



## 新疆叶尔羌河流域 4 种裂腹鱼多变量形态学对比分析

刘 鸿, 牛建功, 胡江伟, 海萨·艾也力汗, 咸玉兰,  
贺疆滔, 蔡林钢, 张人铭\*

(新疆维吾尔自治区水产科学研究所, 农业农村部西北地区渔业资源环境科学观测实验站,  
新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830000)

**摘要:** 为明确叶尔羌河流域 4 种裂腹鱼的表型差异, 实验整合传统形态学和框架分析法 2 个数据体系, 利用多变量形态学统计分析法对叶尔羌河流域裂腹鱼类 (4 种, 494 尾, 48 组参数) 开展分析。单因子方差分析结果显示, 9 个参数同时在 4 种裂腹鱼中存在显著差异, 差异主要位于头部、前躯干部和后躯干部; 主成分分析结果显示, 重唇裂腹鱼与厚唇裂腹鱼形态数据在 PC1 轴上差异显著, 主要反映头部特征; 而框架数据结果显示, 塔里木裂腹鱼和宽口裂腹鱼在第一主成分上差异较大, 主要体现在后躯干部; 2 个数据体系逐步判别分析分别选取 8 个和 6 个主要参数建立判别公式, 初始判别成功率分别为 85.7% 和 75.7%, 散点图组质心分离, 样品重叠少; 聚类分析结果显示, 2 个数据体系均分为 2 个分支, 其中重唇裂腹鱼单独成一支, 塔里木裂腹鱼与厚唇裂腹鱼在形态上距离较近, 与宽口裂腹鱼次之。研究表明, 2 个数据体系中, 形态数据表现较优于框架数据; 叶尔羌河流域 4 种裂腹鱼外部形态存在显著差异, 利用多元统计方法可以较好区分, 但仍存在一定的重叠。

**关键词:** 裂腹鱼亚科; 形态分析; 多元统计; 叶尔羌河流域

**中图分类号:** S 917.4

**文献标志码:** A

叶尔羌河 (以下简称叶河) 位于新疆西南部塔里木盆地西缘, 系塔里木河 (以下简称塔河) 最长源流<sup>[1]</sup>, 发源于克什米尔北部喀喇昆仑山脉的喀喇昆仑山口, 上游呈深切峡谷<sup>[2]</sup>, 受第三纪末期青藏高原隆起影响, 该流域逐渐形成独特的鱼类种群结构, 裂腹鱼类为其典型代表<sup>[3]</sup>。20 世纪 60 年代, 由中国科学院动物研究所组织的联合调查结果显示, 叶河流域裂腹鱼亚科 (臀鳞鱼亚科) 包括宽口裂腹鱼 (宽口臀鳞鱼) (*Schizothorax eurystomus*)、扁嘴裂腹鱼 (鸭嘴臀鳞鱼) (*S. esocinus*)、塔里木裂腹鱼 (尖嘴臀鳞鱼) (*S. biddulphi*)、重唇裂腹鱼 (重唇臀鳞鱼) (*S. barbatus*) 和厚唇裂腹鱼 (厚唇

臀鳞鱼) (*S. irregularis*) 5 种<sup>[4]</sup>, 其中扁嘴裂腹鱼资源量极低, 近年来均未采集到样品<sup>[5]</sup>。历史上关于裂腹鱼类的研究主要以资源分布<sup>[6-10]</sup> 和分子生物学<sup>[11-13]</sup> 为主。杨天燕等<sup>[14]</sup> 通过形态学及 COI 基因对塔里木裂腹鱼和厚唇裂腹鱼进行分析, 结果表明, 基于多变量形态学方法可将 2 种裂腹鱼进行区分, 而 COI 比对发现第 417 bp 处的 C/T 转换为 2 个物种间特有, 但尚不能确定为鉴定依据<sup>[15]</sup>。目前, 关于叶河流域 4 种裂腹鱼的种间判别尚无报道。

在鱼类研究中常用的形态学判别方法有传统形态学、框架分析法和几何形态法。传统形态学为鱼类区系调查的经典手段, 其测量参数基于鱼

收稿日期: 2020-09-24 修回日期: 2021-04-12

资助项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金 (2021D01B86); 农业农村部“西北地区渔业资源与环境调查”专项

第一作者: 刘鸿 (照片), 从事渔业资源及生物学研究, E-mail: lhallbymyself@163.com

通信作者: 张人铭, 从事水域生态环境修复、濒危水生生物救护及新技术推广与应用等研究,

E-mail: xj01zrm@163.com



类形态结构, 数据溯源性强, 是鱼类特征描述的前提和依据<sup>[16]</sup>; 框架分析法 (Box-truss analysis) 由 Straus 和 Bookstein 于 1982 年提出, 其原理是利用鱼体解剖同源点纵横交错联结成线比较关键框架长度, 该方法能够充分发掘和利用鱼体形态上的稳定差异<sup>[17]</sup>; 几何形态测量学 (geometric morphometrics) 于 20 世纪 90 年代由 Bookstein 和 Rohlf 创立, 是基于整体轮廓通过标志点和半标志点对物种开展比较分析, 起初多应用于鱼类耳石形态研究<sup>[18]</sup>, 近年来在鱼类形态研究中开始逐步应用<sup>[19]</sup>。多种数据体系综合分析也多用于种间判定<sup>[14]</sup>、种群区分<sup>[20]</sup> 和杂交分析<sup>[21]</sup> 等。塔河水系 4 种常见裂腹鱼在外形上高度相似, 且可数与可量性状多存在交叉, 除分子手段外, 日常工作中多以其唇部特征作为鉴定依据, 即宽口裂腹鱼下颌具锐利角质缘; 塔里木裂腹鱼口呈马蹄形, 下唇窄; 厚唇

裂腹鱼下唇肥大但两叶不连续; 重唇裂腹鱼下唇肥大而两叶连续<sup>[5]</sup>。受工作经验及个人差异的影响, 4 种裂腹鱼在形态鉴定中易出现误判, 且有学者对该分类存在质疑。基于上述问题, 本实验拟通过传统形态学和框架法 2 个数据体系分别对裂腹鱼开展种间分析, 以期获得种间差异、建立判别体系, 并加以分类, 为后续工作提供参考和依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

样品采集于叶河上游水域, 采集断面为 S1~S6 共计 6 个断面 (图 1), 使用网具包括挂网、地笼及抬网, 参数测量前样品未经任何固定处理, 数据测量使用电子游标卡尺, 数据精确至 0.01 mm。

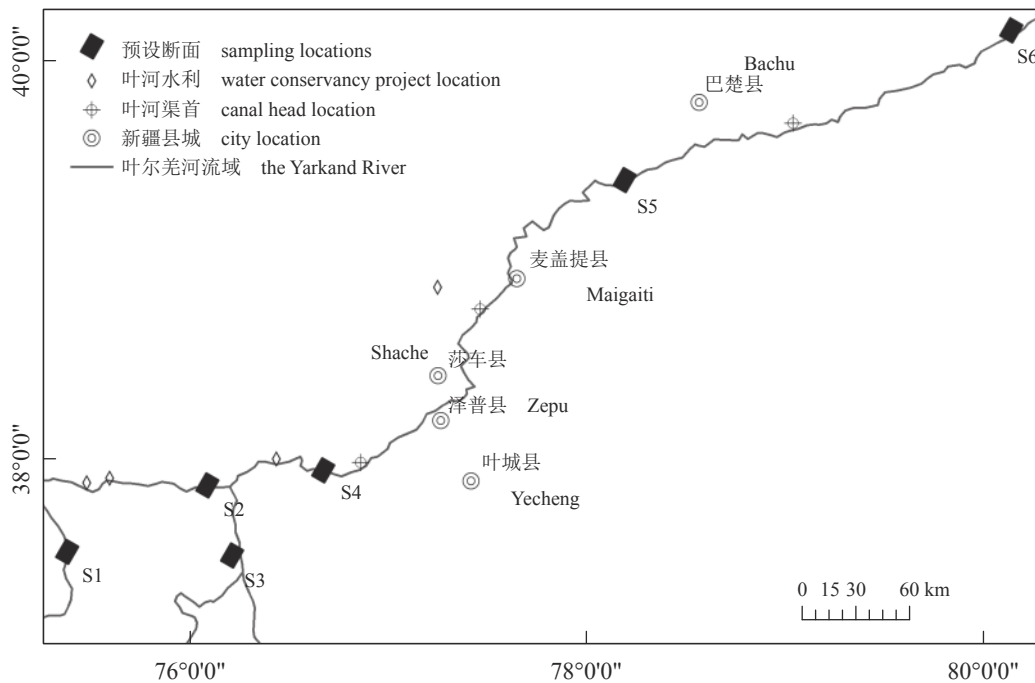


图 1 叶尔羌河样品采集断面分布示意图

Fig. 1 Sampling locations of Schizothoracinae in the Yarkand River

### 1.2 数据测量

形态数据 测定体高 (A1)、体厚 (A2)、尾柄长 (A3)、尾柄高 (A4)、背吻距 (A5)、背尾距 (A6)、背鳍基长 (A7)、头长 (A8)、头高 (A9)、头厚 (A10)、吻长 (A11)、眼后头长 (A12)、眼径 (A13)、眼间距 (A14)、口裂宽 (A15)、口裂长 (A16)、鼻孔间距 (A17) 及体长<sup>[22]</sup>, 共计 18 个参数。

框架数据 选取 12 个解剖学同源坐标点, 构建由 AB(B1)、AC(B2)、AK(B3)、AL(B4)、BC(B5)、BF(B6)、BG(B7)、BH(B8)、BI(B9)、BJ(B10)、BK(B11)、BL(B12)、CD(B13)、CE(B14)、CF(B15)、CG(B16)、CH(B17)、CI(B18)、CJ(B19)、CK(B20)、DE(B21)、DF(B22)、DG(B23)、EF(B24)、FG(B25)、GH(B26)、HI(B27)、IJ(B28)、JK(B29) 及 JL(B30) 共 30 个参数组成的框架系统 (图 2)。

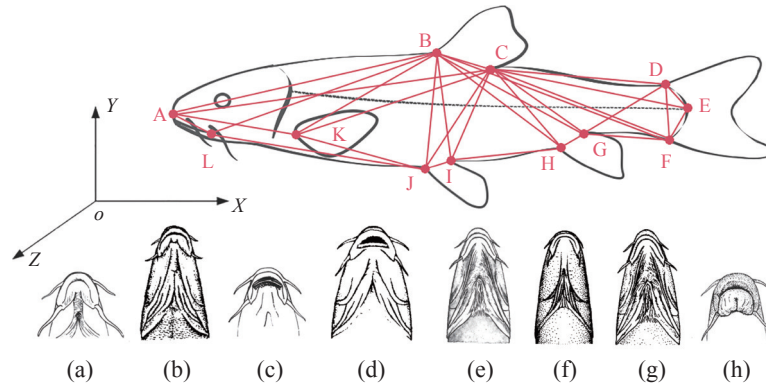


图 2 裂腹鱼类框架系统及唇部特征示意图

(a)(b)厚唇裂腹鱼, (c)(d)宽口裂腹鱼, (e)-(g)塔里木裂腹鱼, (h)重唇裂腹鱼, 其中, (a)、(c)、(h)引自《新疆鱼类志》<sup>[4]</sup>, (e)引自《中国鲤科鱼类志(上卷)》<sup>[23]</sup>, (b)(g)引自《中国动物志·硬骨鱼纲·鲤形目(下卷)》<sup>[24]</sup>, (d)(f)引自《青藏高原鱼类》<sup>[25]</sup>; A. 吻前端, B. 背鳍起点, C. 背鳍末端, D. 尾鳍背部起点, E. 侧线末端, F. 尾鳍腹部末端, G. 臀鳍末端, H. 臀鳍起点, I. 腹鳍末端, J. 腹鳍起点, K. 胸鳍起点, L. 口裂下缘。

Fig. 2 Truss network and lip features of Schizothoracinae

(a)(b). *S. irregularis*, (c)(d). *S. eurystomus*, (e)-(g). *S. biddulphi*, (h) *S. barbatus*. (a)(c)(h) were quoted from the “Fishes from Xinjiang”<sup>[4]</sup>, (e) was quoted from the “Fauna of Cyprinidae in China I”<sup>[23]</sup>, (b)(g) were quoted from the “FAUNA SINICA·Osteichthyes·Cypriniformes III”<sup>[24]</sup>, (d)(f) were quoted from the “The fishes of the Qinghai-Xizang Plateau”<sup>[25]</sup>; A. tip of snout, B. origin of dorsal fin, C. termination of the dorsal fin, D. dorsal origin of caudal fin, E. end of lateral line, F. ventral origin of caudal fin, G. end of anal fin, H. origin of anal fin, I. end of pelvic fin, J. origin of pelvic fin, K. origin of pectoral fin, L. lower edge of mouth.

### 1.3 数据分析

数据预处理 ① 数据筛选。分别对 340 组形态及 154 组框架原始数据进行异常值检验。依照茎叶图 (Blom's Formula Stem-and-Leaf Plot) 剔除

偏离箱体边缘 3 倍及以上距离的异常数据, 获得形态数据 300 组, 框架数据 144 组, 所获数据矩阵无缺失值 (表 1)。

表 1 叶尔羌河流域裂腹鱼类样品信息表

Tab. 1 The samples information of Schizothoracinae in the Yarkand River Basin of Xinjiang

| 类别<br>category                          | 厚唇裂腹鱼<br><i>S. irregularis</i> | 宽口裂腹鱼<br><i>S. eurystomus</i> | 塔里木裂腹鱼<br><i>S. biddulphi</i> | 重唇裂腹鱼<br><i>S. barbatus</i> | 合计 total |
|---|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------|
| 形态数据<br>morphometric data               | 95                             | 73                            | 97                            | 35                          | 300      |
| 样本量/尾<br>sample size                    |                                |                               |                               |                             |          |
| 采集时间<br>capture time                    | 2019 & 2020                    |                               |                               |                             |          |
| 体长范围(均值)/mm<br>body length range (mean) | 41.50~258.38<br>(133.14)       | 93.60~239.60<br>(155.98)      | 50.19~212.20<br>(118.78)      | 105.60~210.80<br>(154.31)   |          |
| 框架数据<br>box-truss data                  | 40                             | 30                            | 52                            | 22                          | 144      |
| 样本量/尾<br>sample size                    |                                |                               |                               |                             |          |
| 采集时间<br>capture time                    | 2020                           |                               |                               |                             |          |
| 体长范围(均值)/mm<br>body length range (mean) | 72.91~227.93<br>(142.13)       | 107.22~222.10<br>(171.36)     | 69.34~262.50<br>(142.84)      | 115.12~314.50<br>(163.45)   |          |

② 数据标准化。因鱼体外部形态特征受其大小影响<sup>[26]</sup>, 为降低个体差异影响, 采用相对生长测定法 (allometric method)<sup>[27]</sup> 对原始形态学测量指标进行标准化<sup>[28]</sup>, 公式如下:

$$M_{adj} = M (L_s/L_0)^b$$

式中,  $M$  为原始形态测量数据;  $M_{adj}$  为原始形态测量数据标准化后的数值;  $b$  为各样本  $\lg M$  对

$\lg L_0$  之斜率;  $L_0$  为各样品的体长;  $L_s$  为本组样品体长均值。数据标准化效果通过检验标准化后数据与体长的相关性来验证<sup>[29]</sup>, 文中不作赘述。

单因素方差分析 ① 正态检验与变换。使用 SPSS 20.0 进行正态性检验, 因样本量小于 5 000, 依据 Shapiro-Wilk 检验值 ( $P=0.05$ ) 确定假设结果。若检验不符合正态分布, 使用个案排秩 (Rank Cases) 对所有分析数据进行正态转换, 转换

类型依据正态得分 (normal scores), 比例估计选用 Blom。

② 数据分析。利用单因素方差分析 (ANOVA) 分别对 4 种裂腹鱼形态及框架参数差异进行显著性分析。方差齐性依据方差同质性检验结果确定 ( $P=0.05$ ), 当变量满足方差齐性时, 采用最小显著性差异法 (LSD) 两两对比分析, 当变量不满足方差齐性时, 采用 Tamhane's T2 法。

主成分分析 采用主成分分析法 (PCA) 分别对形态与框架指标降维, 减少变量冗余<sup>[30]</sup>。利用 KOM-Bartlett's 球度检验确定数据适用性。利用 Origin2018 建立相关系数矩阵, 以主成分法提取公因子, 计算各主成分的特征值和贡献率, 以“特征值”大于 1 作为主成分选择标准。

逐步判别分析 采用逐步判别函数分析 (DFA) 方法分析不同鱼种之间个体相似程度<sup>[31]</sup>, 通过筛选指标建立判别函数, 计算综合判别成功率, 并交叉验证其判别准确率。

聚类分析 利用性状均值基于 Pearson 相关性采用组间联接法构建聚类树, 用于种间区分。

## 2 结果

### 2.1 单因子方差分析

形态数据分析 对形态数据进行正态分布检验, 结果显示 A3、A7、A10~11 及 A13~17 共 9 个参数不符合正态分布, 因此对所有分析数据进行正态转化。对不具有方差齐性的 A3、A8~9、A11 和 A14 共 5 个变量采用 Tamhane's T2 法进行两两比较, 剩余变量采用 LSD 法。

结果显示裂腹鱼类 17 组形态参数间差异极显著 ( $P<0.01$ )。其中, A5~6、A8、A11、A13 及 A16~17 共计 7 个参数同时在 4 种裂腹鱼间存在显著差异, 主要位于鱼体头部及前躯干部; A1~2、A4、A9~10、A12 及 A14 共计 7 个参数最多在 3 种裂腹鱼间存在显著差异; 其余参数最多在 2 种裂腹鱼间存在显著性差异 ( $P<0.05$ )。4 种裂腹鱼两两对比共计 6 组, 其中厚唇与重唇裂腹鱼、塔里木与重唇裂腹鱼两组在 17 组参数中均存在显著差异; 而厚唇与塔里木裂腹鱼间仅有 8 个参数存在显著差异, 为差异最小组 (表 2)。

表 2 叶尔羌河流域裂腹鱼类形态特征变量单因子方差分析

Tab. 2 ANOVA of morphometric data of Schizothoracinae in the Yarkand River Basin

| 变量<br>variable | 厚唇裂腹鱼<br><i>S. irregularis</i> | 宽口裂腹鱼<br><i>S. eurystomus</i> | 塔里木裂腹鱼<br><i>S. biddulphi</i> | 重唇裂腹鱼<br><i>S. barbatus</i>   | <i>F</i> | 显著性<br>significance |
|----------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------|---------------------|
| A1             | 23.924 7±3.561 7 <sup>c</sup>  | 28.257 1±3.107 1 <sup>a</sup> | 25.171 1±3.603 6 <sup>b</sup> | 28.569 7±2.923 9 <sup>a</sup> | 31.029   | 0.000               |
| A2             | 16.078 3±2.770 9 <sup>c</sup>  | 18.882 3±2.733 1 <sup>b</sup> | 15.925 9±2.981 6 <sup>c</sup> | 20.501 7±3.183 1 <sup>a</sup> | 34.726   | 0.000               |
| A3             | 25.427 5±4.079 2 <sup>b</sup>  | 30.209 7±2.950 1 <sup>a</sup> | 25.771 8±4.822 5 <sup>b</sup> | 31.513 4±3.664 4 <sup>a</sup> | 36.297   | 0.000               |
| A4             | 10.781 6±1.928 6 <sup>c</sup>  | 12.692 2±1.805 2 <sup>b</sup> | 11.010 6±1.883 1 <sup>c</sup> | 13.462 3±1.647 1 <sup>a</sup> | 29.635   | 0.000               |
| A5             | 60.833 8±3.596 1 <sup>d</sup>  | 71.111 4±3.113 1 <sup>b</sup> | 67.528 6±3.678 1 <sup>c</sup> | 80.708 9±2.689 9 <sup>a</sup> | 320.981  | 0.000               |
| A6             | 55.460 3±6.942 3 <sup>d</sup>  | 68.752 2±5.503 1 <sup>b</sup> | 61.809 6±5.275 5 <sup>c</sup> | 77.274 6±6.143 5 <sup>a</sup> | 139.307  | 0.000               |
| A7             | 15.813 9±3.082 6 <sup>b</sup>  | 17.979 5±2.636 4 <sup>a</sup> | 15.086 3±2.772 5 <sup>b</sup> | 18.445 1±2.665 2 <sup>a</sup> | 21.973   | 0.000               |
| A8             | 29.563 9±2.926 4 <sup>d</sup>  | 33.139 7±1.990 1 <sup>b</sup> | 30.827 9±2.729 5 <sup>c</sup> | 39.341 4±2.940 2 <sup>a</sup> | 125.870  | 0.000               |
| A9             | 17.383 6±1.704 0 <sup>c</sup>  | 19.722 9±1.800 4 <sup>b</sup> | 18.085 9±2.193 8 <sup>c</sup> | 21.604 3±1.890 7 <sup>a</sup> | 51.834   | 0.000               |
| A10            | 15.428 2±2.344 4 <sup>c</sup>  | 17.909 3±2.126 9 <sup>b</sup> | 15.274 9±2.222 2 <sup>c</sup> | 20.039 4±2.484 8 <sup>a</sup> | 54.171   | 0.000               |
| A11            | 9.625 6±2.063 0 <sup>c</sup>   | 10.631 6±1.580 9 <sup>b</sup> | 8.597 1±1.939 8 <sup>d</sup>  | 14.880 3±2.656 8 <sup>a</sup> | 88.547   | 0.000               |
| A12            | 14.913 0±2.486 5 <sup>c</sup>  | 16.837 3±1.798 6 <sup>b</sup> | 14.837 7±2.316 5 <sup>c</sup> | 19.263 4±2.371 5 <sup>a</sup> | 42.932   | 0.000               |
| A13            | 5.218 2±0.960 3 <sup>d</sup>   | 5.854 7±0.636 4 <sup>b</sup>  | 5.503 6±0.757 4 <sup>c</sup>  | 6.319 1±0.732 6 <sup>a</sup>  | 19.595   | 0.000               |
| A14            | 9.171 7±2.038 6 <sup>c</sup>   | 10.954 5±1.816 8 <sup>b</sup> | 9.797 0±2.245 7 <sup>c</sup>  | 13.079 1±2.495 8 <sup>a</sup> | 33.280   | 0.000               |
| A15            | 6.526 1±1.835 5 <sup>b</sup>   | 6.100 8±1.696 2 <sup>b</sup>  | 6.249 7±2.061 2 <sup>b</sup>  | 7.687 7±2.132 4 <sup>a</sup>  | 6.072    | 0.001               |
| A16            | 4.450 1±1.696 9 <sup>d</sup>   | 6.786 8±2.311 3 <sup>b</sup>  | 5.072 8±1.621 6 <sup>c</sup>  | 8.250 0±2.364 3 <sup>a</sup>  | 44.934   | 0.000               |
| A17            | 4.506 2±1.348 2 <sup>c</sup>   | 5.070 3±1.311 8 <sup>b</sup>  | 4.057 2±1.239 4 <sup>d</sup>  | 6.354 3±1.471 0 <sup>a</sup>  | 28.573   | 0.000               |

注: 肩标不同字母表示差异显著, 下同。

Notes: Different letters in shoulder markers indicate significant differences, the same below.

框架数据分析 对框架数据进行正态分布检验, 结果显示  $B_2$ 、 $B_5\sim 9$ 、 $B_{11}\sim 12$ 、 $B_{14}\sim 17$ 、 $B_{19}\sim 20$ 、 $B_{22}\sim 24$  及  $B_{28}\sim 29$  共 19 个参数不符合正态分布, 故对所有分析数据进行正态转化。对不具有方差齐性的  $B_4$ 、 $B_8$  和  $B_{18}$  共 3 个变量采用 Tamhane's T2 法进行两两比较, 剩余变量采用 LSD 法。

分析结果显示, 裂腹鱼类框架参数除  $B_{21}$  外, 其余 29 组差异均显著 ( $P<0.01$ )。其中,  $B_6$  和  $B_{16}$  两项同时在 4 种裂腹鱼中存在显著差异, 主要反

映鱼体后躯干部形态 (前后躯干部以背鳍前基点为界);  $B_1\sim 3$ 、 $B_7\sim 15$ 、 $B_{17}$ 、 $B_{19}\sim 20$ 、 $B_{23}$ 、 $B_{26}\sim 27$  及  $B_{30}$  共计 19 个参数至多在 3 种裂腹鱼间存在显著差异, 主要集中在  $A$ 、 $B$ 、 $C$  3 个解剖同源点;  $B_4\sim 5$ 、 $B_{18}$ 、 $B_{22}$ 、 $B_{24}\sim 25$  及  $B_{28}\sim 29$  共 8 个参数至多在 2 种裂腹鱼间存在显著性差异 ( $P<0.05$ )。两两对比结果显示, 宽口与塔里木裂腹鱼种间差异最大, 30 项参数均显著差异; 厚唇与重唇裂腹鱼差异最小, 仅涉及 10 项参数 (表 3)。

表 3 叶尔羌河流域裂腹鱼类框架数据变量单因子方差分析

Tab. 3 ANOVA of Box-truss data of Schizothoracinae in the Yarkand River Basin

| 变量<br>variable | 厚唇裂腹鱼<br><i>S. irregularis</i> | 宽口裂腹鱼<br><i>S. eurystomus</i>  | 塔里木裂腹鱼<br><i>S. biddulphi</i>  | 重唇裂腹鱼<br><i>S. barbatus</i>    | $F$    | 显著性<br>significance |
|----------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------|---------------------|
| $B_1$          | 73.975 0±7.168 3 <sup>b</sup>  | 82.324 7±7.067 0 <sup>a</sup>  | 67.355 0±8.308 1 <sup>c</sup>  | 81.360 9±5.267 1 <sup>a</sup>  | 33.730 | 0.000               |
| $B_2$          | 91.513 3±8.444 6 <sup>c</sup>  | 102.242 3±8.094 4 <sup>a</sup> | 83.337 5±10.726 9 <sup>e</sup> | 86.152 3±27.730 9 <sup>b</sup> | 27.483 | 0.000               |
| $B_3$          | 36.982 3±3.258 6 <sup>b</sup>  | 38.110 0±3.011 0 <sup>b</sup>  | 32.777 3±4.220 9 <sup>c</sup>  | 41.114 1±2.978 3 <sup>a</sup>  | 36.472 | 0.000               |
| $B_4$          | 9.611 0±1.218 3 <sup>a</sup>   | 9.580 0±1.785 4 <sup>a</sup>   | 7.973 5±1.692 8 <sup>b</sup>   | 10.524 1±2.410 2 <sup>a</sup>  | 14.939 | 0.000               |
| $B_5$          | 17.819 8±2.265 5 <sup>b</sup>  | 20.298 7±2.945 1 <sup>a</sup>  | 16.942 9±4.027 3 <sup>b</sup>  | 16.835 5±2.337 7 <sup>b</sup>  | 9.723  | 0.000               |
| $B_6$          | 69.764 5±8.427 8 <sup>c</sup>  | 79.138 0±7.715 0 <sup>a</sup>  | 64.704 4±10.292 5 <sup>d</sup> | 74.150 0±5.218 2 <sup>b</sup>  | 22.786 | 0.000               |
| $B_7$          | 48.200 0±7.854 7 <sup>b</sup>  | 56.794 0±5.611 4 <sup>a</sup>  | 45.558 3±7.884 1 <sup>c</sup>  | 50.123 6±7.639 5 <sup>b</sup>  | 22.253 | 0.000               |
| $B_8$          | 42.858 8±4.270 6 <sup>bc</sup> | 49.375 7±5.387 5 <sup>a</sup>  | 40.296 9±7.248 3 <sup>c</sup>  | 43.910 5±2.463 4 <sup>b</sup>  | 18.349 | 0.000               |
| $B_9$          | 28.034 8±2.648 3 <sup>b</sup>  | 30.951 7±3.576 3 <sup>a</sup>  | 25.713 8±4.258 7 <sup>c</sup>  | 28.591 8±3.456 5 <sup>b</sup>  | 14.692 | 0.000               |
| $B_{10}$       | 27.013 5±2.616 7 <sup>b</sup>  | 29.993 7±3.696 5 <sup>a</sup>  | 24.870 0±4.460 9 <sup>c</sup>  | 27.177 7±3.492 2 <sup>b</sup>  | 12.176 | 0.000               |
| $B_{11}$       | 42.169 0±4.173 3 <sup>b</sup>  | 49.525 7±7.630 7 <sup>a</sup>  | 39.792 9±6.385 3 <sup>c</sup>  | 45.809 5±4.408 6 <sup>a</sup>  | 22.980 | 0.000               |
| $B_{12}$       | 67.268 3±6.966 5 <sup>b</sup>  | 74.890 7±6.321 9 <sup>a</sup>  | 61.915 0±7.833 2 <sup>c</sup>  | 69.337 7±8.634 8 <sup>b</sup>  | 25.749 | 0.000               |
| $B_{13}$       | 47.425 3±7.015 3 <sup>b</sup>  | 53.846 7±5.939 7 <sup>a</sup>  | 43.927 3±7.068 0 <sup>c</sup>  | 50.728 2±5.475 9 <sup>a</sup>  | 16.978 | 0.000               |
| $B_{14}$       | 56.046 2±6.599 3 <sup>b</sup>  | 62.879 7±6.463 7 <sup>a</sup>  | 50.803 1±8.349 5 <sup>c</sup>  | 59.266 4±4.072 5 <sup>ab</sup> | 23.609 | 0.000               |
| $B_{15}$       | 50.351 8±6.317 4 <sup>b</sup>  | 58.031 3±5.684 5 <sup>a</sup>  | 46.450 6±7.447 5 <sup>c</sup>  | 55.097 7±5.436 7 <sup>a</sup>  | 23.746 | 0.000               |
| $B_{16}$       | 31.493 5±2.978 2 <sup>c</sup>  | 36.818 0±4.288 9 <sup>a</sup>  | 29.176 2±5.486 7 <sup>d</sup>  | 34.541 8±2.982 2 <sup>b</sup>  | 27.342 | 0.000               |
| $B_{17}$       | 26.456 3±2.939 8 <sup>bc</sup> | 30.576 7±4.075 0 <sup>a</sup>  | 25.091 7±4.830 0 <sup>c</sup>  | 27.701 4±3.222 2 <sup>b</sup>  | 12.380 | 0.000               |
| $B_{18}$       | 25.664 0±2.098 2 <sup>b</sup>  | 30.038 0±3.733 0 <sup>a</sup>  | 24.857 1±4.285 0 <sup>b</sup>  | 27.204 1±3.758 9 <sup>b</sup>  | 15.176 | 0.000               |
| $B_{19}$       | 27.844 8±3.177 8 <sup>bc</sup> | 32.664 7±4.121 2 <sup>a</sup>  | 26.400 0±4.831 5 <sup>c</sup>  | 29.085 5±3.660 1 <sup>b</sup>  | 15.820 | 0.000               |
| $B_{20}$       | 55.338 5±5.699 0 <sup>c</sup>  | 65.603 0±6.919 9 <sup>a</sup>  | 53.426 3±8.560 0 <sup>c</sup>  | 59.706 8±5.949 0 <sup>b</sup>  | 23.628 | 0.000               |
| $B_{21}$       | 11.419 0±2.092 0 <sup>ab</sup> | 12.164 7±2.131 8 <sup>a</sup>  | 10.596 5±2.991 6 <sup>b</sup>  | 11.515 5±2.459 9 <sup>ab</sup> | 2.548  | 0.058               |
| $B_{22}$       | 13.477 0±1.496 0 <sup>bc</sup> | 15.261 0±2.187 1 <sup>a</sup>  | 12.719 2±2.755 0 <sup>c</sup>  | 14.145 0±1.926 0 <sup>ab</sup> | 8.665  | 0.000               |
| $B_{23}$       | 24.801 3±4.936 5 <sup>b</sup>  | 30.788 7±5.522 6 <sup>a</sup>  | 22.052 3±5.667 0 <sup>c</sup>  | 26.830 0±6.075 7 <sup>b</sup>  | 18.480 | 0.000               |
| $B_{24}$       | 10.851 5±2.142 9 <sup>a</sup>  | 11.527 0±2.360 0 <sup>a</sup>  | 9.549 0±2.436 7 <sup>b</sup>   | 12.239 5±4.189 1 <sup>a</sup>  | 7.389  | 0.000               |
| $B_{25}$       | 20.514 5±4.809 8 <sup>bc</sup> | 24.902 3±5.137 8 <sup>a</sup>  | 18.731 2±5.103 0 <sup>c</sup>  | 22.737 3±3.831 2 <sup>ab</sup> | 11.523 | 0.000               |
| $B_{26}$       | 9.500 5±1.439 8 <sup>b</sup>   | 10.719 3±1.921 7 <sup>a</sup>  | 8.601 0±1.671 9 <sup>c</sup>   | 10.446 4±1.698 0 <sup>ab</sup> | 11.895 | 0.000               |
| $B_{27}$       | 29.937 5±4.343 7 <sup>b</sup>  | 33.641 0±4.946 8 <sup>a</sup>  | 27.724 0±5.282 5 <sup>c</sup>  | 31.214 1±4.058 8 <sup>b</sup>  | 10.595 | 0.000               |
| $B_{28}$       | 5.976 8±0.921 2 <sup>bc</sup>  | 6.642 3±1.482 7 <sup>a</sup>   | 5.615 2±1.425 7 <sup>c</sup>   | 6.466 4±1.379 7 <sup>ab</sup>  | 4.888  | 0.003               |
| $B_{29}$       | 40.382 5±4.016 6 <sup>bc</sup> | 45.573 0±5.864 9 <sup>a</sup>  | 38.454 8±6.568 6 <sup>c</sup>  | 42.481 4±8.762 4 <sup>ab</sup> | 11.770 | 0.000               |
| $B_{30}$       | 67.440 1±6.143 3 <sup>b</sup>  | 74.229 3±6.008 9 <sup>a</sup>  | 62.057 9±7.891 9 <sup>c</sup>  | 72.294 1±5.211 0 <sup>a</sup>  | 31.225 | 0.000               |

### 2.2 主成分分析

形态及框架数据 KMO 检验值均接近 1, 极适合 PCA 分析; Bartlett 球形度检验  $P$  值均小于 0.05, 拒绝检验的零假设 (表 4)。所用数据矩阵通过检验, 可提取有效主成分用于统计分析。

表 4 两组数据矩阵的 KMO 和 Bartlett 检验

**Tab. 4 The KMO and Bartlett test of two sets of data matrix**

| 类别<br>category        | 形态数据<br>morphometric data | 框架数据<br>box-truss data |
|-----------------------|---------------------------|------------------------|
| Kaiser-Meyer-Olkin 度量 | 0.931                     | 0.952                  |
| Bartlett 球形度检验显著性     | 0.000                     | 0.000                  |

**形态数据分析** 形态数据主成分分析结果显示, 前 2 个主成分累计贡献率为 65.59%, 特征值分别为 9.77 和 1.38。PC1 贡献率为 57.46%, 与各参数载荷值正相关 (橙色轴), A2 和 A8~A12 为该成分的主要贡献参数, 主要反映鱼类头部特征; PC2 贡献率为 8.14%, 与各参数因子载荷值双向相关, 该成分与 A1、A6 和 A15~A16 高度相关, 贡献最大性状为口裂, 其次为背尾距和体高。散点图结果显示, PC1 轴仅重唇裂腹鱼较为独立, 其余 3 种重叠程度较高, PC2 轴上均相互重叠 (图 3)。

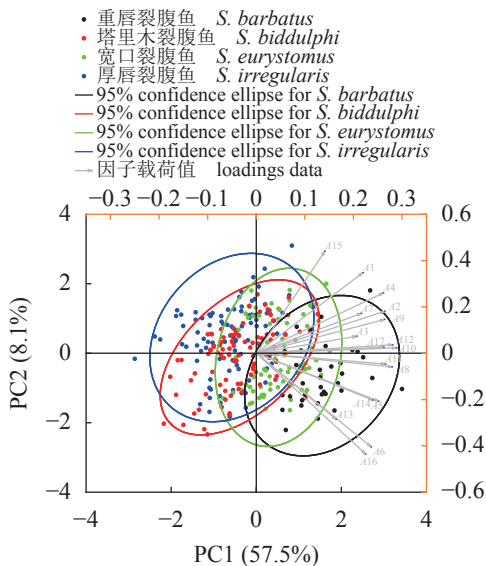


图 3 裂腹鱼类形态数据主成分分析图

Fig. 3 Principal component analysis of morphometric data for Schizothoracinae

**框架数据分析** 框架数据主成分分析结果显示, 前 2 个主成分累计贡献率达到 75.66%, 特征值分别为 21.03 和 1.67, 即表明前两个主成分

即可表明 4 种裂腹鱼 75.66% 的个体差异。第 1 主成分贡献率为 70.10%, 与各参数载荷值正相关, 但各参数相互之间差异不明显, 其中 B6、B8 和 B16 对 PC1 贡献相对较大, 所对应性状主要体现在鱼类后躯干部; 第 2 主成分贡献率为 5.57%, 与各参数因子载荷值双向相关, B21 和 B23~B25 对该成分贡献较大, 主要反映鱼类尾柄性状。散点图结果显示, 4 种裂腹鱼在 2 个主成分轴均存在明显重叠, 其中宽口裂腹鱼与塔里木裂腹鱼在 PC1 轴上有分离趋势, 厚唇裂腹鱼在 PC2 轴上存在部分分离现象 (图 4)。

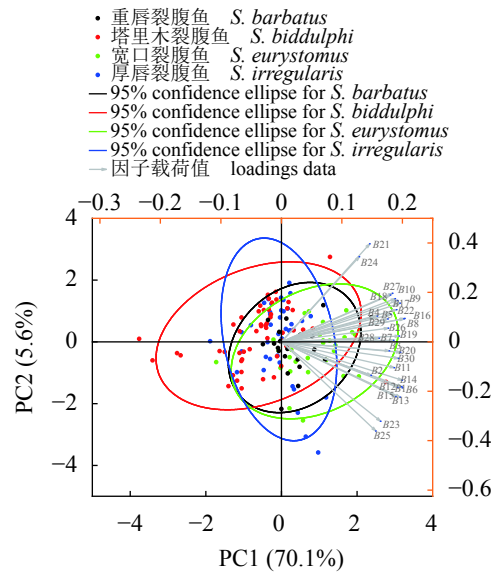


图 4 裂腹鱼类框架数据主成分分析图

Fig. 4 Principal component analysis of Box-truss data for Schizothoracinae

### 2.3 逐步判别分析

**形态数据分析** 形态数据分析结果表明, 前 3 个判别函数可解释所有变异, Wilks'  $\lambda$  检验显著性均小于 0.05, 表明 3 个判别函数显著成立, 均具统计学意义。所获得的 3 个判别函数分别解释了 86.6%、10.1% 和 3.4% 的种间差异 (表 5)。

除去未参与分析参数, A5 和 A6 对判别函数 1 (DF1) 贡献率较高, 主要反映鱼体背部距离; A11 和 A17 对 DF2 贡献较为明显, 反映鱼类头部特征; A7、A3 和 A1 为 DF3 的主要贡献参数, 所反映特征分别为尾鳍基长、尾柄长和体高 (表 6)。前 2 个判别函数解释了 96.6% 的样本差异, 故以 DF1 为 x 轴、DF2 为 y 轴绘制散点图。结果显示, 4 种裂腹鱼相对独立, 宽口裂腹鱼与塔里木裂腹鱼相对较近 (图 5)。

表 5 判别函数特征值和 Wilks' λ 检验分析结果

Tab. 5 The eigenvalues of functions and results of Wilks' λ tests

| 函数<br>function | 特征值 eigenvalues    |                  |                    | 函数检验<br>test of function(s) | Wilks' λ |                  |       |                     |
|----------------|--------------------|------------------|--------------------|-----------------------------|----------|------------------|-------|---------------------|
|                | 特征值<br>eigenvalues | 方差/%<br>variance | 累积/%<br>cumulative |                             | Wilks' λ | 卡方<br>Chi-square | $d_f$ | 显著性<br>significance |
| DF1            | 5.512 <sup>a</sup> | 86.6             | 86.6               | DF1 - DF3                   | 0.077    | 739.498          | 51    | 0.000               |
| DF2            | 0.640 <sup>a</sup> | 10.1             | 96.6               | DF2 - DF3                   | 0.502    | 198.965          | 32    | 0.000               |
| DF3            | 0.215 <sup>a</sup> | 3.4              | 100.0              | DF3                         | 0.823    | 56.169           | 15    | 0.000               |

注: a. 分析中使用前3个典型判别式函数, 表8同。

Notes: a. First 3 canonical discriminant functions were used in the analysis, the same as fig.8.

表 6 裂腹鱼类形态数据对判别函数的贡献率

Tab. 6 The morphometric data contributions to discriminant functions of Schizothoracinae

| 变量<br>variable   | 判别函数<br>function |        |        |
|------------------|------------------|--------|--------|
|                  | DF1              | DF2    | DF3    |
| A1               | 0.233            | 0.145  | 0.530* |
| A2 <sup>a</sup>  | 0.331            | 0.336  | 0.428* |
| A3               | 0.239            | 0.333  | 0.544* |
| A4 <sup>a</sup>  | 0.256            | 0.470* | 0.283  |
| A5               | 0.736*           | 0.271  | -0.167 |
| A6               | 0.529*           | 0.330  | 0.217  |
| A7               | 0.138            | 0.368  | 0.561* |
| A8 <sup>a</sup>  | 0.292            | 0.536* | 0.079  |
| A9 <sup>a</sup>  | 0.268            | 0.394* | 0.187  |
| A10 <sup>a</sup> | 0.359            | 0.481* | 0.252  |
| A11              | 0.234            | 0.880* | 0.085  |
| A12 <sup>a</sup> | 0.300            | 0.552* | 0.186  |
| A13 <sup>a</sup> | 0.086            | 0.247* | -0.010 |
| A14 <sup>a</sup> | 0.311            | 0.427* | 0.158  |
| A15 <sup>a</sup> | 0.108            | 0.302* | 0.071  |
| A16              | 0.274*           | 0.259  | 0.234  |
| A17              | 0.154            | 0.547* | 0.144  |

注: \*. 每个变量和任意判别式函数间最大的绝对相关性; a. 该变量不在分析中使用。

Notes: \*. Denotes the largest correlation between each variable and discriminant functions; a. this variable is not used in the analysis.

对形态数据进行判别分析, 将筛选出的 8 个贡献较大的特征变量纳入判别方程, 依种建立判别公式如下:

$$Y_{S. irregularis} = -0.682X_1 - 1.066X_2 - 5.734X_3 - 2.342X_4 + 0.721X_5 + 2.064X_6 - 0.19X_7 + 1.271X_8 - 5.41$$

$$Y_{S. eurystomus} = 0.602X_1 + 0.937X_2 + 2.548X_3 + 1.264X_4 + 0.140X_5 - 0.972X_6 + 0.400X_7 - 1.058X_8 - 2.744$$

$$Y_{S. biddulphi} = 0.246X_1 - 0.135X_2 + 1.221X_3 + 0.002X_4 - 0.350X_5 - 1.468X_6 + 0.274X_7 - 0.042X_8 - 1.868$$

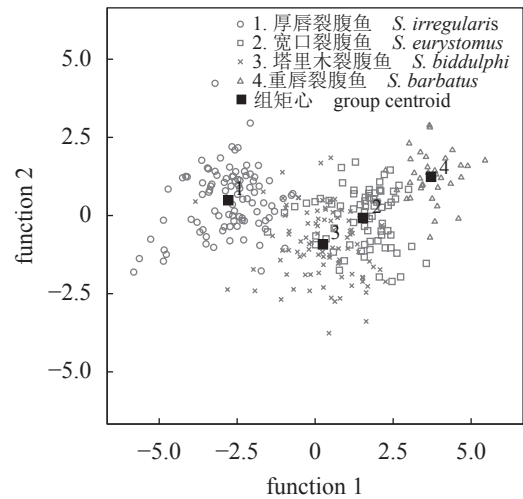


图 5 裂腹鱼类形态数据逐步判别分析散点图

Fig. 5 DFA scatter diagram of morphometric data used for Schizothoracinae

$$Y_{S. barbatus} = -0.087X_1 + 1.312X_2 + 6.867X_3 + 3.713X_4 - 1.280X_5 + 0.493X_6 - 1.077X_7 - 1.129X_8 - 9.186$$

式中,  $X_1 \sim X_8$  分别代表性状 A1、A3、A5~7、A11 和 A16~17。要判定物种, 即可将以上 8 个参数分别代入判别公式, Y 值最大者即为判定物种。

形态数据初始分组正确率为 85.7%, 交叉验证成功率为 83.7%。判别成功率最高为厚唇裂腹鱼, 为 95.8%, 最低为塔里木裂腹鱼, 为 75.3%; 宽口裂腹鱼与其他种均存在误判(表 7)。

框架数据分析 框架数据 DFA 分析结果表明, 前 3 个判别函数可解释所有变异, Wilks' λ 检验显著性均小于 0.05, 即 3 个判别函数显著成立, 均具统计学意义。所获得的 3 个判别函数分别解释了 63.3%、33.0% 和 3.7% 的种间差异(表 8)。

对 30 项框架参数判别分析表明, B2 和 B3 分别为 DF3 和 DF1 贡献较为明显, 均反映吻端与躯干距离; 所有参与分析变量均对 DF2 贡献较高, 反映 A、B 2 个解剖同源点水平和垂直变量(表 9)。DF1 和 DF2 解释了 96.3% 的样本差异(表 8), 以

表 7 裂腹鱼类形态数据判别分析结果

Tab. 7 The result of DFA of morphometric data for Schizothoracinae

|   | 判定组<br>judgment group          | 预测组<br>forecast groups      |                               |                               |                                | 合计<br>total |
|---|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------|
|   |                                | 厚唇裂腹鱼<br><i>S. barbatus</i> | 宽口裂腹鱼<br><i>S. eurystomus</i> | 塔里木裂腹鱼<br><i>S. biddulphi</i> | 重唇裂腹鱼<br><i>S. irregularis</i> |             |
| 初始分组/% (计数)<br>initial grouping (count) | 厚唇裂腹鱼<br><i>S. barbatus</i>    | 95.8 (91)                   | 0.0 (0)                       | 4.2 (4)                       | 0.0 (0)                        | 100.0 (95)  |
|   | 宽口裂腹鱼<br><i>S. eurystomus</i>  | 1.4 (1)                     | 82.2 (60)                     | 9.6 (7)                       | 6.8 (5)                        | 100.0 (73)  |
|   | 塔里木裂腹鱼<br><i>S. biddulphi</i>  | 5.2 (5)                     | 19.6 (19)                     | 75.3 (73)                     | 0.0 (0)                        | 100.0 (97)  |
|   | 重唇裂腹鱼<br><i>S. irregularis</i> | 0.0 (0)                     | 5.7 (2)                       | 0.0 (0)                       | 94.3 (33)                      | 100.0 (35)  |
| 交叉验证/% (计数)<br>cross-validation (count) | 厚唇裂腹鱼<br><i>S. barbatus</i>    | 94.7 (90)                   | 0.0 (0)                       | 5.3 (5)                       | 0.0 (0)                        | 100.0 (95)  |
|   | 宽口裂腹鱼<br><i>S. eurystomus</i>  | 1.4 (1)                     | 79.5 (58)                     | 11.0 (8)                      | 8.2 (6)                        | 100.0 (73)  |
|   | 塔里木裂腹鱼<br><i>S. biddulphi</i>  | 8.2 (8)                     | 19.6 (19)                     | 72.2 (70)                     | 0.0 (0)                        | 100.0 (97)  |
|   | 重唇裂腹鱼<br><i>S. irregularis</i> | 0.0 (0)                     | 5.7 (2)                       | 0.0 (0)                       | 94.3 (33)                      | 100.0 (35)  |

表 8 判别函数特征值和 Wilks' λ 检验分析结果

Tab. 8 Eigenvalues of functions and results of Wilks' λ tests

| 函数<br>function | 特征值 eigenvalues    |                  |                    | 函数检验<br>test of function | Wilks' λ |                  |           |                     |
|----------------|--------------------|------------------|--------------------|--------------------------|----------|------------------|-----------|---------------------|
|                | 特征值<br>eigenvalues | 方差/%<br>variance | 累积/%<br>cumulative |                          | Wilks' λ | 卡方<br>Chi-square | <i>df</i> | 显著性<br>significance |
| DF1            | 1.620 <sup>a</sup> | 63.3             | 63.3               | DF1 - DF3                | 0.189    | 229.877          | 18        | 0.000               |
| DF2            | 0.845 <sup>a</sup> | 33.0             | 96.3               | DF2 - DF3                | 0.495    | 96.939           | 10        | 0.000               |
| DF3            | 0.094 <sup>a</sup> | 3.7              | 100.0              | DF3                      | 0.914    | 12.450           | 4         | 0.014               |

前 2 个函数绘制散点图, 结果显示, 4 种裂腹鱼框架分析结果相对独立, 厚唇裂腹鱼与塔里木裂腹鱼相对较近 (图 6)。

对框架矩阵进行判别分析, 将所筛选的 6 个变量纳入判别方程, 依种建立判别公式如下:

$$Y'_{S. irregularis} = -0.256X'_1 + 0.211X'_2 + 0.976X'_3 + 0.371X'_4 - 0.800X'_5 - 0.497X'_6 - 10.564$$

$$Y'_{S. eurystomus} = 0.435X'_1 + 10.695X'_2 - 20.387X'_3 - 0.656X'_4 + 10.255X'_5 + 10.305X'_6 - 20.936$$

$$Y'_{S. biddulphi} = -10.171X'_1 - 0.144X'_2 - 10.099X'_3 + 10.217X'_4 + 0.511X'_5 - 0.861X'_6 - 20.262$$

$$Y'_{S. barbatus} = 20.640X'_1 - 20.355X'_2 + 40.078X'_3 - 20.654X'_4 - 10.462X'_5 + 10.158X'_6 - 50.025$$

式中,  $X'_1 \sim X'_6$  分别代表性状  $B1 \sim 3$ 、 $B5$ 、 $B7$ 、 $B16$ 。

框架数据初始分组正确率为 75.7%, 交叉验证成功率为 70.8%。重唇裂腹鱼判别成功率最高, 为 90.9%, 厚唇裂腹鱼最低, 仅 57.5%; 另外, 仅塔里木裂腹鱼和重唇裂腹鱼之间不存在误判现象 (表 10)。

## 2.4 聚类分析

基于组间 Pearson 相关性的系统聚类分析结果显示, 2 个数据体系结果极为相似, 均分为 2 大分支, 其中重唇裂腹鱼单独成一支, 塔里木裂腹鱼与厚唇裂腹鱼在形态上距离较近, 与宽口裂腹鱼次之 (图 7, 图 8)。

## 3 讨论

### 3.1 数据体系对比

由于数据测量标准的不同, 2 个数据体系在分析中的表现也有所差异。实验中形态学数据在整体参数利用率上明显高于框架数据。分析认为, 造成这一现象的主要原因是框架数据参数设置较多, 造成部分信息冗余。此外, 框架数据来源于同源点连线长度, 数据间具有一定的相关性, 因此参数可能存在解释能力相似而未纳入判断的情况。在解释种间差异方面, 形态数据反映的差异更为全面, 综合表现优于框架数据。分析认为,



表 9 裂腹鱼类框架数据对判别函数的贡献率

**Tab. 9 Box-truss data contributions to discriminant functions of Schizothoracinae**

| 变量<br>variable   | 判别函数<br>function |        |        |
|------------------|------------------|--------|--------|
|                  | DF1              | DF2    | DF3    |
| B1               | 0.480            | 0.638* | 0.239  |
| B2               | 0.250            | 0.732* | 0.610  |
| B3               | 0.648*           | 0.323  | 0.384  |
| B4 <sup>b</sup>  | 0.367*           | 0.238  | 0.180  |
| B5               | -0.031           | 0.484* | 0.301  |
| B6 <sup>b</sup>  | 0.0317           | 0.662* | 0.152  |
| B7               | 0.200            | 0.698* | -0.007 |
| B8 <sup>b</sup>  | 0.168            | 0.693* | 0.065  |
| B9 <sup>b</sup>  | 0.095            | 0.570* | 0.078  |
| B10 <sup>b</sup> | 0.152            | 0.544* | 0.114  |
| B11 <sup>b</sup> | 0.327            | 0.561* | 0.106  |
| B12 <sup>b</sup> | 0.371            | 0.635* | 0.311  |
| B13 <sup>b</sup> | 0.410            | 0.563* | 0.140  |
| B14 <sup>b</sup> | 0.425            | 0.622* | 0.112  |
| B15 <sup>b</sup> | 0.407            | 0.585* | 0.094  |
| B16              | 0.349            | 0.678* | -0.079 |
| B17 <sup>b</sup> | 0.217            | 0.611* | -0.094 |
| B18 <sup>b</sup> | 0.140            | 0.529* | -0.010 |
| B19 <sup>b</sup> | 0.217            | 0.573* | 0.108  |
| B20 <sup>b</sup> | 0.269            | 0.650* | 0.202  |
| B21 <sup>b</sup> | 0.257            | 0.346* | 0.083  |
| B22 <sup>b</sup> | 0.234            | 0.508* | 0.078  |
| B23 <sup>b</sup> | 0.248            | 0.449* | 0.102  |
| B24 <sup>b</sup> | 0.201            | 0.407* | 0.177  |
| B25 <sup>b</sup> | 0.272            | 0.357* | 0.097  |
| B26 <sup>b</sup> | 0.238            | 0.463* | 0.080  |
| B27 <sup>b</sup> | 0.330            | 0.458* | -0.074 |
| B28 <sup>b</sup> | 0.222            | 0.437* | 0.047  |
| B29 <sup>b</sup> | 0.312            | 0.575* | 0.207  |
| B30 <sup>b</sup> | 0.418            | 0.557* | 0.341  |

注: \*, 每个变量和任意判别式函数间最大的绝对相关性。b. 该变量不在分析中使用。

Notes: \*. Denotes the largest correlation between each variable and discriminant functions. b. This variable is not used in the analysis.

框架数据是仅能反应横纵信息的二维数据集, 而形态数据除长度和高度外还包括厚度数据, 由于裂腹鱼类外形相近, 数据维度的提升能够有效地增加数据的解释能力。章翊涵等<sup>[32]</sup>在关于多鳞四指马鲛 (*Eleutheronema rhadinum*) 种群区分的研究中表明, 几何形态学方法较传统形态学方法更为

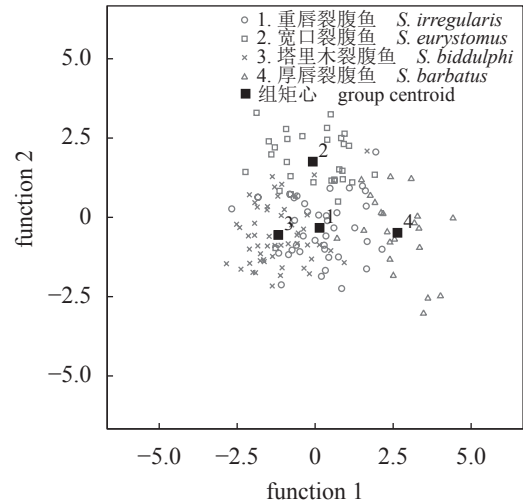


图 6 裂腹鱼类框架数据逐步判别分析散点图

Fig. 6 DFA scatter diagram of Box-truss data used for Schizothoracinae

全面, 结果与本实验结果不同, 造成这一结果的原因可能与其所采集的传统形态学参数均为平面二维数据有关。

### 3.2 种间差异

4 种裂腹鱼种间差异参数表现的生物学意义包括尾柄长、尾柄高、背鳍相对位置、臀鳍相对位置、头长、吻长、眼径、鼻孔间距和口裂等。鱼类尾部表型特征与其所适应的水流速度密切相关, 生活在较大流速的鱼类比生活在小流速水域的鱼类尾柄细长<sup>[33]</sup>。叶河发源于山脉, 海拔是影响河水流速最主要的因素, 裂腹鱼类主要聚居海拔为 1 300~2 700 m<sup>[9]</sup>, 但比对发现 4 种裂腹鱼尾柄长高比均值仅介于 2.341~2.380, 尾柄长高比数据区间难以有效对应鱼类垂直分布海拔, 但该结果在一定程度上印证了裂腹鱼类垂直分布存在重叠的现象, 与曹文宣等<sup>[3]</sup>认为的裂腹鱼类同一属内绝大多数中的主要栖息地段海拔范围比较集中的观点一致。由于后躯干部中尾柄差异较小, 因此造成差异的主要因素即为背鳍与尾鳍的相对位置 [后躯干差异主要集中于 BF(B6) 与 CG(B16)(表 3)]。鱼类背鳍司平衡, 作用为保持鱼体直立<sup>[16]</sup>, 其位置、长度和数量等多与鱼体体长有关。裂腹鱼类臀鳍相对位置的差异可能与其产卵场环境相关, 该类鱼在急流河川产卵, 产卵前亲鱼通过臀鳍和尾鳍在河床掘出小坑<sup>[3]</sup>, 鱼类主要分布区河床底质及产卵场水文环境可能是造成这一差异的原因之一。此外, 背鳍、臀鳍及尾鳍的相对位置差异

表 10 裂腹鱼类框架数据判别分析结果

Tab. 10 Result of DFA of Box-truss data for Schizothoracinae

|   | 判定组<br>judgment group          | 预测组<br>forecast groups      |                               |                               |                                | 合计<br>total |
|---|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------|
|   |                                | 厚唇裂腹鱼<br><i>S. barbatus</i> | 宽口裂腹鱼<br><i>S. eurystomus</i> | 塔里木裂腹鱼<br><i>S. biddulphi</i> | 重唇裂腹鱼<br><i>S. irregularis</i> |             |
| 初始分组/% (计数)<br>initial grouping (count) | 厚唇裂腹鱼<br><i>S. barbatus</i>    | 57.5 (23)                   | 10.0 (4)                      | 20.0 (8)                      | 12.5 (5)                       | 100.0 (40)  |
|   | 宽口裂腹鱼<br><i>S. eurystomus</i>  | 10.0 (3)                    | 83.3 (25)                     | 3.3 (1)                       | 3.3 (1)                        | 100.0 (30)  |
|   | 塔里木裂腹鱼<br><i>S. biddulphi</i>  | 11.5 (6)                    | 9.6 (5)                       | 78.8 (41)                     | 0.0 (0)                        | 100.0 (52)  |
|   | 重唇裂腹鱼<br><i>S. irregularis</i> | 4.5 (1)                     | 4.5 (1)                       | 0.0 (0)                       | 90.9 (20)                      | 100.0 (22)  |
| 交叉验证/% (计数)<br>cross-validation (count) | 厚唇裂腹鱼<br><i>S. barbatus</i>    | 50.0 (20)                   | 12.5 (5)                      | 22.5 (9)                      | 15.0 (6)                       | 100.0 (40)  |
|   | 宽口裂腹鱼<br><i>S. eurystomus</i>  | 10.0 (3)                    | 80.0 (24)                     | 6.7 (2)                       | 3.3 (1)                        | 100.0 (30)  |
|   | 塔里木裂腹鱼<br><i>S. biddulphi</i>  | 13.5 (7)                    | 11.5 (6)                      | 75.0 (39)                     | 0.0 (0)                        | 100.0 (52)  |
|   | 重唇裂腹鱼<br><i>S. irregularis</i> | 9.1 (2)                     | 4.5 (1)                       | 0.0 (0)                       | 86.4 (19)                      | 100.0 (22)  |

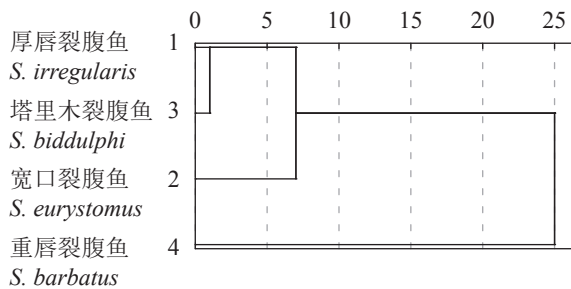


图 7 裂腹鱼类形态数据聚类分析图

Fig. 7 Cluster analysis diagram of Schizothoracinae based on morphometric data

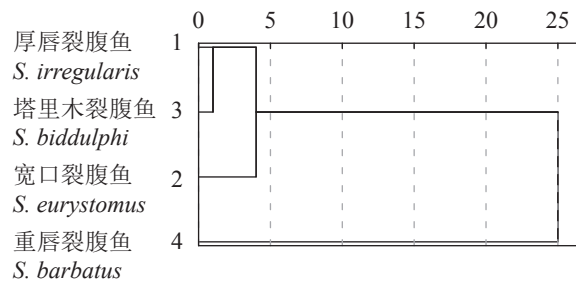


图 8 裂腹鱼类框架数据聚类分析

Fig. 8 Cluster analysis diagram of Schizothoracinae based on Box-truss data

与鱼类的生活环境、系统发育和演化有着密不可分的关系。鱼类头部差异(包括头长、吻长、眼径和鼻孔间距)主要与其头部骨骼结构相关, 鲃亚科鱼类在随青藏高原隆起过程中其身体结构也在长期的自然选择压力下逐步适应水域环境, 逐渐演化出相似的形态特征<sup>[34]</sup>, 但由于骨骼系统所受压力相对较小, 且裂腹鱼在重要骨骼形状上未发现明显区别<sup>[6]</sup>, 可能保留原鱼种的部分特征<sup>[35]</sup>, 因此塔河裂腹鱼类头部形态的显著差异可能与裂腹鱼类的演化相关。鱼类口裂差异与食性存在直接关系, 一般而言, 植食性鱼类口裂小于杂食性鱼类小于肉食性鱼类。厚唇裂腹鱼主要摄食无脊椎动物和硅藻, 宽口裂腹鱼则以浮游植物为主, 塔里木裂腹鱼主要摄食水生昆虫和浮游植物, 而重唇裂腹鱼主要摄食底栖生物和水生高等植物<sup>[5]</sup>, 裂腹鱼类食性的不同可能是造成其口裂差异的主要

原因。

#### 4 总结与展望

现有分类系统下塔河流域的裂腹鱼类表型差异较小, 尤其以同水域内的塔里木裂腹鱼和厚唇裂腹鱼为代表。杨天燕等<sup>[11]</sup>关于塔河各支流裂腹鱼类线粒体基因片段的分析结果显示, 4种裂腹鱼中塔里木裂腹鱼与厚唇裂腹鱼的聚类距离最远, 其后在分析和田河塔里木裂腹鱼和厚唇裂腹鱼的遗传差异中发现, 两者个体间存在交叉, 且没有明显界限<sup>[14-15]</sup>, 即表明4种裂腹鱼在分子水平上较为接近。海萨等<sup>[13]</sup>采用多个线粒体基因联合分析, 发现塔里木裂腹鱼与厚唇裂腹鱼聚在同一族群, 并认为, 塔河主要支流分布的4种裂腹鱼可能尚未达到物种分化程度, 仍属同一物种的不同亚种, 且种间存在基因交流。

裂腹鱼类的分类一直存在学术争议, 其所属的“科-属-种”学名虽有变更, 但基于形态学的分类系统在属及以上的分类单元均保持不变, 即隶属于鲤形目 (Cypriniformes) 鲤科 (Cyprinidae) 裂腹鱼亚科裂腹鱼属<sup>[36]</sup>。伍献文<sup>[23]</sup>与乐佩琦<sup>[24]</sup>基于下颌前缘角质的有无将下颌前缘有角质的种定为裂腹鱼亚属, 无角质的种定为裂尻鱼亚属, 而武云飞等<sup>[25]</sup>的亚属分类则与之相反, 且同时期的著作亦有未建立亚属分类单元的情况<sup>[4-5]</sup>。He 等与海萨等<sup>[13]</sup>基于线粒体基因的分析结果均不支持裂腹鱼类的亚属划分。因此, 就目前而言, 分子生物学与形态学的联合分析是解决分类争议最有效的手段, 但现阶段关于裂腹鱼类系统发育的研究大多基于一个或多个线粒体基因分子标记, 仅能反应母系遗传的系统发育关系, 且缺少与之严格对应的形态数据, 故而能为分类系统修订提供的参考有限。后续研究中需结合大尺度范围内历史与采集样本的生物学、形态学、生物地理学、系统发育学乃至全基因组测序等多种方法综合分析。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

#### 参考文献 (References):

- [1] 王世江, 章曙明. 中国新疆河湖全书 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.  
Wang S J, Zhang S M. The book of Rivers and Lakes in Xinjiang, China[M]. Beijing: China Water Power Press, 2010 (in Chinese).
- [2] 孙本国, 毛炜峰, 冯燕茹, 等. 叶尔羌河流域气温、降水及径流变化特征分析[J]. 干旱区研究, 2006, 23(2): 203-209.  
Sun B G, Mao W Y, Feng Y R, et al. Study on the change of air temperature, precipitation and runoff volume in the Yarkant River Basin[J]. Arid Zone Research, 2006, 23(2): 203-209 (in Chinese).
- [3] 曹文宣, 陈宜瑜, 武云飞, 等. 青藏高原隆起的时代、幅度和形式问题 [C]//裂腹鱼的起源和演化及其余青藏高原隆起的关系. 北京: 科学出版社, 1981: 118-129.  
Cao W X, Chen Y Y, Wu Y F, et al. Studies on the period, amplitude and type of the uplift of the Qinghai-Xizang Plateau[C]//Origin and Evolution of Schizothoracine Fishes in Relation to the Upheaval of the Qinghai-Xizang Plateau. Beijing: Science Press, 1981: 118-129 (in Chinese).
- [4] 中国科学院动物研究所, 中国科学院新疆生物土壤沙漠研究所, 新疆维吾尔自治区水产局. 新疆鱼类志 [M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1979.  
Institute of Zoology, CAS, Xinjiang Institute of Biology, Pedology and Desert Research, CAS, Xinjiang Uygur Autonomous Region Fisheries Administration. Fishes in Xinjiang[M]. Urumqi: Xinjiang People's Press, 1979 (in Chinese).
- [5] 郭焱, 张人铭, 蔡林钢. 新疆鱼类志 [M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2012.  
Guo Y, Zhang R M, Cai L G. The fishes of Xinjiang[M]. Urumqi: Xinjiang Science and Technology Press, 2012 (in Chinese).
- [6] 武云飞, 吴翠珍. 喀喇昆仑山-昆仑山地区渔业资源及渔业发展对策的初步研究[J]. 自然资源学报, 1990, 5(4): 354-364.  
Wu Y F, Wu C Z. A preliminary study of the fishery resources and the countermeasures of fishery development in the region of the Karakorum-Kunlun Mountains, China[J]. Journal of Natural Resources, 1990, 5(4): 354-364 (in Chinese).
- [7] 王德忠. 新疆的裂腹鱼亚科鱼类研究[J]. 干旱区研究, 1998, 15(4): 26-32.  
Wang D Z. The Schizothoracinae fishes in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 1998, 15(4): 26-32 (in Chinese).
- [8] 张人铭, 郭焱, 马燕武, 等. 塔里木裂腹鱼资源与分布的调查研究[J]. 淡水渔业, 2007, 37(6): 76-78.  
Zhang R M, Guo Y, Ma Y W, et al. A survey on the resource and distribution of *Schizothorax biddulphi* Günther[J]. Freshwater Fisheries, 2007, 37(6): 76-78 (in Chinese).
- [9] 马燕武, 郭焱, 张人铭, 等. 新疆塔里木河水系土著鱼类区系组成与分布[J]. 水产学报, 2009, 33(6): 949-956.  
Ma Y W, Guo Y, Zhang R M, et al. Fauna composition and distribution of aboriginal fish in the Tarim River of Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. Journal of Fisheries of China, 2009, 33(6): 949-956 (in Chinese).
- [10] 李国刚, 冯晨光, 汤永涛, 等. 新疆内陆河土著鱼类资源调查[J]. 甘肃农业大学学报, 2017, 52(3): 22-27.  
Li G G, Feng C G, Tang Y T, et al. Survey of native fish resources in inland river system in Xinjiang[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2017, 52(3): 22-27 (in Chinese).
- [11] 杨天燕, 孟玮, 海萨, 等. 新疆几种裂腹鱼类系统发育

- 关系探讨[J]. 干旱区研究, 2011, 28(3): 555-561.
- Yang T Y, Meng W, Hai S, *et al.* Molecular phylogeny of schizothoracinae fishes in Xinjiang based on mitochondrial cytochrome b gene sequences[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(3): 555-561 (in Chinese).
- [12] 孟玮, 郭焱, 海萨, 等. 塔里木裂腹鱼群体遗传结构及遗传多样性分析[J]. 水生生物学报, 2012, 36(5): 851-857.
- Meng W, Guo Y, Hai S, *et al.* Genetic structure and diversity of *Schizothorax biddulphi* populations[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2012, 36(5): 851-857 (in Chinese).
- [13] 海萨·艾也力汗, 郭焱, 孟玮, 等. 新疆裂腹鱼类的系统发生关系及物种分化时间[J]. 遗传, 2014, 36(10): 1013-1020.
- Ayelhan H, Guo Y, Meng W, *et al.* Phylogeny and divergence time estimation of Schizothoracinae fishes in Xinjiang[J]. Hereditas, 2014, 36(10): 1013-1020 (in Chinese).
- [14] 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[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2018, 37(3): 221-227.
- Yang T Y, Meng W, Guo Y, *et al.* The multivariate morphometric analysis of *Schizothorax biddulphi* and *Schizothorax irregularis*[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2018, 37(3): 221-227 (in Chinese).
- [15] 杨天燕, 孟玮, 郭焱, 等. 新疆两种裂腹鱼形态学和COI基因的比较分析[J]. 水产学杂志, 2013, 26(1): 10-14.
- Yang T Y, Meng W, Guo Y, *et al.* Morphological and COI sequences analysis of two schizothoracinae fishes in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2013, 26(1): 10-14 (in Chinese).
- [16] 孟庆闻, 缪学祖, 俞泰济, 等. 鱼类学(形态·分类)[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1989.
- Meng Q W, Miao X Z, Yu T J, *et al.* Ichthyology (morphological classification)[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1989 (in Chinese).
- [17] Booke H E. The conundrum of the stock concept—are nature and nurture definable in fishery science?[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1981, 38(12): 1479-1480.
- [18] 侯刚, 刘丹丹, 冯波, 等. 基于地标点几何形态测量法识别北部湾4种白姑鱼矢耳石形态[J]. 中国水产科学, 2013, 20(6): 1293-1302.
- Hou G, Liu D D, Feng B, *et al.* Using landmark-based geometric morphometrics analysis to identify sagittal otolith of four *Pennahia* fish species[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2013, 20(6): 1293-1302 (in Chinese).
- [19] 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[J]. 水生生物学报, 2017, 41(1): 182-193.
- Wang H 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)[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2017, 41(1): 182-193 (in Chinese).
- [20] 梁思倩, 杨坤, 黎树, 等. 不同水系松潘裸鲤的形态特征分析[J]. 四川动物, 2020, 39(5): 500-507.
- Liang S Q, Yang K, Li S, *et al.* Multivariate morphometric analysis of *Gymnocypris potanini* in different river drainages[J]. Sichuan Journal of Zoology, 2020, 39(5): 500-507 (in Chinese).
- [21] 王燕, 张勇, 张海发, 等. 两种杂交石斑鱼及其亲本的形态差异分析[J]. 水产学报, 2014, 38(6): 778-785.
- Wang Y, Zhang Y, Zhang H F, *et al.* Comparison of morphology between two kinds of hybrid groupers and their parents[J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(6): 778-785 (in Chinese).
- [22] 张觉民, 何志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册[M]. 北京: 农业出版社, 1991.
- Zhang J M, He Z H. Inland water fisheries natural resources survey manual[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1991 (in Chinese).
- [23] 伍献文. 中国鲤科鱼类志(上卷)[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982.
- Wu X W. Fauna of Cyprinidae in China I [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1982(in Chinese).
- [24] 乐佩琦. 中国动物志·硬骨鱼纲·鲤形目(下卷)[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- Yue P Q. Fauna Sinica·Osteichthyes·Cypriniformes III[M]. Beijing: Science Press, 2000(in Chinese).
- [25] 武云飞, 吴翠珍. 青藏高原鱼类[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1991.
- Wu Y F, Wu C Z. The fishes of the Qinghai-Xizang Plateau[M]. Chengdu: Chengdu Scientific & Technical Publishing House, 1991 (in Chinese).

- lishers, 1991(in Chinese).
- [26] Bookstein F L, Chernoff B, Elder R L, *et al.* Morphometrics in evolutionary biology: the geometry of size and shape change, with examples from fishes[M]//Bookstein F L, Chernoff B, Elder R L, *et al.* Special Publication 15. Philadelphia: Academy of Natural Sciences of Philadelphia, 1985.
- [27] Reist D J. An empirical evaluation of several univariate methods that adjust for size variation in morphometric data[J]. *Canadian Journal of Zoology*, 1985, 63(6): 1429-1439.
- [28] Elliott N G, Haskard K A, Koslow J A. Morphometric analysis of orange roughy (*Hoplostethus atlanticus*) off the continental slope of southern Australia[J]. *Journal of Fish Biology*, 1995, 46(2): 202-220.
- [29] Cemal T. A note on the examination of morphometric differentiation among fish populations: the truss system[J]. *Turkish Journal of Zoology*, 1999, 23(3): 259-264.
- [30] Samaee S M, Mojazi-Amiri B, Hosseini-Mazinani S M, *et al.* Comparison of *Capoeta capoeta gracilis* (Cyprinidae, Teleostei) populations in the south Caspian Sea River basin, using morphometric ratios and genetic markers[J]. *Folia Zoologica*, 2006, 55(3): 323-335.
- [31] Hair J F, Anderson R E, Tatham R L, *et al.* Multivariate data analysis with readings[M]. 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall Inc. , 1995.
- [32] 章翊涵, 王咏雪, 梁海, 等. 多鳞四指马鲛 5 个地理群体的形态差异[J]. *水产学报*, 2022, 46(8): 1334-1344. Zhang Y H, Wang Y X, Liang H, *et al.* Morphological differences of five *Eleutheronema rhadinum* geographical stocks[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(8): 1334-1344 (in Chinese).
- [33] Imre I, McLaughlin R L, Noakes D L G. Phenotypic plasticity in brook charr: changes in caudal fin induced by water flow[J]. *Journal of Fish Biology*, 2002, 61(5): 1171-1181.
- [34] 孙儒泳. 动物生态学原理 [M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1987. Sun R Y. Principles of animal ecology[M]. Beijing: Beijing Normal University Publishing House , 1987 (in Chinese).
- [35] 李晓慧, 汤永涛, 田菲, 等. 几何形态测量法结合Micro CT扫描对两水系花斑裸鲤的形态分析[J]. *水生生物学报*, 2020, 44(4): 853-861. Li X H, Tang Y T, Tian F, *et al.* Morphological analysis used by geometric morphometrics combined with micro CT among *Gymnocypris eckloni* in two drainage (Teleostei: Cyprinidae)[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, 44(4): 853-861 (in Chinese).
- [36] He D K, Chen Y F. Biogeography and molecular phylogeny of the genus *Schizothorax* (Teleostei: Cyprinidae) in China inferred from cytochrome b sequences[J]. *Journal of Biogeography*, 2006, 33(8): 1448-1460.

## Comparative analysis of multivariate morphology of four species of Schizothoracinae in the Yarkand River basin of Xinjiang

LIU Hong, NIU Jiangong, HU Jiangwei, HAYSA Ayelhan, XIAN Yulan,  
HE Jiangtao, CAI Lingang, ZHANG Renming\*

(Xinjiang Fishery Research Institute, Scientific Observing and Experimental Station of Fishery Resources and Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Urumqi 830000, China)

**Abstract:** The Yarkand River is located on the western edge of the Tarim Basin in southwestern Xinjiang, and the longest source of the Tarim River. Affected by the uplift of the Qinghai-Tibet Plateau at the end of the Tertiary Period, this waters gradually formed a unique fish population structure, with Schizothoracinae as its typical representative species. Typical representatives of Schizothoracinae included *Schizothorax irregularis*, *S. eurystomus*, *S. biddulphi* and *S. barbatus*. The four common Schizothoracinae are highly similar in appearance, and the countable and measurable traits are mostly crossed. Affected by work experience and cognition, the four species are prone to misjudgment in the identification, and many scholars often question this classification system. This paper intends to establish a discrimination system for Schizothoracinae identification through comparing traditional morphometric and Box-truss data system, and provide reference and information for subsequent research. The differences among the species of Schizothoracinae (4 species, 494 individuals, 48 groups of parameters) were detected through ANOVA, PCA, DFA and Cluster Analysis. The results of ANOVA showed that 9 parameters were significantly different in the 4 species of Schizothoracinae at the same time ( $P < 0.05$ ), and the difference was mainly located in the head, front trunk and rear trunk of the fish. PCA results showed that there was significant difference in PC1 axis between *S. barbatus* and *S. irregularis* based on the morphological data, which is mainly represented the head characteristics. However, the results of the Box-truss data showed that the difference between *S. biddulphi* and *S. eurystomus* mainly reflected in the rear trunk. The 8 and 6 main parameters were selected to establish the discriminant formulas for two data structures, and the initial discrimination success rates reached 85.7% and 75.7%, respectively. The cluster analysis results showed that the two data systems are divided into two branches, among which *S. barbatus* is a separate group, the *S. biddulphi* and *S. irregularis* are closer in morphology, followed by *S. eurystomus*. The using of multivariate statistical methods can better distinguish the four Schizothoracinae species in the Yarkand River Basin, and the morphological data performed better than the Box-truss data by contrasting two data systems. However, there is still confused distinguish characteristic in species identification. These findings can be used to quickly verify the Schizothoracinae that are difficult to accurately identify based on the lip characteristics, and would accumulate basic data to provide a reference for follow-up research.

**Key words:** Schizothoracinae; morphology analysis; multivariate statistics; Yarkand River Basin

**Corresponding author:** ZHANG Renming. E-mail: xj01zrm@163.com

**Funding projects:** Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region (2021D01B86); Special Investigation on Fishery Resources and Environment of Key waters in Northwest China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China