

DOI: 10.12264/JFSC2022-0306

哲罗鲑和川陕哲罗鲑群体多变量形态特征比较

马凯^{1,2}, 佟广香^{1,2}, 张澜澜³, 赵成¹, 何宝全¹, 尹家胜^{1,2}, 张永泉^{1,2}

1. 中国水产科学研究院黑龙江水产研究所, 黑龙江 哈尔滨 150076;
2. 黑龙江省冷水性鱼类种质资源及增殖重点开放实验室, 黑龙江 哈尔滨 150076;
3. 黑龙江省水产技术推广总站, 黑龙江 哈尔滨 150010

摘要: 为探明珍稀濒危鱼类哲罗鲑(*Hucho taimen*)种内及其与川陕哲罗鲑(*Hucho bleekeri*)种间的外部形态差异, 以新疆、黑龙江的哲罗鲑和陕西的川陕哲罗鲑为研究对象, 采用传统形态学方法和框架度量法结合的方式, 对 3 个群体的 9 个分节特征和 35 项标准化度量特征进行了统计分析。结果显示: (1)哲罗鲑两个地理群体在侧线鳞平均数上存在显著性差异($P<0.05$), 但整体上, 两个群体在全部 9 个分节特征上均存在个体交叉, 无法进行区分。川陕哲罗鲑的臀鳍分支鳍条、侧线鳞和幽门盲囊平均数显著小于哲罗鲑($P<0.05$), 且二者不存在个体交叉, 区分明显。(2)主成分分析共筛选出 4 个特征值大于 1 的主成分, 累计贡献率达 88.928%, 其中第一主成分贡献率最高, 主要解释了 3 个群体的躯干斜向形态差异。构建主成分二维散点图发现, 3 个群体虽能形成相对独立的组, 但彼此之间仍存在个体交叉。(3)单因素方差分析显示哲罗鲑种内仅有 14 项主要描述头部和尾部的度量特征存在显著性差异($P<0.05$), 而哲罗鲑和川陕哲罗鲑之间则有 29 项主要描述躯干部的度量特征存在显著性差异($P<0.05$)。 (4)判别分析共筛选出 10 个度量特征用于建立 Fisher 线性判别函数, 个体被正确判入各自群体的判别率高达 100%。 (5)聚类分析表明哲罗鲑两个地理群体具有最近的亲缘关系, 川陕哲罗鲑与新疆的哲罗鲑的亲缘关系近于黑龙江的哲罗鲑。综合分析表明: (1)哲罗鲑两个地理群体具有一定程度的形态学差异, 但二者仍属同一物种。 (2)川陕哲罗鲑与哲罗鲑在形态学上的差异集中于躯干部, 臀鳍分支鳍条、侧线鳞和幽门盲囊数等分节特征可作为两个物种的鉴别特征, 川陕哲罗鲑可能由新疆的哲罗鲑南迁进化而来。

关键词: 哲罗鲑; 川陕哲罗鲑; 形态差异; 主成分分析; 判别分析

中图分类号: S961

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2023)01-0001-10

哲罗鲑(*Hucho taimen*)和川陕哲罗鲑(*Hucho bleekeri*)同属鲑形目(Salmoniformes)、鲑科(Salmonidae)、哲罗鲑属, 二者均为凶猛的大型冷水性鱼类。哲罗鲑在我国境内存在两处主要分布区, 分别为东北地区的黑龙江流域和西北地区的额尔齐斯河流域^[1]。现有研究显示, 在第三纪早期至中期时, 黑龙江流域和额尔齐斯河流域通过分布于中国北方和蒙古国的广阔湖群相连^[2], 基于此地理条件, 两大流域的哲罗鲑在该时期可自由发生交流和扩散。第三纪中期之后, 连接东北和西北

两大流域的河湖萎缩, 两大流域中哲罗鲑相互之间的基因交流随之停止, 转为地理隔离状态。川陕哲罗鲑为我国特有种, 为哲罗鲑属的 5 种鱼类中分布纬度最低的种类^[3]。第四纪冰川期时, 四川、陕西和青海等地气候变冷, 其祖先从纬度高的北方地区南迁至 29~30 °C 的长江流域, 冰封期结束后, 留在海拔较高、水温较低的河流中, 逐渐演化为现有的川陕哲罗鲑, 被认为是研究鱼类演化与气候变化关系的活化石^[4]。

由于过度捕捞和生境破坏, 哲罗鲑和川陕哲

收稿日期: 2022-08-29; **修订日期:** 2022-09-22.

基金项目: 中国水产科学研究院基本科研业务费专项(HSY202205M; 2020TD56).

作者简介: 马凯(1994–), 男, 硕士, 研究实习员, 从事冷水性鱼类繁育技术研究. E-mail: makai@hrfri.ac.cn

通信作者: 张永泉, 副研究员, 从事鱼类遗传育种研究. E-mail: atai0805@163.com

罗鲑都面临灭绝的风险,在 2021 年新发布的《国家重点保护野生动物名录》^[5]中,哲罗鲑被列为国家 II 级保护野生动物,川陕哲罗鲑被列为国家 I 级保护野生动物。迄今为止,我国对哲罗鲑的保护生物学和养殖生物学研究主要集中于遗传特性分析^[1]、性别鉴定标记筛选^[6]、转录组数据装配与解释^[7]、营养生理学特性^[8-9]、免疫学特性^[10-11]等;对川陕哲罗鲑的保护生物学研究主要集中于近交水平评估^[12]、线粒体基因组解析^[13]、早期发育观察^[14]、孵化影响因素^[15]和系统发育关系分析^[16]等。对这两种哲罗鲑属鱼类的种内和种间形态学差异研究较少。

形态学方法仍是现今物种鉴别工作中最直观、最常用的手段^[17],根据异域物种形成理论^[18],黑龙江流域和额尔齐斯河流域的哲罗鲑经过长时间的地理隔离,很可能已形成为不同的生态型,致使两个地理群体在遗传学和形态学上呈现一定程度的差异性。汪鄂洲等^[19]通过分析线粒体 DNA 的 COI 和 D-loop 序列已经证实哲罗鲑的两个地理群体之间在遗传学上存在遗传分化,但还没有研究证实两个地理群体的遗传变异是否达到了表观形态性状水平,通常情况下只有两个群体具有可明显区分的表观形态性状后,才能被鉴定为两个物种^[20]。此外,川陕哲罗鲑在长江流域经过长期的演化,最终形成一个独立的物种,其与位于我国北方的哲罗鲑的形态学差异,目前也没有被报道。

本研究采用传统形态学方法和框架度量法,运用主成分分析、判别分析和聚类分析等多元统计方法,对我国现存哲罗鲑不同地理群体以及哲罗鲑与川陕哲罗鲑之间的形态学差异进行分析,以期阐明哲罗鲑不同地理群体以及哲罗鲑与川陕哲罗鲑之间的形态特征指标差异,丰富哲罗鲑和川陕哲罗鲑保护生物学数据,同时为哲罗鲑属鱼类的地理群体鉴别和物种分类提供参考。

1 材料与方法

1.1 样本来源

陕西省的 19 尾野生川陕哲罗鲑样本于 2018 年 7 月采集自太白河(包含 11 尾活体和 8 尾死亡样本),黑龙江省的 30 尾野生哲罗鲑样本(HLJ)于

2020 年 10 月采集自黑龙江漠河江段(包含 17 尾活体和 13 尾死亡样本),新疆的 24 尾哲罗鲑(XJ)中有 6 尾野生样本于 2020 年 10 月采集自额尔齐斯河(包含 2 尾活体和 4 尾死亡样本),其余 18 尾样本为 2021 年 4 月在布尔津县额河特冷水鱼繁育开发有限公司测量的其驯养的野生亲鱼(全部为活体样本)(表 1)。

表 1 哲罗鲑和川陕哲罗鲑样本信息

Tab. 1 Sample information of *Hucho taimen* and *Hucho bleekeri*

群体 population	样本数量 sample size	体长/cm body length	体重/g body weight
哲罗鲑 (XJ) <i>Hucho taimen</i>	24	69.47±11.22	4507.22±1866.63
哲罗鲑 (HLJ) <i>Hucho taimen</i>	30	37.15±4.11	559.90±171.79
川陕哲罗鲑 <i>Hucho bleekeri</i>	19	26.69±6.92	299.67±246.20

注: XJ-哲罗鲑新疆群体, HLJ-哲罗鲑黑龙江群体。

Note: XJ-population of *Hucho taimen* from Xinjiang Uygur Autonomous Region; HLJ-population of *Hucho taimen* from Heilongjiang Province.

1.2 数据测量

采集的活体样本现场使用 40 mg/L MS-222 麻醉后擦干体表水分,电子天平称量体重(精确度 0.01 g),游标卡尺测量体厚(BW)、眼间距(EI)(精确度 0.01 cm),然后快速对鱼体的鳞式、背鳍式和臀鳍式等可数性状进行直接计数,再将鱼体水平放置,使用数码相机进行拍照,最后对麻醉后的样本进行解救,放生或放归原池(活体样本的鳃耙和幽门盲囊未进行计数)。死亡样本冷冻后低温运至实验室,冰上解冻后对样本进行测量和拍照,操作过程同活体样本,然后对样本进行解剖,对鳃耙和幽门盲囊进行计数。再使用 Motic Image Plus 2.0 依据照片上的标尺对所有样本的量度特征进行测量,传统形态学数据包括体长(BL)、体高(BH)、头长(HL)、眼径(ED)、吻长(SL)、眼后头长(HE)、尾柄长(CL)和尾柄高(CH),框架法形态数据包括 D_{1-12} (表示测量基点 1 至 12 之间的距离,下同)、 D_{2-12} 、 D_{11-12} 、 D_{1-2} 、 D_{1-11} 、 D_{2-3} 、 D_{2-10} 、 D_{2-11} 、 D_{3-4} 、 D_{3-9} 、 D_{3-10} 、 D_{3-11} 、 D_{4-5} 、 D_{4-8} 、 D_{4-9} 、 D_{4-10} 、 D_{5-6} 、 D_{5-7} 、 D_{5-8} 、 D_{5-9} 、 D_{6-7} 、 D_{6-8} 、 D_{7-8} 、 D_{8-9} 、 D_{9-10} 和 D_{10-11} ,框架法形态数据测量基点(图 1)参考

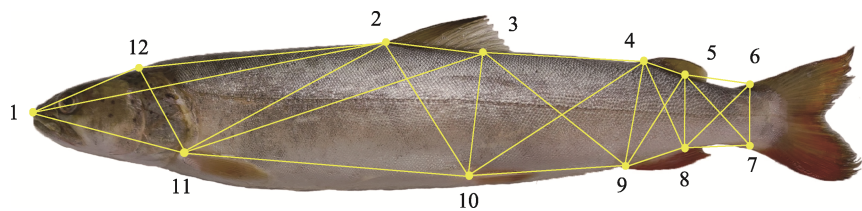


图 1 哲罗鲑和川陕哲罗鲑框架数据测量示意图

1-吻端, 2-背鳍基部起点, 3-背鳍基部末端, 4-脂鳍基部起点, 5-脂鳍基部末端, 6-尾鳍背部起点, 7-尾鳍腹部起点, 8-臀鳍基部末端, 9-臀鳍基部起点, 10-腹鳍基部起点, 11-胸鳍基部起点, 12-枕骨末端。

Fig. 1 Truss network of *Hucho taimen* and *Hucho bleekeri*

1-tip of snout, 2-origin of dorsal fin base, 3-terminus of dorsal fin base, 4-origin of adipose fin base, 5-terminus of adipose fin base, 6-dorsal origin of caudal fin, 7-abdominal origin of caudal fin, 8-terminus of anal fin base, 9-origin of anal fin base, 10-origin of pelvic fin base, 11-origin of pectoral fin base, 12-distal tip of occiput.

Cao 等^[21]方法进行设置。

1.3 统计分析

为消除样本体型差异对分析结果的影响, 将所有形态数据均除以体长以进行标准化处理^[22]。运用 SPSS 19.0 软件, 采用主成分分析对 35 项标准化的量度特征进行比较, 选取特征值大于 1 的主成分进行分析, 并根据第一、二和三主成分得分绘制二维散点图; 利用单因素方差分析检验不同群体分节特征和标准化量度特征的差异性, 具有方差齐性的数据使用 LSD 法, 不具备方差齐性的数据采用 Tamahane’s T2 法进行比较, 显著性水平设为 0.05; 采用逐步判别法对 3 个群体的 35 项标准化量度特征进行判别分析, 依据筛选出的标准化量度特征建立 3 个群体的 Fisher 线性判别函数; 最后基于 35 项标准化量度特征的平均

值, 计算出不同群体之间的欧氏距离以绘制聚类图。

2 结果与分析

2.1 分节特征

对哲罗鲑和川陕哲罗鲑的分节特征进行统计分析, 结果见表 2。种内方面, 哲罗鲑两个地理群体间仅在侧线鳞平均数上差异显著($P<0.05$), XJ 群体的侧线鳞平均数显著大于 HLJ 群体, 但两个地理群体间侧线鳞的数值区间存在交叉。种间方面, 川陕哲罗鲑背鳍分支鳍条平均数显著大于哲罗鲑($P<0.05$), 臀鳍分支鳍条、侧线鳞和幽门盲囊平均数显著小于哲罗鲑($P<0.05$)。此外, 川陕哲罗鲑的臀鳍分支鳍条、侧线鳞和幽门盲囊数的数值区间与哲罗鲑的不存在交叉。

表 2 哲罗鲑和川陕哲罗鲑分节特征

Tab. 2 Meristic counts of *Hucho taimen* and *Hucho bleekeri*

分节特征 meristic count	哲罗鲑 <i>Hucho taimen</i>		川陕哲罗鲑 <i>Hucho bleekeri</i>
	XJ	HLJ	
背鳍不分支鳍条数 dorsal fin unbranched fin-ray	3—4 (3.2)	3—4 (3.2)	3 (3.0)
背鳍分支鳍条数 dorsal fin branched fin-ray	10—11 (10.2) ^b	10—12 (10.2) ^b	9—11 (10.6) ^a
臀鳍不分支鳍条数 anal fin unbranched fin-ray	3—4 (3.0)	3—4 (3.1)	3 (3.0)
臀鳍分支鳍条数 anal fin branched fin-ray	9—10 (9.1) ^a	9—10 (9.1) ^a	8 (8.0) ^b
侧线鳞数 lateral line scale	195—237 (217.8) ^a	176—216 (197.0) ^b	125—133 (128.7) ^c
侧线上鳞数 scale above lateral line	30—35 (32.5)	27—36 (32.4)	29—38 (33.3)
侧线下鳞数 scale below lateral line	27—30 (28.0)	25—32 (27.6)	25—30 (27.9)
鳃耙数 gill raker	15—16 (15.5)	14—17 (15.5)	14—16 (14.8)
幽门盲囊数 pyloric caecum	196—212 (205.3) ^a	172—211 (193.2) ^a	73—98 (83.1) ^b

注: 上标字母相同或没有字母上标表示差异不显著($P>0.05$), 不同字母表示差异显著($P<0.05$)。XJ-哲罗鲑新疆群体, HLJ-哲罗鲑黑龙江群体。

Note: The same or no letter superscripts in a row mean nonsignificant difference ($P>0.05$), while different letter superscripts in a row mean significant difference ($P<0.05$). XJ-population of *Hucho taimen* from Xinjiang Uygur Autonomous Region; HLJ-population of *Hucho taimen* from Heilongjiang Province.

2.2 单因素方差分析

对哲罗鲑 XJ 群体、HLJ 群体以及川陕哲罗鲑群体标准化后的量度特征进行单因素方差分析(表 3), 首先采用 LSD 法对 35 项标准化后的量度特征进行多重比较, 发现 D_{1-2}/BL 、 D_{1-11}/BL 、

D_{5-6}/BL 、 D_{5-7}/BL 、 D_{9-10}/BL 和 D_{10-11}/BL 等 6 项形态特征值在各群体间差异不显著, 表明其不具备方差齐性, 因而采用 Tamahane's T2 法进行比较分析。在显著性水平为 0.05 时, 除 D_{1-2}/BL 、 D_{1-11}/BL 、 D_{5-6}/BL 、 D_{5-7}/BL 、 D_{9-10}/BL 和 D_{10-11}/BL

表 3 哲罗鲑和川陕哲罗鲑可量度特征的单因素方差分析结果

Tab. 3 The results of one-way ANOVA for morphometric characters of *Hucho taimen* and *Hucho bleekeri*

性状 character	哲罗鲑 <i>Hucho taimen</i>		川陕哲罗鲑 <i>Hucho bleekeri</i>	性状 character	哲罗鲑 <i>Hucho taimen</i>		川陕哲罗鲑 <i>Hucho bleekeri</i>
	XJ	HLJ			XJ	HLJ	
BW/BL	0.168±0.039 ^a	0.116±0.008 ^b	0.128±0.016 ^b	D_{3-9}/BL	0.247±0.015 ^{ab}	0.229±0.014 ^b	0.264±0.076 ^a
EI/BL	0.082±0.018 ^a	0.057±0.005 ^b	0.062±0.008 ^b	D_{3-10}/BL	0.168±0.007 ^b	0.165±0.013 ^b	0.200±0.061 ^a
BH/BL	0.197±0.013 ^{ab}	0.194±0.012 ^b	0.204±0.011 ^a	D_{3-11}/BL	0.426±0.012 ^{ab}	0.422±0.028 ^b	0.472±0.149 ^a
HL/BL	0.214±0.025 ^c	0.240±0.032 ^a	0.228±0.023 ^b	D_{4-5}/BL	0.060±0.009 ^b	0.056±0.006 ^b	0.069±0.022 ^a
ED/BL	0.025±0.004 ^c	0.034±0.004 ^b	0.044±0.008 ^a	D_{4-8}/BL	0.127±0.008 ^b	0.122±0.008 ^b	0.144±0.047 ^a
SL/BL	0.040±0.007 ^b	0.052±0.009 ^a	0.048±0.009 ^a	D_{4-9}/BL	0.141±0.007 ^b	0.135±0.009 ^b	0.159±0.050 ^a
HE/BL	0.149±0.016 ^b	0.156±0.009 ^a	0.133±0.011 ^c	D_{4-10}/BL	0.253±0.018 ^b	0.265±0.021 ^b	0.296±0.096 ^a
CL/BL	0.080±0.014 ^a	0.070±0.008 ^b	0.081±0.010 ^a	D_{5-6}/BL	0.080±0.009 ^b	0.088±0.014 ^a	0.091±0.033 ^{ab}
CH/BL	0.072±0.005 ^b	0.069±0.003 ^c	0.082±0.004 ^a	D_{5-7}/BL	0.124±0.008 ^b	0.131±0.013 ^a	0.138±0.043 ^{ab}
D_{1-12}/BL	0.160±0.019 ^b	0.173±0.011 ^{ab}	0.187±0.077 ^a	D_{5-8}/BL	0.094±0.007 ^b	0.091±0.007 ^b	0.112±0.034 ^a
D_{2-12}/BL	0.366±0.024 ^{ab}	0.341±0.024 ^b	0.384±0.115 ^a	D_{5-9}/BL	0.138±0.008 ^b	0.138±0.011 ^b	0.164±0.050 ^a
D_{11-12}/BL	0.143±0.013 ^b	0.138±0.010 ^b	0.175±0.060 ^a	D_{6-7}/BL	0.089±0.007 ^{ab}	0.084±0.007 ^b	0.096±0.032 ^a
D_{1-2}/BL	0.505±0.026 ^a	0.512±0.027 ^a	0.554±0.189 ^a	D_{6-8}/BL	0.118±0.012 ^b	0.120±0.012 ^b	0.140±0.051 ^a
D_{1-11}/BL	0.220±0.020 ^b	0.242±0.015 ^a	0.251±0.108 ^{ab}	D_{7-8}/BL	0.078±0.012 ^b	0.094±0.011 ^a	0.094±0.032 ^a
D_{2-3}/BL	0.109±0.009 ^b	0.124±0.009 ^a	0.129±0.049 ^a	D_{8-9}/BL	0.076±0.007 ^b	0.082±0.008 ^{ab}	0.086±0.029 ^a
D_{2-10}/BL	0.212±0.013 ^b	0.203±0.014 ^b	0.240±0.075 ^a	D_{9-10}/BL	0.197±0.014 ^a	0.201±0.016 ^a	0.217±0.073 ^a
D_{2-11}/BL	0.328±0.011 ^{ab}	0.310±0.021 ^b	0.362±0.107 ^a	D_{10-11}/BL	0.410±0.025 ^a	0.383±0.029 ^b	0.422±0.134 ^{ab}
D_{3-4}/BL	0.200±0.014 ^{ab}	0.195±0.018 ^b	0.216±0.061 ^a				

注: 字母上标相同表示差异不显著($P>0.05$), 不同表示差异显著($P<0.05$)。XJ—哲罗鲑新疆群体, HLJ—哲罗鲑黑龙江群体。BW—体厚, BL—体长, EI—眼间距, BH—体高, HL—头长, ED—眼径, SL—吻长, HE—眼后头长, CL—尾柄长, CH—尾柄高, D_{1-12} —测量基点 1 至 12 的距离, D_{2-12} —测量基点 2 至 12 的距离, D_{11-12} —测量基点 11 至 12 的距离, D_{1-2} —测量基点 1 至 2 的距离, D_{1-11} —测量基点 1 至 11 的距离, D_{2-3} —测量基点 2 至 3 的距离, D_{2-10} —测量基点 2 至 10 的距离, D_{2-11} —测量基点 2 至 11 的距离, D_{3-4} —测量基点 3 至 4 的距离, D_{3-9} —测量基点 3 至 9 的距离, D_{3-10} —测量基点 3 至 10 的距离, D_{3-11} —测量基点 3 至 11 的距离, D_{4-5} —测量基点 4 至 5 的距离, D_{4-8} —测量基点 4 至 8 的距离, D_{4-9} —测量基点 4 至 9 的距离, D_{4-10} —测量基点 4 至 10 的距离, D_{5-6} —测量基点 5 至 6 的距离, D_{5-7} —测量基点 5 至 7 的距离, D_{5-8} —测量基点 5 至 8 的距离, D_{5-9} —测量基点 5 至 9 的距离, D_{6-7} —测量基点 6 至 7 的距离, D_{6-8} —测量基点 6 至 8 的距离, D_{7-8} —测量基点 7 至 8 的距离, D_{8-9} —测量基点 8 至 9 的距离, D_{9-10} —测量基点 9 至 10 的距离, D_{10-11} —测量基点 10 至 11 的距离。

Note: The same letter superscripts in a row mean nonsignificant difference ($P>0.05$), while different letter superscripts in a row mean significant difference ($P<0.05$). XJ—population of *Hucho taimen* from Xinjiang Uygur Autonomous Region; HLJ—population of *Hucho taimen* from Heilongjiang Province. BW—body thickness; BL—body length; EI—eye distance; BH—body height; HL—head length; ED—eye diameter; SL—snout length; HE—head length behind the eye; CL—caudal peduncle length; CH—caudal peduncle height; D_{1-12} —distance from the measuring base points 1 to 12; D_{2-12} —distance from the measuring base points 2 to 12; D_{11-12} —distance from the measuring base points 11 to 12; D_{1-2} —distance from the measuring base points 1 to 2; D_{1-11} —distance from the measuring base points 1 to 11; D_{2-3} —distance from the measuring base points 2 to 3; D_{2-10} —distance from measuring base points 2 to 10; D_{2-11} —distance from measuring base points 2 to 11; D_{3-4} —distance from measuring base points 3 to 4; D_{3-9} —distance from measuring base points 3 to 9; D_{3-10} —distance from measuring base points 3 to 10; D_{3-11} —distance from measuring base points 3 to 11; D_{4-5} —distance from measuring base points 4 to 5; D_{4-8} —distance from measuring base points 4 to 8; D_{4-9} —distance from measuring base points 4 to 9; D_{4-10} —distance from measuring base points 4 to 10; D_{5-6} —distance from measuring base points 5 to 6; D_{5-7} —distance from measuring base point 5 to 7; D_{5-8} —distance from measuring base point 5 to 8; D_{5-9} —distance from measuring base point 5 to 9; D_{6-7} —distance from measuring base point 6 to 7; D_{6-8} —distance from measuring base point 6 to 8; D_{7-8} —distance from measuring base point 7 to 8; D_{8-9} —distance from measuring base point 8 to 9; D_{9-10} —distance from measuring base point 9 to 10; D_{10-11} —distance from measuring base point 10 to 11.

外, 哲罗鲑和川陕哲罗鲑之间的其余量度特征都存在显著性差异($P<0.05$); 哲罗鲑 XJ 和 HLJ 群体比较结果表明, 两个地理群体仅在 BW/BL、EI/BL、HL/BL、ED/BL、SL/BL、HE/BL、CL/BL、CH/BL、 D_{1-11} /BL、 D_{2-3} /BL、 D_{5-6} /BL、 D_{5-7} /BL、 D_{7-8} /BL 和 D_{10-11} /BL 等 14 项量度特征上存在显著性差异($P<0.05$)。

2.3 主成分分析

剔除群体间差异不显著的量度特征, 对剩余 29 项量度特征进行主成分分析, 共获得 4 项特征

值大于 1 的主成分, 第一主成分至第四主成分的特征值分别为 18.287、3.795、2.119 和 1.589, 贡献率分别为 63.057%、13.086%、7.307%和 5.478%, 累计贡献率达 88.928%, 即前 4 个主成分可以解释哲罗鲑 XJ 群体、HLJ 群体以及川陕哲罗鲑群体之间 88.928%的形态学差异。各主成分的因子负荷值见表 4, 第一主成分中作用最大的 3 项形态学指标为 D_{4-9} /BL、 D_{4-8} /BL 和 D_{5-9} /BL, 负荷值分别为 0.985、0.982 和 0.982, 主要反映了脂鳍和臀鳍之间的躯干后部的斜向特征。第二主成分中作

表 4 哲罗鲑和川陕哲罗鲑主成分分析的因子负荷值

Tab. 4 Factor loadings of principal components extracted in *Hucho taimen* and *Hucho bleekeri*

性状 character	主成分 principle components				性状 character	主成分 principle components			
	1	2	3	4		1	2	3	4
BW/BL	-0.058	-0.852	0.374	0.064	D_{3-4} /BL	0.945	-0.123	0.087	-0.110
EI/BL	-0.008	-0.752	0.477	0.033	D_{3-9} /BL	0.952	-0.197	0.144	0.015
BH/BL	0.085	-0.307	0.090	0.817	D_{3-10} /BL	0.973	-0.029	0.003	0.149
HL/BL	-0.015	0.787	0.242	0.225	D_{3-11} /BL	0.975	0.004	0.135	-0.041
ED/BL	0.472	0.490	-0.419	0.417	D_{4-5} /BL	0.892	-0.100	-0.142	-0.114
SL/BL	-0.047	0.835	0.026	0.208	D_{4-8} /BL	0.982	-0.064	0.027	0.011
HE/BL	-0.270	0.514	0.672	0.002	D_{4-9} /BL	0.985	-0.052	0.032	0.038
CL/BL	0.092	-0.334	-0.651	-0.261	D_{4-10} /BL	0.970	0.066	-0.044	-0.113
CH/BL	0.401	-0.326	-0.564	0.515	D_{5-8} /BL	0.971	-0.050	-0.045	0.123
D_{1-12} /BL	0.884	0.327	0.238	0.049	D_{5-9} /BL	0.982	0.029	-0.078	0.006
D_{2-12} /BL	0.926	-0.119	0.263	-0.012	D_{6-7} /BL	0.962	-0.057	0.041	-0.078
D_{11-12} /BL	0.948	0.013	0.075	0.155	D_{6-8} /BL	0.964	0.038	-0.128	-0.115
D_{2-3} /BL	0.908	0.247	0.083	-0.142	D_{7-8} /BL	0.803	0.233	-0.214	-0.300
D_{2-10} /BL	0.962	-0.081	0.128	0.142	D_{8-9} /BL	0.898	0.185	-0.034	-0.238
D_{2-11} /BL	0.970	-0.097	0.130	0.046					

注: 字母上标相同表示差异不显著($P>0.05$), 不同表示差异显著($P<0.05$)。XJ-哲罗鲑新疆群体, HLJ-哲罗鲑黑龙江群体。BW-体厚, BL-体长, EI-眼间距, BH-体高, HL-头长, ED-眼径, SL-吻长, HE-眼后头长, CL-尾柄长, CH-尾柄高, D_{1-12} -测量基点 1 至 12 的距离, D_{2-12} -测量基点 2 至 12 的距离, D_{11-12} -测量基点 11 至 12 的距离, D_{1-2} -测量基点 1 至 2 的距离, D_{1-11} -测量基点 1 至 11 的距离, D_{2-3} -测量基点 2 至 3 的距离, D_{2-10} -测量基点 2 至 10 的距离, D_{2-11} -测量基点 2 至 11 的距离, D_{3-4} -测量基点 3 至 4 的距离, D_{3-9} -测量基点 3 至 9 的距离, D_{3-10} -测量基点 3 至 10 的距离, D_{3-11} -测量基点 3 至 11 的距离, D_{4-5} -测量基点 4 至 5 的距离, D_{4-8} -测量基点 4 至 8 的距离, D_{4-9} -测量基点 4 至 9 的距离, D_{4-10} -测量基点 4 至 10 的距离, D_{5-6} -测量基点 5 至 6 的距离, D_{5-7} -测量基点 5 至 7 的距离, D_{5-8} -测量基点 5 至 8 的距离, D_{5-9} -测量基点 5 至 9 的距离, D_{6-7} -测量基点 6 至 7 的距离, D_{6-8} -测量基点 6 至 8 的距离, D_{7-8} -测量基点 7 至 8 的距离, D_{8-9} -测量基点 8 至 9 的距离, D_{9-10} -测量基点 9 至 10 的距离, D_{10-11} -测量基点 10 至 11 的距离。

Note: The same letter superscripts in a row mean nonsignificant difference ($P>0.05$), while different letter superscripts in a row mean significant difference ($P<0.05$). XJ-population of *Hucho taimen* from Xinjiang Uygur Autonomous Region; HLJ-population of *Hucho taimen* from Heilongjiang Province. BW-body thickness; BL-body length; EI-eye distance; BH-body height; HL-head length; ED-eye diameter; SL-snout length; HE-head length behind the eye; CL-caudal peduncle length; CH-caudal peduncle height; D_{1-12} -distance from the measuring base points 1 to 12; D_{2-12} -distance from the measuring base points 2 to 12; D_{11-12} -distance from the measuring base points 11 to 12; D_{1-2} -distance from the measuring base points 1 to 2; D_{1-11} -distance from the measuring base points 1 to 11; D_{2-3} -distance from the measuring base points 2 to 3; D_{2-10} -distance from measuring base points 2 to 10; D_{2-11} -distance from measuring base points 2 to 11; D_{3-4} -distance from measuring base points 3 to 4; D_{3-9} -distance from measuring base points 3 to 9; D_{3-10} -distance from measuring base points 3 to 10; D_{3-11} -distance from measuring base points 3 to 11; D_{4-5} -distance from measuring base points 4 to 5; D_{4-8} -distance from measuring base points 4 to 8; D_{4-9} -distance from measuring base points 4 to 9; D_{4-10} -distance from measuring base points 4 to 10; D_{5-6} -distance from measuring base points 5 to 6; D_{5-7} -distance from measuring base point 5 to 7; D_{5-8} -distance from measuring base point 5 to 8; D_{5-9} -distance from measuring base point 5 to 9; D_{6-7} -distance from measuring base point 6 to 7; D_{6-8} -distance from measuring base point 6 to 8; D_{7-8} -distance from measuring base point 7 to 8; D_{8-9} -distance from measuring base point 8 to 9; D_{9-10} -distance from measuring base point 9 to 10; D_{10-11} -distance from measuring base point 10 to 11.

用最大的 3 项形态学指标为 BW/BL、SL/BL 和 HL/BL, 负荷值分别为-0.852、0.835 和 0.787, 主要反映了体厚、吻长和头长等躯干前部和头部特征。第三主成分作用最大的 3 项形态学指标为 HE/BL、CL/BL 和 CH/BL, 负荷值分别为 0.672、-0.651 和 -0.564, 主要反映了眼后头长、尾柄长和尾柄高等头部和尾部特征。第四主成分作用最大的 3 项形态学指标为 BH/BL、CH/BL 和 ED/BL,

负荷值分别为 0.817、0.515 和 0.417, 主要反映了体高、尾柄高和眼径等躯体高度特征。

构建第一和第二主成分、第一和第三主成分以及第二和第三主成分散点图(图 2), 显示哲罗鲑和川陕哲罗鲑群体之间存在交叉, 但仍能形成各自相对集中的组, 川陕哲罗鲑与哲罗鲑之间以及新疆哲罗鲑和黑龙江哲罗鲑之间在第二和第三主成分散点图中独立的更加明显(图 2C), 形成了 3 个分支。

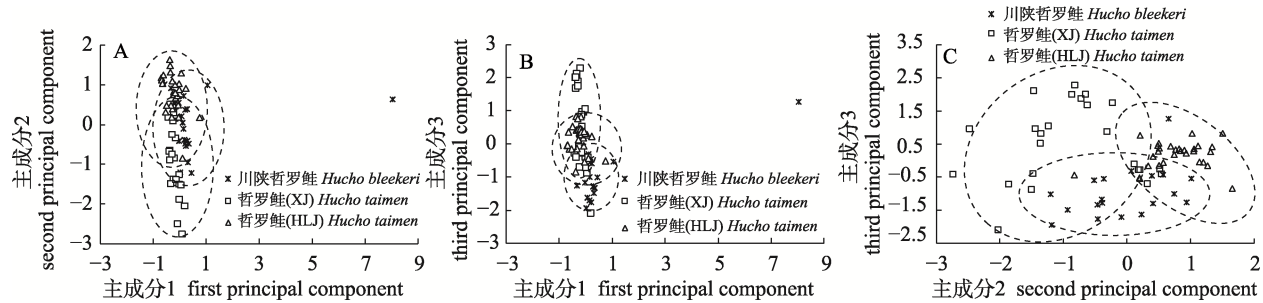


图 2 哲罗鲑和川陕哲罗鲑主成分散点图

A-第一、二主成分散点图, B-第一、三主成分散点图, C-第二、三主成分散点图. XJ-哲罗鲑新疆群体, HLJ-哲罗鲑黑龙江群体.

Fig. 2 Plot of the principal components of *Hucho taimen* and *Hucho bleekeri*

A-plot of the first and second principal components; B-plot of the first and third principal components; C-plot of the second and third principal components. XJ-population of *Hucho taimen* from Xinjiang Uygur Autonomous Region; HLJ-population of *Hucho taimen* from Heilongjiang Province.

2.4 判别分析

基于 29 项在群体间差异显著的量度特征对哲罗鲑 XJ 群体、HLJ 群体以及川陕哲罗鲑群体进行判别分析(表 5), 排除了 19 项对形态差异作用较小的量度特征, 仅保留 EI/BL、ED/BL、HE/BL、CL/BL、CH/BL、 D_{11-12} /BL、 D_{2-3} /BL、 D_{2-11} /BL、 D_{6-7} /BL 和 D_{7-8} /BL 等 10 项量度特征用于判别分析, 样本被分类到各自对应群体的判别准确率为 100%。根据判别结果构建哲罗鲑 XJ 群体、HLJ 群体以及川陕哲罗鲑群体 Fisher 线性判别函数如下:

哲罗鲑(XJ): $Y = -520.886 + 817.957X_1 + 1092.635X_2 + 1863.632X_3 + 1676.174X_4 + 6830.580X_5 - 635.871X_6 + 215.127X_7 + 1058.934X_8 - 2714.394X_9 + 62.897X_{10}$

哲罗鲑 (HLJ) : $Y = -506.513 + 645.422X_1 + 1326.696X_2 + 1924.811X_3 + 929.056X_4 + 7527.006X_5 - 703.193X_6 + 553.069X_7 + 893.564X_8 - 3294.234X_9 + 773.662X_{10}$

川陕哲罗鲑 : $Y = -594.093 + 653.016X_1 + 2108.373X_2 + 1618.630X_3 + 1346.976X_4 + 8556.112X_5 - 435.578X_6 + 377.276X_7 + 1018.591X_8 - 3576.220X_9 + 298.849X_{10}$

式中, X_1 为 EI/BL、 X_2 为 ED/BL、 X_3 为 HE/BL、 X_4 为 CL/BL、 X_5 为 CH/BL、 X_6 为 D_{11-12} /BL、 X_7 为 D_{2-3} /BL、 X_8 为 D_{2-11} /BL、 X_9 为 D_{6-7} /BL、 X_{10} 为 D_{7-8} /BL。

表 5 哲罗鲑和川陕哲罗鲑群体间欧氏距离
Tab. 5 Euclidean distance between populations of *Hucho taimen* and *Hucho bleekeri*

群体 population	欧氏距离 Euclidean distance	
	哲罗鲑 (XJ) <i>Hucho taimen</i>	哲罗鲑 (HLJ) <i>Hucho taimen</i>
哲罗鲑 (HLJ) <i>Hucho taimen</i>	0.082	
川陕哲罗鲑 <i>Hucho bleekeri</i>	0.125	0.134

注: XJ-哲罗鲑新疆群体, HLJ-哲罗鲑黑龙江群体。
Note: XJ-population of *Hucho taimen* from Xinjiang Uygur Autonomous Region; HLJ-population of *Hucho taimen* from Heilongjiang Province.

2.5 聚类分析

利用哲罗鲑 XJ 群体、HLJ 群体以及川陕哲罗鲑群体 35 项标准化后的量度特征的平均值进行聚类分析, 首先计算出两两群体之间的欧氏距离, 结果显示川陕哲罗鲑与哲罗鲑 HLJ 群体之间的欧

氏距离略高于哲罗鲑 XJ 群体, 表明川陕哲罗鲑与新疆的哲罗鲑亲缘关系更近。川陕哲罗鲑与哲罗鲑之间的欧氏距离明显高于哲罗鲑地理群体之间的欧氏距离, 这体现了种间的差异。然后依据欧氏距离构建系统聚类树(图 3), 结果显示 2 个哲罗鲑地理群体聚为了一支, 川陕哲罗鲑独立为另一支。

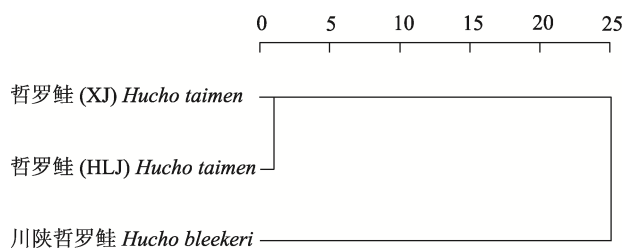


图 3 基于量度特征构建的哲罗鲑和川陕哲罗鲑群体聚类图

XJ-哲罗鲑新疆群体, HLJ-哲罗鲑黑龙江群体。

Fig. 3 Dendrogram of *Hucho taimen* and *Hucho bleekeri* populations constructed by metrical characteristics
XJ-population of *Hucho taimen* from Xinjiang Uygur Autonomous Region; HLJ-population of *Hucho taimen* from Heilongjiang Province.

3 讨论

传统形态学中, 分节特征是对鱼类进行物种鉴定的主要技术指标^[23], 比较哲罗鲑两个地理群体之间的分节特征发现, 仅侧线鳞平均数存在显著差异($P < 0.05$), 表明二者在形态学上存在一定程度的分化倾向, 这与汪鄂洲等^[19]的遗传学分析结果相符, 但二者的侧线鳞的数值区间又存在明显交叉且其余的分节特征均无显著性差异($P > 0.05$), 表明哲罗鲑的 XJ 和 HLJ 群体的分节特征并未因长期地理隔离而产生的较大程度分化, 二者仍属同一物种。比较哲罗鲑和川陕哲罗鲑之间的分节特征发现, 川陕哲罗鲑的臀鳍分支鳍条、侧线鳞和幽门盲囊平均数显著低于哲罗鲑($P < 0.05$), 且该 3 项分节特征的数值区间在两个物种间不存在交叉, 可作为这两个物种的区分特征。

单因素方差分析是用来检验单因素试验条件下, 多个独立组别是否服从正态分布^[17], 还可帮助剔除对组间差异无影响的无关变量, 简化数据分析过程。对 35 项标准化量度特征进行单因素方

差分析的结果显示, 除 D_{1-2}/BL 、 D_{1-11}/BL 、 D_{5-6}/BL 、 D_{5-7}/BL 、 D_{9-10}/BL 和 D_{10-11}/BL 等 6 项指标外, 川陕哲罗鲑和哲罗鲑的剩余 29 项形量度特征均呈显著性差异($P < 0.05$), 表明川陕哲罗鲑和哲罗鲑的躯干部的形态学差异较大、在头尾部的差异相对较小。哲罗鲑种内比较结果显示, XJ 和 HLJ 群体仅在 14 项主要描述头部和尾部的量度特征上存在显著性差异($P < 0.05$), 表明哲罗鲑两个地理群体间的形态差异主要存在头部和尾部。

主成分分析是一种常用的多变量分析方法^[23], 可以将原始数据中相关性较强的变量进行整合, 进而拟合出数量较少的两两之间不相关的且尽可能保持原有信息的新变量, 以简化数据分析过程, 目前在鱼类群体判别中应用广泛^[21,23-25]。对哲罗鲑 XJ 群体、HLJ 群体以及川陕哲罗鲑群体的标准化后的量度特征进行主成分分析, 得到 4 个特征值大于 1 的主成分, 其中前三个主成分的累积贡献率达到了 83.450%, 低于 85%的临界值, 表明哲罗鲑 XJ 群体、HLJ 群体以及川陕哲罗鲑群体的量度特征的差异不能简单用个别指标进行解释^[26]。构建第一、二、三主成分两两之间的散点图发现, 哲罗鲑 XJ 群体、HLJ 群体以及川陕哲罗鲑群体在散点图中虽能形成相对集中的组, 但相互之间仍存在个体交叉, 区分不明显, 也印证了这一观点。此外, 比较发现, 第一主成分贡献率远远高于第二、三和四主成分, 且第一主成分主要反应了躯干后部斜向特征, 暗示哲罗鲑 XJ 群体、HLJ 群体以及川陕哲罗鲑群体之间的形态差异主要集中于躯干后部, 这与斑尾刺虾虎鱼(*Acanthogobius ommaturus*)和黄鳍刺虾虎鱼(*Acanthogobius flavimanus*)之间的形态差异结果相同^[23]。

判别分析是综合研判研究对象的各项特征值进而判断其归属问题的一种多变量统计分析方法^[17]。对标准化后的量度特征进行判别分析, 剔除无关变量后, 得到 Fisher 线性判别函数, 结果显示判别函数的综合判别率高达 100%, 表明通过判别公式可对哲罗鲑 XJ 群体、HLJ 群体以及川陕哲罗鲑群体进行准确区分。

聚类分析是根据数据的相似性将数据分类到不同的组的过程, 通过欧氏距离对哲罗鲑 XJ 群

体、HLJ 群体以及川陕哲罗鲑群体构建系统聚类树,结果表明哲罗鲑的 XJ 和 HLJ 群体以种内差异具有较近的亲缘关系,哲罗鲑和川陕哲罗鲑以种间差异而具有较远的亲缘关系,这一聚类结果符合学术界的共识。

4 结论

对哲罗鲑 XJ 群体、HLJ 群体以及川陕哲罗鲑群体的表观形态形状进行多元统计分析,结果证实:(1)哲罗鲑 XJ 和 HLJ 群体在长期地理隔离过程中发生了形态学差异,但差异程度较低,二者亲缘关系较近且不具有可明显区分的形态特征,仍属同一个物种。(2)川陕哲罗鲑与哲罗鲑在臀鳍分支鳍条、侧线鳞和幽门盲囊数等分节特征上区别明显,二者在量度特征上的差异主要体现于躯干部。此外川陕哲罗鲑在形态学上与新疆的哲罗鲑群体亲缘关系更近,推测川陕哲罗鲑由额尔齐斯河流域哲罗鲑南迁进化而来。

参考文献:

- [1] Tong G X. Studies on genetic characteristics of Taimen (*Hucho taimen*)[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021. [佟广香. 哲罗鲑(*Hucho taimen*)遗传特性研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.]
- [2] Gou A M, Kadirdin A, Jiao L, et al. Morphology and CO I genes of different sources of *Hucho taimen* in the Irtysh River Basin[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2020, 44(1): 36-43. [郭爱民, 喀迪尔丁·艾尔肯, 焦丽, 等. 额尔齐斯河流域不同来源哲罗鲑形态及 CO I 基因比较研究[J]. 水生生物学报, 2020, 44(1): 36-43.]
- [3] Wu J M, Yang H C, Wang C Y, et al. Effects of initial feeding on the growth and survival of Sichuan Taimen (*Hucho bleekeri*) larvae[J]. Sichuan Journal of Zoology, 2015, 34(5): 752-755. [吴金明, 杨焕超, 王成友, 等. 不同开口饵料对川陕哲罗鲑仔鱼生长和存活的影响[J]. 四川动物, 2015, 34(5): 752-755.]
- [4] Du H, Li L X, Wei Q W, et al. The rediscovery of *Hucho bleekeri* in the Taibai River, the upper tributary of the Hanjiang River, China[J]. Chinese Journal of Zoology, 2014, 49(3): 414. [杜浩, 李罗新, 危起伟, 等. 濒危物种川陕哲罗鲑在汉江上游太白河再发现[J]. 动物学杂志, 2014, 49(3): 414.]
- [5] National Forestry and Grassland Administration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Announcement of National Forestry and Grassland Administration and Ministry of Agriculture and Rural Affairs (No. 3 in 2021) (List of National Key Protected Wildlife)[EB/OL]. Beijing: National Forestry and Grassland Administration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs 2021[2022-8-16]. <http://www.forestry.gov.cn/main/5461/20210205/122418860831352.html>. [国家林业和草原局, 农业农村部. 国家林业和草原局农业农村部公告 (2021 年第 3 号) (国家重点保护野生动物名录)[EB/OL]. 北京: 国家林业和草原局 农业农村部, 2021 [2022-8-16]. <http://www.forestry.gov.cn/main/5461/20210205/122418860831352.html>.]
- [6] Tong G X, Tang G P, Xu W, et al. Characterization of sex-specific marker in *Hucho taimen* (Pallas)[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2021, 45(4): 728-733. [佟广香, 唐国盘, 徐伟, 等. 哲罗鲑性别特异性标记筛选[J]. 水生生物学报, 2021, 45(4): 728-733.]
- [7] Tong G X, Xu W, Zhang Y Q, et al. De novo assembly and characterization of the *Hucho taimen* transcriptome[J]. Ecology and Evolution, 2017, 8(2): 1271-1285.
- [8] Wang Y L, Wang C G, Liu H B, et al. Effects of different kinds of feed on digestive enzyme activity and intestinal morphology of *Hucho taimen*[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2021, 43(1): 182-189. [王亚玲, 王常安, 刘红柏, 等. 投喂野生鲫和人工配合饲料对哲罗鲑消化生理的影响[J]. 江西农业大学学报, 2021, 43(1): 182-189.]
- [9] Zhang M Y, Wang C G, Xu Q Y, et al. Effects of myo-inositol on antioxidant capacity and histopathological observation of *Hucho taimen*[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2015, 27(2): 631-637. [张美彦, 王常安, 徐奇友, 等. 肌醇对哲罗鲑抗氧化能力的影响及组织病理学观察[J]. 动物营养学报, 2015, 27(2): 631-637.]
- [10] Li S W, Wang D, Liu H B, et al. Expression and antimicrobial activity of c-type lysozyme in Taimen (*Hucho taimen*, Pallas)[J]. Developmental & Comparative Immunology, 2016, 63: 156-162.
- [11] Wang X Y, Xu L M, Liu M, et al. Prokaryotic expression and bioactivity analysis of insulin-like growth factor-I from *Hucho taimen*[J]. Journal of Fisheries of China, 2016, 40(11): 1657-1663. [王晓玉, 徐黎明, 刘森, 等. 哲罗鲑胰岛素样生长因子-I 的原核表达及活性鉴定[J]. 水产学报, 2016, 40(11): 1657-1663.]
- [12] Zhang Y Q, Luan P X, Ren G M, et al. Estimating the inbreeding level and genetic relatedness in an isolated population of critically endangered Sichuan Taimen (*Hucho bleekeri*) using genome-wide SNP markers[J]. Ecology and Evolution, 2020, 10(3): 1390-1400.
- [13] Zhang S H, Wei Q W, Du H, et al. The complete mitochondrial genome of the endangered *Hucho bleekeri* (Salmonidae: Huchen)[J]. Mitochondrial DNA Part A, 2016, 27(1): 124-125.
- [14] Yang H C, Yang X G, Wu J M, et al. Early development of *Hucho bleekeri* Kimura[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2016, 23(4): 759-770. [杨焕超, 杨晓鸽, 吴金明, 等.

- 川陕哲罗鲑个体的早期发育观察[J]. 中国水产科学, 2016, 23(4): 759-770.]
- [15] Wang C Y, Du H, Wu J M, et al. Effect of illumination on the hatching of Sichuan Taimen (*Hucho bleekeri* Kimura) eggs[J]. Freshwater Fisheries, 2019, 49(1): 62-65. [王成友, 杜浩, 吴金明, 等. 光照对川陕哲罗鲑受精卵孵化的影响[J]. 淡水渔业, 2019, 49(1): 62-65.]
- [16] Wang K, Zhang S H, Wang D Q, et al. Conservation genetics assessment and phylogenetic relationships of critically endangered *Hucho bleekeri* in China[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2016, 32(2): n/a.
- [17] Gao T X, Han G, Ma G Q, et al. Morphological variation analysis of *C. lucidus* and *C. niveatus*[J]. Periodical of Ocean University of China, 2013, 43(1): 27-33. [高天翔, 韩刚, 马国强, 等. 黑鳃梅童鱼和棘头梅童鱼的形态学比较研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2013, 43(1): 27-33.]
- [18] Li Z H, Liu Z L, Wang M L, et al. A review on studies of speciation in the presence of gene flow: Evolution of reproductive isolation[J]. Biodiversity Science, 2014, 22(1): 88-96. [李忠虎, 刘占林, 王玛丽, 等. 基因流存在条件下的物种形成研究述评: 生殖隔离机制进化[J]. 生物多样性, 2014, 22(1): 88-96.]
- [19] Wang E Z, Liao X L, Yang Z, et al. Analysis of genetic differentiation for *Hucho taimen* populations in the Irtysh and Amur River Basins based on mitochondrial DNA sequencing[J]. Journal of Hydroecology, 2019, 40(4): 75-82. [汪鄂洲, 廖小林, 杨钟, 等. 额尔齐斯河与黑龙江流域哲罗鲑群体遗传差异比较[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(4): 75-82.]
- [20] Ma B, Huo T B, Jiang Z F. A new record species of the genus *Thymallus* (Salmoniformes, Thymallidae) in China[J]. Acta Zootaxonomica Sinica, 2007, 32(4): 986-988. [马波, 霍堂斌, 姜作发. 中国黑龙江水系茴鱼属一新纪录种(鲑形目, 茴鱼科)[J]. 动物分类学报, 2007, 32(4): 986-988.]
- [21] Cao X Y, Zhao J L, Li C H, et al. Morphological and skeletal comparison and ecological adaptability of Mandarin fish *Siniperca chuatsi* and big-eye Mandarin fish *Siniperca kneri*[J]. Aquaculture and Fisheries, 2021, 6(5): 455-464.
- [22] Hashemzadeh Segherloo I, Normandeau E, Benestan L, et al. Genetic and morphological support for possible sympatric origin of fish from subterranean habitats[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 2909.
- [23] Sun Z C, Li Y D, Song C Y, et al. Comparative studies on morphology and genetics between *Acanthogobius ommaturus* and *Acanthogobius flavimanus*[J]. Journal of Fisheries of China, 2020, 44(8): 1237-1248. [孙志成, 李亚东, 宋晨雨, 等. 斑尾刺虾虎鱼和黄鳍刺虾虎鱼的形态学、遗传学比较[J]. 水产学报, 2020, 44(8): 1237-1248.]
- [24] Yin J, Mu X X, Zhang C L, et al. Comparison of morphological and genetic characteristics of *Conger myriaster* populations in China[J]. Journal of Fisheries of China, 2020, 44(3): 358-367. [尹洁, 牟秀霞, 张崇良, 等. 我国近海星康吉鳗群体的形态学、遗传学比较研究[J]. 水产学报, 2020, 44(3): 358-367.]
- [25] Resende S V, Kavalco K F, Pazza R. Morphological and genetic divergence of a small stream fish species along a watershed[J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2016, 68: 66-73.
- [26] Voss R S, Marcus L F, Patricia Escalante P. Morphological evolution in muroid rodents i. conservative patterns of craniometric covariance and their ontogenetic basis in the neotropical genus *zygodontomys*[J]. Evolution; International Journal of Organic Evolution, 1990, 44(6): 1568-1587.

Multivariate analysis of *Hucho taimen* and *Hucho bleekeri* populations based on morphological characteristics

MA Kai^{1,2}, TONG Guangxiang^{1,2}, ZHANG Lanlan³, ZHAO Cheng¹, HE Baoquan¹, YIN Jiasheng^{1,2}, ZHANG Yongquan^{1,2}

1. Heilongjiang River Fishery Research Institute of Chinese Academy of Fishery Sciences, Harbin 150076, China;

2. Key Open Laboratory of Cold-Water Fish Germplasm Resources and Aquaculture of Heilongjiang Province, Harbin 150076, China

3. Heilongjiang Province Fisheries Technology Extension Center, Harbin 150010, China

Abstract: *Hucho taimen* and *Hucho bleekeri* belong to Salmoniformes, Salmonidae. *Hucho* are a genus of ferocious large cold-water fishes. There are two main distribution areas of *H. taimen* in China, namely, the Heilongjiang River Basin in the northeast and the Irtysh River Basin in the northwest. Existing research

shows that from the early to the middle of the tertiary period, the Heilongjiang River Basin and the Irtysh River Basin were connected by a vast lake group distributed in northern China and Mongolia. Based on this geographical condition, the *H. taimen* in the two basins could freely communicate and diffuse in this period. After the middle of the tertiary period, the rivers and lakes connecting the Heilongjiang River Basin and the Irtysh River Basin shrank, and the gene exchange between the two basins stopped as the two basins became geographically isolated. *H. bleekeri* is an endemic species in China and the species with the lowest distribution latitude among the five species of *Hucho*. During the quaternary glacial period, the climate of Sichuan Province, Shaanxi Province, and Qinghai Province became cold, and *H. bleekeri* ancestors moved south from the northern region with a high latitude to the Yangtze River Basin. After the end of the ice sealing period, they stayed in the rivers with high altitudes and low water temperatures, and gradually evolved into the existing *H. bleekeri*, which is considered as a living fossil for studying the relationship between fish evolution and climate change.

To determine the internal and external morphological variation between the rare and endangered *H. taimen* and *H. bleekeri*, *H. taimen* from Xinjiang Uygur Autonomous Region and Heilongjiang Province and *H. bleekeri* from Shaanxi Province were used as the research object. Nine segmented characteristics and 35 standardized measurement characteristics of the three populations were statistically analyzed using the traditional morphological method and the frame measurement method. The results showed that there was a significant difference in the mean number of lateral line scale between the two geographical populations of *H. taimen* ($P < 0.05$), but as a whole, the two populations of *H. taimen* had individual crossover in all nine segmented characteristics, which could not be distinguished. The average number of dorsal fin branched fin-ray, lateral line scale, and pyloric caecum of *H. bleekeri* was significantly lower than that of *H. taimen* ($P < 0.05$), and there was no individual crossover between these three parameters, so the distinction was obvious. Four principal components with eigenvalues greater than 1 were screened out using principal component analysis, with a cumulative contribution rate of 88.928%, of which the first principal component had the highest contribution rate, which mainly explained the difference in trunk oblique morphology of the three groups. Constructing the two-dimensional scatter plot of principal components, it was found that although the three groups can form relatively independent groups, there were still individual intersections among them, which indicated that the difference in measurement characteristics of the three groups couldn't be described simply by any two principal components, and all principal components should be considered comprehensively. One-way ANOVA showed that there were only 14 significant differences ($P < 0.05$) in the measurement characteristics mainly describing the head and tail of *H. taimen*, while there were 29 significant differences ($P < 0.05$) in the measurement characteristics mainly describing the trunk between *H. taimen* and *H. bleekeri*. A total of 10 measurement characteristics were screened out by discriminant analysis to establish Fisher linear discriminant function, and the discriminant rate of individuals being correctly classified into their respective populations was as high as 100%. Cluster analysis showed that the two geographical groups of *H. taimen* had the closest genetic relationship, and the genetic relationship between *H. bleekeri* and the *H. taimen* from the Xinjiang Uygur Autonomous Region was closer than that of Heilongjiang Province. The comprehensive analysis shows that: (1) there were some morphological differences between the two geographical groups of *H. taimen*, but they still belong to the same species; and (2) the morphological variations between *H. taimen* and *H. bleekeri* were concentrated in the trunk. The segmented characteristics such as the dorsal fin branched fin-ray, lateral line scale, and pyloric caecum could be used as the identification characteristics of the two species. *H. bleekeri* might have evolved from *H. taimen* from the Xinjiang Uygur Autonomous Region.

Key words: *Hucho taimen*; *Hucho bleekeri*; morphological variation; principal component analysis; discriminant analysis

Corresponding author: ZHANG Yongquan. E-mail: atai0805@163.com