0.019	0.013
主成分特征值 Principal component eigenvalue	5.738	3.539	1.805
主成分贡献率 Contribution ratio/%	24.997	14.014	9.296
累计贡献率 Cumulative contribution ratio/%	24.997	39.012	48.307

主成分分析构建散点见图3。从图3可以看出，3个群体间都有重叠，不同群体形态有一定的相似性和差异。叶尔羌河群体与塔里木河群体重叠范围较多，和田河与另外2个群体重叠范围少。

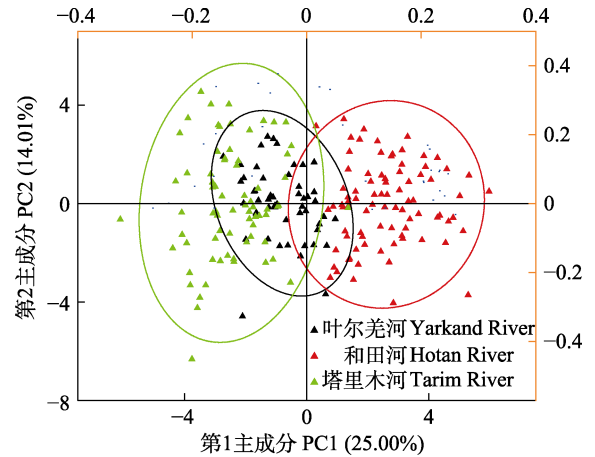


图3 不同群体叶尔羌高原鳅第1、第2主成分构建散点  
Fig.3 The distribution of the first and second principal components of *T. yarkandensis* in different geographic populations

### 2.3 聚类分析

叶尔羌河群体与塔里木河群体之间的欧式距离最小，为0.005；和田河群体较另外2个群体的欧式距离较大，分别为0.011和0.010（表4）。

从图4可以看出，聚类关系显示，结果与主成分分析结果一致，叶尔羌河群体与形态差异较小的塔里木河群体先汇为一支，后与差异较大的和田河群体汇为一支。

表4 不同群体叶尔羌高原鳅欧氏形态距离  
Tab.4 Euclidean distances of *T. yarkandensis* in different geographic populations

群体 Population	叶尔羌河 Yarkand River	和田河 Hotan River	塔里木河 Tarim River
叶尔羌河 Yarkand River	/	0.011	0.005
和田河 Hotan River	0.011	/	0.010
塔里木河 Tarim River	0.005	0.010	/

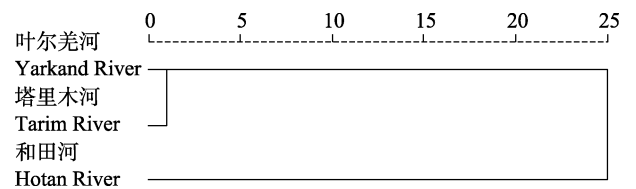


图4 不同群体叶尔羌高原鳅聚类关系  
Fig.4 The dendrogram of *T. yarkandensis* in different geographic populations

### 2.4 判别分析

不同地理群体间的形态差异属于种内变异，不能

以物种分类的要求, 只用少数指标进行鉴别, 需要使用多项参数进行综合判别(李思发等, 1998)。筛选出对判别贡献较大的 9 个参数, 以  $X_{1-9}$  代替, 建立不同群体的判别公式如下:

$$Y_Y = -1\ 102.901 + 850.722X_1 - 262.056X_2 + 1\ 038.206X_3 + 294.562X_4 + 285.094X_5 + 300.209X_6 + 529.432X_7 + 318.411X_8 + 334.231X_9$$

$$Y_T = -1\ 098.0295 + 840.845X_1 - 274.239X_2 + 1\ 119.730X_3 + 301.548X_4 + 288.620X_5 + 280.101X_6 + 482.456X_7 + 309.582X_8 + 315.837X_9$$

$$Y_H = -11\ 31.009 + 850.698X_1 - 238.752X_2 + 1\ 061.000X_3 + 309.506X_4 + 308.931X_5 + 311.303X_6 + 482.189X_7 + 326.636X_8 + 344.532X_9$$

将校正后数据代入公式, 开展样本预测分类判别(表 5)。其中, 叶尔羌河群体的 217 尾实测样本中误判 25 尾, 判别准确率为 88.48%; 和田河群体 220 尾实测样本中误判 27 尾, 判别准确率为 88.18%; 塔里木河群体 72 尾实测样本中误判 8 尾, 判别准确率为 88.89%。不同群体的综合判别率均 >85%, 差异显著, 说明判别方程可作为不同地理群体叶尔羌高原鳅的判别依据。

表 5 不同地理群体叶尔羌高原鳅判别分析结果

Tab.5 Results of discriminant analysis of *T. yarkandensis* in different geographic populations

群体 Population	预测分类 Predicted group membership			判别准确率 Identification accuracy/%
	叶尔羌河 Yarkand River	和田河 Hotan River	塔里木河 Tarim River	
	叶尔羌河 Yarkand River	192	12	
和田河 Hotan River	16	193	11	87.73
塔里木河 Tarim River	7	1	64	88.89
综合判别率 Total discriminant accuracy /%				88.37

### 3 讨论

动物外部形态差异异常采用经典的多变量形态学和多元统计分析法, 如黑线姬鼠(*Apodemus agrarius*)基于表型遗传学种间差异分析(孙佼, 2020)、山东海阳和烟台 2 个口虾蛄(*Oratosquilla oratoria*)群体的形态比较(孙东昱等, 2021), 其形态学差异都与环境因子和遗传基因密切相关(Salini *et al.*, 2004); 然

而, 鱼类形态特征较易受环境因子制约(Wimberger, 1992)。蔡鸣俊等(2001)研究发现, 魮属(*Megalobrama*)中体型相对较低的广东魮(*M. terminalis*)和厚颌魮(*M. pellegrini*)更有利于在较大流速的水体中穿梭; 谢鹏(2019)研究发现, 拉氏魮(*Phoxinus lagowskii*)和尖头魮(*Phoxinus oxycephalus*)“近锥形”的头型有利于在流速大且地形复杂的水流中穿梭, 尾部特征差异与游泳能力密切相关。

Kruskal-Wallis 检验和主成分分析可直观判断不同群体间的差异, 26 项比例性状存在显著差异, 主成分分析把多个形态指标综合成少数因子来体现不同群体间的差异。舒琥等(2017)研究表明, 提取前 3 个主成分累计贡献率为 44.71%, 不同群体大刺魮(*Mastacembelus armatus*)形态差异主要集中在躯干部和头部, 并指出该性状与躯干部更易储存脂肪和增加体重。本研究中提取前 3 个主成分, 累计贡献率为 48.31%, 其中, 负荷值 >0.700 的参数中主要反映叶尔羌高原鳅头部和躯干前段特征, 与上述研究结果相一致。张秀霞等(2017)对唐鱼(*Tanichthys albonubes*)、王贺岷元等(2017)对高原裸裂尻鱼(*Schizopygopsis stoliczkai*)的研究均表明, 鱼类头部特征与饵料丰度密切相关。依据本项目年度实地调查, 塔里木河和叶尔羌河浮游生物量分别为 65.93、55.50 ind./L, 与和田河 21.50 ind./L 相比差异显著 ( $P < 0.05$ ), 这是导致机体生长不同的关键, 和 Albertson 等(2001)评估鱼类适应性特征的形态差异结论相一致。本研究中, 塔里木河和叶尔羌河盐度显著低于和田河盐度(黄健盛等, 2017)。Chen 等(2020)研究发现, 高盐条件下, 鱼类在调节渗透压稳定消能中, 由于维护机能正常而出现机体胁迫现象, 进而影响形态组织特征变化, 与本研究结果相一致, 其中, 主要体现在躯干部。叶尔羌高原鳅的体重随年龄增长较快并保持一定斜率, 而体长却随年龄呈较平滑增长, 即叶尔羌高原鳅生长到一定年龄后, 体重的增加要比其他体型特征增长显著(陈生熬, 2017), 这与本研究结果相似。

Gorgonio 等(2003)、杨天燕等(2018)应用聚类分析和结合框架形状度量评价方法分别对野生鲑科(Salmonidae)、多群体裂腹鱼(*Schizothorax*)进行了有效分支, 该分析方法对比了不同地理群体鱼类各比例性状的相似程度, 直观反映了其种间亲缘关系。孙鹏等(2014)通过该方法比较 4 个地理种群北方须魮(*Barbatula nuda*)的 14 个比例性状, 发现其种间出现了显著的形态特征差异, 首先聚到一支的鸭绿江和黑龙江群体形态差异最小; 梁述章等(2018)对 7 个地理

群体棘头梅章鱼(*Collichthys lucidus*)进行聚类分析,地理距离较近的大丰群体和连云港群体单独聚为一支。本研究结果显示,叶尔羌河群体与塔里木河群体先汇为一支,后与和田河群体汇为一支,故叶尔羌河群体与塔里木河群体形态相似程度更高、亲缘关系更近,和田河较另 2 个群体形态相似程度较低、亲缘关系较远。

判别分析已广泛应用于鱼类种群鉴定, Gonzalez 等(2020)通过该方法对养殖及野生群体侧叶脂塘鳢(*Dormitator latifrons*)进行了有效判别。本研究中,采用逐步判别法从31项比例性状中筛选出9个贡献较大的值,与主成分中负荷值 > 0.700 的参数一致,均反映头部及躯干前段特征。筛选最佳因子建立叶尔羌高原鳅不同群体的判别函数,综合判别率为88.37%,各群体误判率均控制在15.00%以内,说明基于形态学数据的逐步判别法对叶尔羌高原鳅不同地理群体的判别是有效的。判别结果还显示,本研究中叶尔羌河群体中被误判为塔里木河群体及塔里木河群体中被误判为叶尔羌河群体的样本较多,表明这2个群体在形态上更为接近,这与本研究中主成分分析和聚类分析得到的结果一致。

综合以上多元分析结果表明,不同地理群体叶尔羌高原鳅存在形态差异,外部形态特征可为不同地理群体鱼类的种间分类鉴定提供依据。造成上述鱼类形态学的差异,不仅受遗传特性、环境条件、摄食行为等影响,其自身生长性能也表现出明显的阶段性和季节性(王锦秀等, 2021)。叶尔羌高原鳅不仅要适应高寒、低氧等挑战,还要适应较高的盐碱度环境。Chen 等(2020)通过研究不同盐碱胁迫下叶尔羌高原鳅体内生物过程,发现其适应性机制包含信号通路、癌症通路等多调控通路,从分子手段验证了叶尔羌高原鳅为应对塔里木河水劣化而产生的适应性进化;人类活动和水利枢纽等破坏了原有水生态系统的完整性,造成塔里木河流域水量急剧减少(何海等, 2010),其重要支流和田河与叶尔羌河几乎处于断流状态,存在地理屏障;而叶尔羌河和塔里木河每年尚有季节性水流交汇,生境不同,环境差异,水体指标存在区别,加之群体间所处的生活史阶段及摄食行为也不完全相同,会引起和积累群体间的基因差异,致使不同群体叶尔羌高原鳅个体间出现头部及躯干前段特征异化现象,说明环境选择对推动物种适应性进化具有重要作用,为进一步验证该物种应对塔里木河水劣化产生适应性进化特征提供有力佐证。

高原鳅属(*Triplophysa*)是高原鱼类的重要组成部分

分,叶尔羌高原鳅作为高原鳅属鱼类中最大个体之一,有着特殊的生态习性和进化特点(梁文涛, 2014),开展叶尔羌高原鳅不同群体的形态学差异研究对后续探究鱼类系统进化和高原生态等具有重要意义。本研究可为鳅科鱼类的分类鉴定提供有力支撑,为良种选育及产业化开发打下基础、夯实高原水产种业。

## 参 考 文 献

- ALBERTSON R C, KOCHER T D. Assessing morphological differences in an adaptive trait: A landmark-based morphometric approach. *Journal of Experimental Zoology*, 2001, 289(6): 385–403
- BOOKSTEIN F L. Size and shape spaces for landmark data in two dimensions: Comment. *Statistical Science*, 1986, 1(2): 226
- CAI M J, ZHANG M Y, ZENG Q L, *et al.* A study on morphometrics of the genus *Megalobrama*. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2001, 25(6): 631–635 [蔡鸣俊, 张敏莹, 曾青兰, 等. 鲴属鱼类形态度量学研究. *水生生物学报*, 2001, 25(6): 631–635]
- CHEN S A. Early development and physiological mechanism of salinity-alkalinity adaption of *Triplophysa yarkandensis* (Day). Doctoral Dissertation of Huazhong Agricultural University, 2019 [陈生熬. 叶尔羌高原鳅早期发育及盐碱适应生理机制. 华中农业大学博士研究生学位论文, 2019]
- CHEN S A, YAD N, XIE C X, *et al.* Complete mitochondrial genome of the *Triplophysa (Hedinichthys) yarkandensis* (Day). *Taylor and Francis*, 2016, 1(1): 1156489: 235–236
- CHEN S A, YAO N, JIANG C Y, *et al.* Studies on the tolerance of *Triplophysa (Hedinichthys) yarkandensis* (Day) to salinity and alkalinity. *Sichuan Journal of Zoology*, 2016, 35(4): 523–527 [陈生熬, 姚娜, 江春雨, 等. 塔里木河叶尔羌高原鳅盐碱耐受性研究. *四川动物*, 2016, 35(4): 523–527]
- CHEN S A, HOU J L, YAO N, *et al.* Comparative transcriptome analysis of *Triplophysa yarkandensis* in response to salinity and alkalinity stress. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part D: Genomics and Proteomics*, 2020, 33: 100629
- CHEN S A, YAO N, SONG Y, *et al.* Effects of morphological traits on body mass of *Triplophysa (Hedinichthys) yarkandensis* (Day). *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2017, 54(3): 546–556 [陈生熬, 姚娜, 宋勇, 等. 塔里木河叶尔羌高原鳅形态性状对体质量的影响. *新疆农业科学*, 2017, 54(3): 546–556]
- GONZALEZ M A, LOPEZ M, MOLERO H M, *et al.* Morphometric and meristic characterization of native chame fish (*Dormitator latifrons*) in Ecuador using multivariate analysis. *Animals*, 2020, 10(10): 1–6
- GORGONIO R C, FAUSTINO C R, ALEJANDRO V R, *et al.*



- Morphometric variation of wild trout populations from northwestern Mexico (Pisces: Salmonidae). *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2003, 13(1): 91–110
- GUO Y, ZHANG R M, CAI L G. Fishes of Xinjiang. Urumqi: Xinjiang Science and Technology Press, 2012, 77–83 [郭焱, 张人铭, 蔡林刚. 新疆鱼类志. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2012, 77–83]
- HE H, LU G H, YAN G X. Reduction algorithm of calculating surface profile of dam break flood. *Water Resources and Power*, 2010, 28(2): 13–15, 43 [何海, 陆桂华, 闫桂霞. 塔里木河流域水文循环要素变化特征分析. *水电能源科学*, 2010, 28(2): 13–15, 43]
- HUANG J S, CHEN G, ZHANG J D, *et al.* Effects of fertilized eggs hatch, morphology and survival activity of yolk sac larvae of hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* × *Epinephelus polyphkadion*). *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(3): 507–515 [黄建盛, 陈刚, 张健东, 等. 盐度对杂交石斑鱼受精卵孵化和卵黄囊仔鱼形态及活力的影响. *中国水产科学*, 2017, 24(3): 507–515]
- LI S F, LI C H, LI J L. Analysis of morphological variations among strains of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Current Zoology*, 1998, 44(4): 450–457 [李思发, 李晨虹, 李家乐. 尼罗罗非鱼品系间形态差异分析. *动物学报*, 1998, 44(4): 450–457]
- LI Z T, CHENG M L, TIAN Y S, *et al.* Analysis of the morphological difference between hybrid “*Epinephelus moara* E. lanceoatus” and its parents. *Progress in Fishery Sciences*, 2019, 40(4): 73–83 [李振通, 成美玲, 田永胜, 等. 杂交种“云龙石斑鱼”与亲本的形态差异分析. *渔业科学进展*, 2019, 40(4): 73–83]
- LIANG S Z, SONG W, ZHAO M, *et al.* Morphology of seven *Collichthys lucidus* populations near the coast the Yellow Sea and East China Sea. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2018, 25(3): 576–585 [梁述章, 宋炜, 赵明, 等. 黄海、东海近海七个棘头梅童鱼地理群体的形态差异分析. *中国水产科学*, 2018, 25(3): 576–585]
- LIANG W T. The biology research about several species of *Triplophysa*. Master's Thesis of Wuhan Polytechnic University, 2014 [梁文涛. 几种高原鳅属鱼类的生物学研究. 武汉轻工大学硕士研究生学位论文, 2014]
- LIU T, YOU P. The complete mitochondrial genome of *Triplophysa* sp. (Teleostei: Cypriniformes: Balitoridae). *Mitochondrial DNA, Part A: DNA Mapping, Sequencing, and Analysis*, 2016, 27(6): 4557–4558
- MURTA A G. Morphological variation of horse mackerel (*Trachurus trachurus*) in the Iberian and North African Atlantic: Implications for stock identification. *ICES Journal of Marine Science*, 2000, 57(4): 1240–1248
- SALINI J P, MILTON D A, RAHMAN M J, *et al.* Allozyme and morphological variation throughout the geographic range of the tropical shad, hilsa *Tenualosa ilisha*. *Fisheries Research*, 2004, 66(1): 53–69
- 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. *Journal of Guangzhou University (Natural Science)*, 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. *广州大学学报(自然科学版)*, 2017, 16(3): 8–14]
- SUN D Y, WANG L, QIU S Y, *et al.* Morphological comparison of *Oratosquilla oratoria* stocks along the coast of Haiyang and Yantai. *Progress in Fishery Sciences*, 2021, 42(1): 154–164 [孙东昱, 王蕾, 邱盛尧, 等. 海阳和烟台近岸口虾蛄群体的形态比较. *渔业科学进展*, 2021, 42(1): 154–164]
- SUN J. Study on morphology and genetic variation of *Apodemus agrarius* populations on islands and continent. Master's Thesis of Zhejiang Normal University, 2020 [孙佼. 黑线姬鼠岛屿与大陆种群形态及遗传变异研究. 浙江师范大学硕士研究生学位论文, 2020]
- SUN P, MA B, ZHAO W G. Morphological variation and discriminant analysis in four geographical populations of *Loach barbatula nuda*. *Chinese Journal of Fisheries*, 2014, 27(2): 14–19 [孙鹏, 马波, 赵文阁. 北方须鳅4个地理群体的形态差异与判别分析. *水产学杂志*, 2014, 27(2): 14–19]
- WANG J X, REN D Q, WANG X Y, *et al.* The analysis of genetic diversity of *Triplophysa yarkandensis* (Day) from five geographic populations in the Tarim River Basin. *Progress in Fishery Sciences*, 2021, 42(4): 46–54 [王锦秀, 任道全, 王新月, 等. 塔里木河流域5个地理种群的叶尔羌高原鳅遗传多样性分析. *渔业科学进展*, 2021, 42(4): 46–54]
- WANGHE K Y, TANG Y T, LI G G, *et al.* Geometric morphometrics of the cephalic contour and its morphological variations among *Schizopygopsis stoliczkai* (Teleostei: Cyprinidae). *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2017, 41(1): 182–193 [王贺崑元, 汤永涛, 李国刚, 等. 高原裸裂尻鱼头部轮廓形状及其变异的几何形态测量分析. *水生生物学报*, 2017, 41(1): 182–193]
- WIMBERGER P H. Plasticity of fish body shape: The effects of diet, development, family and age in two species of *Geophagus* (Pisces: Cichlidae). *Biological Journal of the Linnean Society*, 1992, 45(3): 197–218
- XIE C G, MA Y W, GUO Y. Analysis of biogeography of fishes in tarim basin. *Chinese Journal of Fisheries*, 2015, 28(2): 40–46 [谢春刚, 马燕武, 郭焱. 塔里木盆地鱼类生物地理学初步解析. *水产学杂志*, 2015, 28(2): 40–46]
- XIE P. Morphological comparison and temperature adaptation of *Phoxinus* species in China. Doctoral Dissertation of Huazhong Agricultural University, 2019 [谢鹏. 中国鳊属鱼类形态学比较和温度适应的研究. 华中农业大学博士研究生学位论文, 2019]
- YANG T Y, MENG W, GUO Y, *et al.* The multivariate morphometric analysis of *Schizothorax biddulphi* and *Schizothorax irregularis*. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2018, 37(3): 221–227 [杨天燕, 孟玮, 郭焱, 等. 塔里木裂腹鱼和厚唇裂腹鱼多变量形态学分析.

- 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2018, 37(3): 221–227]
- YIN M C. Fish ecology. Beijing: China Agriculture Press, 1995, 23–33 [殷名称. 鱼类生态学. 北京: 中国农业出版社, 1995, 23–33]
- ZAHORSKA E, KAHORSKA V, FALKA I, *et al.* Morphological variability of the Asiatic cyprinid, topmouth gudgeon *Pseudorasbora parva*, in its introduced European range. Journal of Fish Biology, 2009, 74(1): 167–185
- ZHANG X X, ZHU Q Y, ZHAO J. Geometric morphometric analysis of body-form variability in populations of *Tanichthys albonubes*. Journal of Fisheries of China, 2017, 41(9): 1365–1373 [张秀霞, 朱巧莹, 赵俊. 利用几何形态测量学方法分析唐鱼群体的形态变异. 水产学报, 2017, 41(9): 1365–1373]

(编辑 陈 严)

## Analysis on the Morphological Differences of *Triplophysa yarkandensis* in Different Geographic Populations

WANG Xinyue<sup>1</sup>, ZHANG Yongjie<sup>1</sup>, LIU Fei<sup>1</sup>, CHEN Sheng'ao<sup>1,2①</sup>, LIN Xuyuan<sup>3</sup>, LI Dapeng<sup>2</sup>

- (1. College of Life Sciences, Tarim University/Tarim Research Center of Rare Fishes, Alar, Xinjiang 843300, China;  
2. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China;  
3. Fishery Technical Extension Station, Xinjiang Production Construction Group, Urumqi, Xinjiang 830002, China)

**Abstract** This study aimed to explore the morphological adaptation and evolution characteristics of *Triplophysa yarkandensis*, an endemic fish in the Tarim River Basin, and further develop the proliferation and protection of native fish resources in the Tarim River Basin. This study is based on multivariate morphological metrics, and multivariate statistical analysis was conducted on 11 traditional indices and 22 framework indices of 509 samples from three geographical *T. yarkandensis* populations. A non-parametric test showed that, among the 31 proportional traits of the three geographic *T. yarkandensis* populations, 4–9/body length had significant differences ( $P < 0.05$ ), and 26 proportional traits such as body depth/body length had extremely significant differences ( $P < 0.01$ ). Principal component analysis revealed that the contribution rates of the first three principal components were 25.00%, 14.00% and 9.30%, with a cumulative contribution rate of 48.31%. The differences were primarily in the head and in front of the trunk. Cluster analysis and principal component analysis results were essentially identical. The Yarkand River and the Tarim River groups first converged into one branch that then converged into a branch with the Hotan River group. Specifically, the difference between the Yarkand River and Tarim River is small, and the difference between the Hotan River and the other two groups is large. During the verification of the built discriminant equations, the discriminant success rates were 88.48%, 88.89%, 87.73%, and the comprehensive discriminant rate was 88.37%. It is suggested that the nine morphological and proportional characters selected by discriminant analysis are feasible for the preliminary determination of different geographical populations of *T. yarkandensis*. The results showed that the special characteristics of the Tarim River system resulted in the morphological differences of *T. yarkandensis* in different river habitats, which could be distinguished effectively by multivariate analysis. However, the differences in habitat environment might be the predominant reason for the morphological differences or adaptation evolution of the fish.

**Key words** *Triplophysa yarkandensis*; Morphological variation; Multivariate morphometrics; Multivariate statistical analysis

① Corresponding author: CHEN Sheng'ao, E-mail: chenshengao@163.com