

doi: 10.7541/2018.069

基于形态学差异探讨秦岭细鳞鲑亚种有效性问题

蒙彦晓¹ 王桂华¹ 熊冬梅¹ 刘海侠¹ 张建禄² 王继隆³ 王立新¹ 刘小林¹

(1. 西北农林科技大学动科学院水产科学教研室, 杨凌 712100; 2. 陕西省动物研究所, 西安 710032;

3. 中国水产科学研究院黑龙江水产研究所, 哈尔滨 150070)

摘要: 秦岭细鳞鲑(*Brachymystax lenok tsinlingensis* Li)的亚种分类地位自命名以来一直饱受争议。研究运用单因素方差分析、主成分分析、判别分析、聚类分析及差异系数检验法,对秦岭细鳞鲑和黑龙江流域的尖吻细鳞鲑(*B. lenok lenok*)和钝吻细鳞鲑(*B. tumensis*)的5项可数性状和34项标准化后的比例性状进行统计分析。单因素方差分析结果表明,尖吻细鳞鲑、钝吻细鳞鲑和秦岭细鳞鲑在32项比例性状和5项可数性状上存在极显著差异($P < 0.01$);主成分分析结果显示,贡献率较大的前3个主成分的累计贡献率为92.779%;以逐步判别分析方法选用14个判别效果较好的比例性状构建了3个细鳞鲑类群的判别函数,综合判别率为99.4%。基于欧式距离矩阵法构建的形态学聚类图显示,秦岭细鳞鲑和尖吻细鳞鲑距离较近,而与钝吻细鳞鲑距离较远。据Mayr 75%亚种识别和划分规则,34项比例性状和5项可数性状中,尖吻细鳞鲑和秦岭细鳞鲑第一鳃弓外鳃耙数目的差异系数大于1.28,而钝吻细鳞鲑和秦岭细鳞鲑有31项比例性状和2项可数性状的差异系数高于1.28。据分析结果,结合秦岭细鳞鲑地理隔离的事实及其与尖吻细鳞鲑和钝吻细鳞鲑的形态差异,推断秦岭细鳞鲑与黑龙江流域内的尖吻细鳞鲑的形态差异程度至少已达亚种水平。

关键词: 秦岭细鳞鲑; 尖吻细鳞鲑; 钝吻细鳞鲑; 形态差异; 多元统计分析

中图分类号: Q959.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2018)03-0550-11

细鳞鲑属鱼类(*Brachymystax*)简称细鳞鲑,隶属于鲑形目(Salmoniformes)、鲑科(Salmonidae),典型的冷水性鱼类,又称为江细鳞、山细鳞(东北地区)^[1],五色鱼(陕西),梅花鱼(甘肃)等^[2,3]。该属物种主要分布在西伯利亚东部、蒙古北部、中国北方及韩国等地^[4],在我国呈点状不连续分布,秦岭是其分布的最南端^[5]。细鳞鲑在秦岭地区主要分布于陕西黑河、胥水河、石头河和太白河等山区溪流以及甘肃的渭水支流上游。由于过度捕捞、水域污染和生境破坏等因素,秦岭细鳞鲑野生种群数量锐减,早在1998年已列为国家Ⅱ级重点保护野生动物^[6]。近年来,细鳞鲑作为一种重要的资源保护物种和养殖潜力巨大的冷水性经济鱼类,引起了国内外学者的广泛关注^[7-13]。然而,关于秦岭细鳞鲑的亚种分类地位有效性问题一直存在争议,一种学术

观点认为秦岭地区的细鳞鲑(*Brachymystax lenok tsinlingensis* Li, 1966)有别于分布在新疆和黑龙江地区的细鳞鲑[*B. lenok lenok* (Pallas, 1773)],被认为是一个新亚种^[5,6,14,15];另一种观点则认为细鳞鲑在我国不存在亚种分化^[2,16,17]。此外,分布于黑龙江流域的细鳞鲑依据吻部特征被细分为钝吻细鳞鲑(*B. tumensis* Mori, 1930)和尖吻细鳞鲑(*Brachymystax lenok*)^[18-22],且钝吻细鳞鲑形态特征更接近于秦岭细鳞鲑^[18],但也有学者认为秦岭细鳞鲑的某些形态特征与尖吻细鳞鲑和钝吻细鳞鲑都不符合^[23]。秦岭细鳞鲑作为濒危保护物种,其分类地位仍不明晰,将影响其后续的资源保护和生物学研究。

早期细鳞鲑形态学研究多采用传统形态学测量和解剖观察法^[2,14,16-18,24,25],缺乏基于整体框架结构的形态差异比较以及对数据的进一步统计分

收稿日期: 2017-06-12; 修订日期: 2017-12-11

基金项目: 国家自然科学基金(31302189); 中央高校基本科研业务费(QN2013027和2452015032); 陕西省博士后项目(k305021306)资助
[Supported by the National Natural Science Foundation of China (31302189); the Fundamental Research Funds for the Central Universities (QN2013027, 2452015032); the Shaanxi Province Postdoctoral Foundation (k305021306)]

作者简介: 蒙彦晓(1992—),女,甘肃靖远人;硕士研究生;主要从事渔业生态研究。E-mail: mengyanxiao@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 熊冬梅(1982—),女,博士,讲师;主要从事渔业生态和水环境毒理研究。E-mail: xiongdongmei@nwsuaf.edu.cn

析(如主成分分析、聚类分析和单因素方差分析等)。本研究基于框架结构形态度量学方法^[26], 运用统计分析手段比较细鳞鱼属的尖吻细鳞鲑、钝吻细鳞鲑和秦岭细鳞鲑的形态差异, 以期澄清秦岭细鳞鲑的分类地位争议, 为进一步开展细鳞鲑遗传学研究提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 实验材料

样本于2014年至2017年分别采自陕西省和黑龙江省, 共计178尾。依据样本的地理分布位置、吻部形态特征、体色及斑点形状等^[18, 23]划分为尖吻细鳞鲑、钝吻细鳞鲑和秦岭细鳞鲑3个类群。其中, 尖吻细鳞鲑的平均体长为(21.75±3.87) cm, 平均体重为(188.12±99.11) g; 钝吻细鳞鲑的平均体长为(34.43±2.68) cm, 平均体重为(550.17±131.89) g; 秦岭细鳞鲑的平均体长为(14.75±3.19) cm, 平均体重为(45.13±29.29) g。样本详细信息见表1。

1.2 数据测量

形态学数据包括可量性状和可数性状。可量性状除11项传统形态学指标(如体长、体高等)外, 参照框架方法^[26]选取10个同源坐标点, 构成24项框架参数(图1和表2), 共35项原始形态测量值, 精确至0.01 cm。经直接计数法统计5项可数性状, 包括第一鳃弓外鳃耙数、幽门盲囊数、侧线上鳞数、侧线鳞行数和侧线下鳞数。

1.3 形态度量性状测量值的标准化

鱼体异速生长, 即鱼体自身规格大小的异质性可能会导致形状异质性, 从而掩盖样本间身体比例差异信息, 对形态测量分析结果产生一定的影响^[27]。由于秦岭细鳞鲑类群存在个体小型化趋势^[7, 28], 体长小于黑龙江流域内的同龄细鳞鲑^[19, 29]。为有效地描述并辨识各类群的形态差异, 对35项可量性状的原始值进行对数转换, 以消除样本间异速生长及采样时间跨度大对分析结果可能造成的影响^[30]。

文中提到的34项比例性状均指经过对数转换后的比值。数据标准化公式如下:

$$M = \frac{\lg M_o}{\lg L_o}$$

式中, M 是原始测量值按对数转换后的比例值; M_o 是原始测量值; L_o 是标准体长。

1.4 数据处理

运用Excel和SPSS 18.0软件对5项可数性状及34项比例性状进行统计分析。方差分析: 对所得数据进行方差齐性检验和单因素方差分析(One-way ANOVA), 对具有方差齐性的变量进行Duncan's多重比较, 对不具方差齐性的变量采用Tamhane's T2法分析(显著性水平 $P=0.05$)。主成分分析: 使用KMO和Bartlett检验34项比例性状是否适合于因子分析^[31], 并提取特征值和累计贡献率, 选取累计贡献率大于85%的前3个主成分, 绘制主成分1、2散点图。判别分析: 34项比例性状用逐步判别法建立分类判别函数, 据此对各类群进行预测分类, 建立典型判别函数得分图, 计算判别准确率和综合判别率, 公式如下:

$$\text{判别准确率}(\%) = \frac{\text{某类群判别正确的细鳞鲑尾数}}{\text{实际尾数}} \times 100$$

$$\text{综合判别率}(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{\sum_{i=1}^n B_i} \times 100 \quad (i = 1, 2, 3, \dots)$$

其中: A_i 表示第*i*个类群判别正确的尾数, B_i 表示第*i*个类群的实际尾数, n 表示类群数。

聚类分析: 使用34项比例性状的平均值基于欧氏距离矩阵法构建聚类树。差异系数检验: 参照Mayr等^[32]识别和划分亚种的75%规则, 计算5项可数性状和34项比例性状的差异系数(CD值), $CD = |M_1 - M_2| / (S_1 + S_2)$ 计算。式中 M_1 、 M_2 和 S_1 、 S_2 分别表示2个类群的平均值与标准差。

表1 三个细鳞鲑类群的样本信息
Tab. 1 Sample information of three *Brachymystax* groups

类群Group	采集地点Location	数量Size	体长Length (cm)	体重Weight (g)	经度Longitude	纬度Latitude
尖吻细鳞鲑 <i>B. lenok lenok</i>	呼玛河Huma River	32			126° 29'E	51° 42'N
	乌苏里江抓吉段Zhuaji in Wusuli River	8	21.75±3.87	188.12±99.11	134° 39'E	48° 13'N
钝吻细鳞鲑 <i>B. tumensis</i>	乌苏里江抓吉段Zhuaji in Wusuli River	18			134° 39'E	48° 13'N
	乌苏里江海青段Haiqing in Wusuli River	53	34.43±2.68	550.17±131.89	134° 39'E	47° 52'N
秦岭细鳞鲑 <i>B. lenok tsinlingensis</i>	陕西黑河Heihe in Shaanxi	59	14.75±3.19	45.13±29.29	107° 49'E	33° 50'N
	陕西胥水河Xushui River in Shaanxi	8			107° 27'E	33° 44'N

2 结果

2.1 方差分析

单因素方差分析的结果表明34项比例性状中有32项性状在3个细鳞鲑类群间差异显著($P<0.01$), 仅C5(眼径)/C1(体长)和C16(吻端至臀鳍起点的距离)/C1(体长)分别在尖吻细鳞鲑和秦岭细鳞鲑类群间、尖吻细鳞鲑和钝吻细鳞鲑类群间差异不显著($P>0.05$); 5项可数性状的平均水平在3个类群间均存在显著性差异($P<0.01$, 表3和表4)。

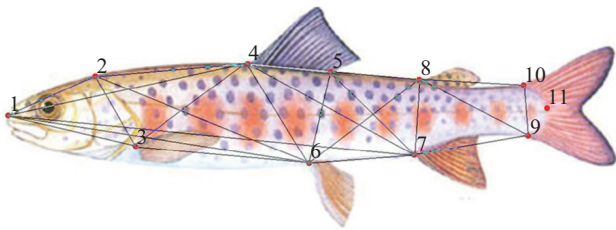


图1 细鳞鲑的框架坐标图

Fig. 1 Truss figure of *Brachymystax*

1. 吻端; 2. 头背部末端; 3. 胸鳍起点; 4. 背鳍起点; 5. 背鳍基部末端; 6. 腹鳍起点; 7. 臀鳍起点; 8. 脂鳍起点; 9. 尾鳍腹部起点; 10. 尾鳍背部起点; 11. 尾鳍基部末端
1. Snout tip; 2. Occiput; 3. Pectoral fin origin; 4. Dorsal fin origin; 5. Posterior insertion of dorsal fin; 6. Pelvic fin origin; 7. Anal fin origin; 8. Adipose fin origin; 9. Ventral origin of caudal fin; 10. Dorsal origin of caudal fin; 11. End of caudal fin base

2.2 主成分分析

因子分析适合度检验: KMO越接近于1, Bartlett的球形度检验显著性水平越好($P<0.05$), 形态度量性状越适合作因子分析^[31]。检验结果显示: 34项比例性状在类群间存在极显著差异($P<0.001$), KMO度量值为0.954, 所选变量均适合于因子分析。

主成分分析结果显示, 前3个主成分的累计贡献率高达92.779%, 即前3个主成分能够解释3个类群间形态差异的92.779%。第1主成分的贡献率为87.581%, 其余2项的贡献率分别为2.698%和2.500%。表5可知, 所有的形态学性状与第1主成分呈正相关, 各项变量的负荷值较高。根据第1、2主成分绘制散点图(图2), 在主成分1、2水平上尖吻细鳞鲑、钝吻细鳞鲑和秦岭细鳞鲑类群间仅个别样本重叠分布。

2.3 建立判别函数

利用逐步筛选法对3个细鳞鲑类群的34项比例性状进行判别分析, 建立典型判别分析函数得分图(图3), 函数1和函数2的贡献率分别为98.3%和1.7%, 涵盖了类群间所有的形态差异。图3可看出, 尖吻细鳞鲑、钝吻细鳞鲑和秦岭细鳞鲑各自成一个群组, 三者能够明显区分, 没有重叠。

从34项比例性状中筛选出14项有显著贡献的比例性状, 并用这14项比例性状建立3个细鳞鲑类群的分类判别函数如下:

表2 35项形态度量性状

Tab. 2 Thirty-five morphological characters of the specimens

代码Code	度量性状Measurement character	代码Code	度量性状Measurement character
C1	体长(1—11, 吻端至尾鳍基部末端的水平距离)	C19	2—6 (头背部末端至腹鳍起点的距离)
C2	体高(鱼体的最大高度, 一般指背鳍起点的垂直高度)	C20	3—4 (胸鳍起点至背鳍起点的距离)
C3	头长(吻端到鳃盖后缘之间的水平距离)	C21	3—6 (胸鳍起点至腹鳍起点的距离)
C4	吻长(吻端到眼眶前缘之间的水平距离)	C22	3—4 (背鳍基长)
C5	眼径(眼眶前后缘之间的水平距离)	C23	4—6 (背鳍起点至腹鳍起点的距离)
C6	尾柄长(臀鳍基末端至尾鳍基之间的水平距离)	C24	4—7 (背鳍起点至臀鳍起点的距离)
C7	尾柄高(尾柄最小高度)	C25	4—8 (背鳍起点至脂鳍基部起点的距离)
C8	背鳍长	C26	5—6 (背鳍基末端至腹鳍起点的距离)
C9	胸鳍长	C27	5—7 (背鳍基末端至臀鳍起点的距离)
C10	腹鳍长	C28	5—8 (背鳍基末端至脂鳍起点的距离)
C11	臀鳍长	C29	6—7 (腹鳍起点至臀鳍起点的距离)
C12	1—2 (吻端至头背部末端的距离)	C30	6—8 (腹鳍起点至脂鳍起点的距离)
C13	1—3 (吻端至胸鳍起点的距离)	C31	8—7 (脂鳍起点至臀鳍起点的距离)
C14	1—4 (吻端至背鳍起点的距离)	C32	7—9 (臀鳍起点至尾鳍腹部起点的距离)
C15	1—6 (吻端至腹鳍起点的距离)	C33	8—9 (脂鳍起点至尾鳍腹部起点的距离)
C16	1—7 (吻端至臀鳍起点的距离)	C34	8—10 (脂鳍起点至尾鳍背部起点的距离)
C17	2—3 (头背部末端至胸鳍起点的距离)	C35	9—10 (尾鳍腹部起点至尾鳍背部起点的距离)
C18	2—4 (头背部末端至背鳍起点的距离)		

表 3 三个细鳞鲑类群间34项比例性状的形态差异

Tab. 3 The morphological differences of thirty-four proportional characters among three *Brachymystax* groups

形态学指标 Morphological index	尖吻细鳞鲑 <i>B. lenok lenok</i>	钝吻细鳞鲑 <i>B. tumensis</i>	秦岭细鳞鲑 <i>B. lenok tsinlingensis</i>
C2/C1	0.53±0.03 ^b	0.57±0.02 ^c	0.45±0.07 ^a
C3/C1	0.50±0.03 ^b	0.56±0.02 ^c	0.48±0.06 ^a
C4/C1	-0.02±0.09 ^b	0.09±0.04 ^c	-0.14±0.12 ^a
C5/C1	0.04±0.06 ^a	0.17±0.03 ^b	0.04±0.08 ^a
C6/C1	0.36±0.05 ^b	0.48±0.02 ^c	0.28±0.06 ^a
C7/C1	0.20±0.04 ^b	0.30±0.02 ^c	0.12±0.09 ^a
C8/C1	0.39±0.05 ^b	0.48±0.02 ^c	0.32±0.06 ^a
C9/C1	0.39±0.04 ^b	0.49±0.02 ^c	0.34±0.07 ^a
C10/C1	0.32±0.04 ^b	0.43±0.02 ^c	0.25±0.08 ^a
C11/C1	0.34±0.06 ^b	0.46±0.02 ^c	0.29±0.07 ^a
C12/C1	0.44±0.03 ^b	0.47±0.03 ^c	0.39±0.06 ^a
C13/C1	0.50±0.02 ^b	0.55±0.01 ^c	0.46±0.05 ^a
C14/C1	0.76±0.02 ^b	0.78±0.01 ^c	0.72±0.04 ^a
C15/C1	0.82±0.01 ^b	0.83±0.01 ^c	0.79±0.03 ^a
C16/C1	0.92±0.01 ^b	0.92±0.00 ^b	0.90±0.02 ^a
C17/C1	0.36±0.04 ^b	0.45±0.02 ^c	0.31±0.07 ^a
C18/C1	0.62±0.03 ^b	0.67±0.02 ^c	0.53±0.06 ^a
C19/C1	0.73±0.02 ^b	0.77±0.01 ^c	0.68±0.04 ^a
C20/C1	0.61±0.03 ^b	0.66±0.01 ^c	0.54±0.06 ^a
C21/C1	0.66±0.02 ^b	0.70±0.01 ^c	0.59±0.05 ^a
C22/C1	0.34±0.04 ^b	0.42±0.02 ^c	0.26±0.07 ^a
C23/C1	0.51±0.03 ^b	0.57±0.02 ^c	0.45±0.06 ^a
C24/C1	0.67±0.02 ^b	0.71±0.01 ^c	0.61±0.04 ^a
C25/C1	0.64±0.03 ^b	0.94±0.02 ^c	0.57±0.05 ^a
C26/C1	0.47±0.04 ^b	0.52±0.02 ^c	0.40±0.07 ^a
C27/C1	0.55±0.03 ^b	0.61±0.01 ^c	0.47±0.06 ^a
C28/C1	0.48±0.04 ^b	0.52±0.02 ^c	0.35±0.09 ^a
C29/C1	0.51±0.03 ^b	0.57±0.02 ^c	0.39±0.07 ^a
C30/C1	0.61±0.03 ^b	0.64±0.01 ^c	0.53±0.06 ^a
C31/C1	0.41±0.03 ^b	0.48±0.02 ^c	0.33±0.08 ^a
C32/C1	0.47±0.04 ^b	0.54±0.02 ^c	0.36±0.06 ^a
C33/C1	0.49±0.03 ^b	0.59±0.02 ^c	0.40±0.06 ^a
C34/C1	0.43±0.04 ^b	0.54±0.02 ^c	0.32±0.06 ^a
C35/C1	0.22±0.04 ^b	0.35±0.02 ^c	0.12±0.09 ^a

注: 表中数值表达为平均值±标准差, 字母a、b、c代表同行数值之间差异显著水平; 不同字母表示显著性差异($P<0.05$), 相同字母表示差异不显著($P>0.05$)

Note: The values in the table are expressed as Mean ± SD; the superscript letters represent significant differences in the same row; different superscript letters indicate significant differences ($P<0.05$), and same superscript letter indicates no significant difference ($P>0.05$)

$$Y_1=19.283X_1-1389.609X_2-383.295X_3+1278.116X_4-786.714X_5+3359.066X_6+438.062X_7-2640.903X_8+4410.283X_9+4535.968X_{10}-2897.131X_{11}-307.337X_{12}+$$

$$24.148X_{13}+253.232X_{14}-3084.150$$

$$Y_2=202.415X_1-975.010X_2-180.814X_3+1233.369X_4-599.994X_5+2734.644X_6+572.431X_7-4174.366X_8+4643.042X_9+8525.419X_{10}-5027.801X_{11}-178.474X_{12}-204.235X_{13}+597.118X_{14}-4769.974$$

$$Y_3=73.470X_1-1303.408X_2-291.169X_3-1181.266X_4-728.343X_5+3076.877X_6+375.179X_7-2750.558X_8+4746.653X_9+4692.113X_{10}-3030.688X_{11}-411.677X_{12}-46.691X_{13}+201.910X_{14}-3001.380$$

Y_1 — Y_3 分别为尖吻细鳞鲑类群、钝吻细鳞鲑类群和秦岭细鳞鲑类群的判别公式; X_1 — X_{14} 分别为比例性状C5/C1、C7/C1、C9/C1、C12/C1、C17/C1、C19/C1、C21/C1、C22/C1、C24/C1、C25/C1、C28/C1、C29/C1、C32/C1、C34/C1(描述见 表 2)。

为验证上述判别函数公式的实用性, 对所有测量样本进行预测分类(表 6), 经交互验证, 178尾细鳞鲑仅1尾误判, 综合判别率为99.4%。F检验表明: 判别效果较好, $P<0.01$ 。

2.4 聚类分析

利用欧氏距离矩阵分析法对34项比例性状的平均值进行系统聚类分析, 由图 4可见, 3个类群被聚为2个不同的支, 第一支包括尖吻细鳞鲑和秦岭细鳞鲑, 提示这两者的形态距离较近; 而钝吻细鳞鲑单独成一支, 且同第一支距离较远。

2.5 差异系数检验

差异系数(CD)检验的是某一形态特征或某几个形态特征在群体间的差异程度, 一般用于亚种的识别, 而地理隔离是划分亚种的首要条件^[33]。由于尖吻细鳞鲑和钝吻细鳞鲑类群间不存在地理隔离, 因而只计算秦岭细鳞鲑与尖吻细鳞鲑、钝吻细鳞鲑类群间的差异系数。根据Mayr等^[32]提出的差异系数计算公式, 秦岭细鳞鲑和尖吻细鳞鲑之间的第一鳃弓外鳃耙数的CD值大于1.28(CD=2.01); 而秦岭细鳞鲑和钝吻细鳞鲑类群间有31项比例性状和2项可数性状的CD值大于1.28(表 7)。

2.6 尖吻细鳞鲑、钝吻细鳞鲑和秦岭细鳞鲑类群检索表

- 1(2) 近似椭圆形黑色斑点, 斑缘为淡白色环纹状.....秦岭细鳞鲑
- 2(1) 不规则黑色斑点, 斑缘无淡白色环纹状
- 3(4) 口亚下位, 上颌骨后缘不达眼中央下方; 体侧有红色斑块.....尖吻细鳞鲑
- 4(3) 口端位, 上颌骨后缘伸达眼中央下方; 体侧无红色斑块.....钝吻细鳞鲑

表 4 三个细鳞鲑类群可数性状数据及单因素方差分析结果

Tab. 4 The results of one-way ANOVA and ranges of meristic characters from three *Brachymystax* groups

可数性状Meristic characters	尖吻细鳞鲑 <i>B. lenok lenok</i>	钝吻细鳞鲑 <i>B. tumensis</i>	秦岭细鳞鲑 <i>B. lenok tsinlingensis</i>
第一鳃弓外鳃耙数 Number of outer gill rakers in the first gill arch	24.67 ^a (21—28)	20.66 ^b (18—23)	18.48 ^a (16—22)
幽门盲囊数 Number of pyloric caeca	83.30 ^b (54—114)	106.51 ^c (77—138)	59.21 ^a (42—72)
侧线上鳞数 Number of scale above lateral line	27.17 ^a (22—31)	32.99 ^c (28—38)	29.43 ^b (25—32)
侧线鳞数 Number of lateral scales	135.90 ^b (127—146)	152.82 ^c (141—167)	130.43 ^a (121—149)
侧线下鳞数 Number of scale below lateral line	25.47 ^a (20—30)	31.17 ^c (27—40)	28.24 ^b (23—32)

注: 表中上行数字为平均值, 上标不同字母表示显著性差异($P<0.05$), 相同字母表示差异不显著($P>0.05$); 下行括号中的数字代表变化范围

Note: Single value in the table is expressed as the mean values; the superscript letter represent significant difference in the same row; different letters indicate significant differences ($P<0.05$), and same letter indicate no significance ($P>0.05$); two values in the parentheses indicate the range of variation

表 5 细鳞鲑34项比例性状主成分分析的因子负荷值

Tab. 5 Factor loadings of principal components extracted from thirty-four proportional characters for the three *Brachymystax* groups

groups					
性状 Characters	主成分1 PC1	主成分2 PC2	性状 Characters	主成分1 PC1	主成分2 PC2
C2/C1	0.960	-0.096	C19/C1	0.970	-0.098
C3/C1	0.911	0.256	C20/C1	0.919	-0.124
C4/C1	0.919	0.117	C21/C1	0.930	-0.165
C5/C1	0.836	0.396	C22/C1	0.963	0.067
C6/C1	0.920	0.194	C23/C1	0.964	-0.024
C7/C1	0.979	0.039	C24/C1	0.977	-0.112
C8/C1	0.946	0.126	C25/C1	0.879	0.221
C9/C1	0.963	0.182	C26/C1	0.956	-0.080
C10/C1	0.974	0.097	C27/C1	0.979	-0.128
C11/C1	0.943	0.233	C28/C1	0.887	-0.226
C12/C1	0.880	-0.019	C29/C1	0.931	-0.180
C13/C1	0.938	0.108	C30/C1	0.943	-0.227
C14/C1	0.934	-0.115	C31/C1	0.979	-0.034
C15/C1	0.924	-0.117	C32/C1	0.915	-0.061
C16/C1	0.851	-0.413	C33/C1	0.933	0.041
C17/C1	0.959	0.085	C34/C1	0.907	0.075
C18/C1	0.968	-0.086	C35/C1	0.958	0.086

3 讨论

3.1 三个细鳞鲑类群形态差异

鱼类形态变异是其对特定栖息环境条件最直观地适应性变化。鱼体形态特征受遗传与环境因素双重影响, 是种类鉴别和分类的重要依据^[34]。在鱼类形态学分析方法中, 多元统计分析方法是应用很广泛的分析手段^[35—40], 通过研究鱼类群体间形态特征上的异同程度, 有助于了解鱼类群体间的亲缘关系与分类系统, 进而探讨鱼类的起源、进化过

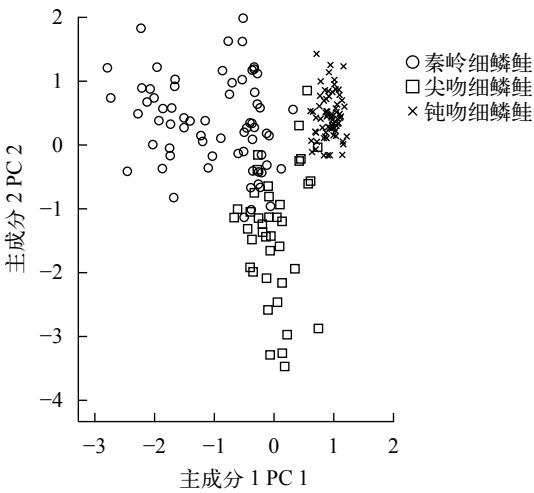


图 2 主成分1、2散点图

Fig. 2 Scatter plots between PC1 and PC2

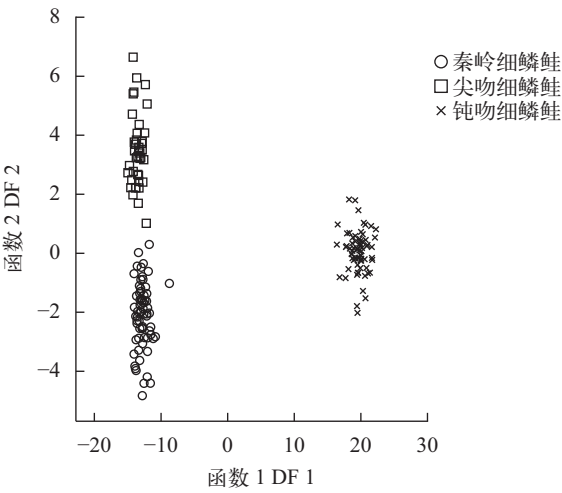


图 3 典型判别式函数1、2散点图

Fig. 3 Scatter plots between DF1 and DF2

表 6 三个细鳞鲑类群的判别结果
Tab. 6 Discrimination among three groups of *Brachymystax*

项目Item	类群Group	预测分类Prediction classification			综合判别率 Synthetic discrimination accuracy (%)
		尖吻细鳞鲑 <i>B. lenok lenok</i>	钝吻细鳞鲑 <i>B. tumensis</i>	秦岭细鳞鲑 <i>B. lenok tsinlingensis</i>	
逐步判别结果Results of stepwise discrimination	尖吻细鳞鲑 <i>B. lenok lenok</i>	40 (100%)	0	0	100
	钝吻细鳞鲑 <i>B. tumensis</i>	0	71 (100%)	0	
	秦岭细鳞鲑 <i>B. lenok tsinlingensis</i>	0	0	67 (100%)	
交互验证Results of cross validation	尖吻细鳞鲑 <i>B. lenok lenok</i>	39 (97.5%)	0	1	99.4
	钝吻细鳞鲑 <i>B. tumensis</i>	0	71 (100%)	0	
	秦岭细鳞鲑 <i>B. lenok tsinlingensis</i>	0	0	67 (100%)	

注: 括号外数字表示判别后的样本数, 括号内数字代表类群样本判别准确率

Note: Number out of parentheses represents the number of discriminated samples, and value inside parentheses means discriminated proportion of sample that is correctly classified

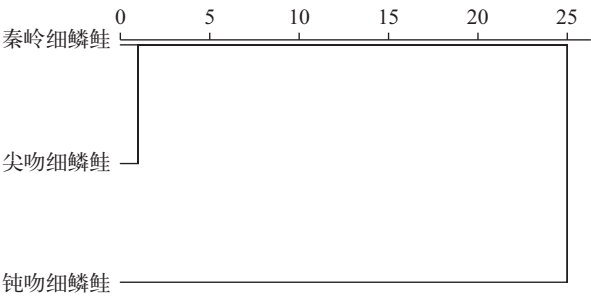


图 4 三个细鳞鲑类群的聚类分析图

Fig. 4 Dendrogram showing the relationship of three *Brachymystax* groups

程和趋向。

本研究的方差分析结果表明尖吻细鳞鲑、钝吻细鳞鲑和秦岭细鳞鲑在32项比例性状和5项可数性状上存在极显著差异($P<0.01$), 说明3个细鳞鲑类群的外部形态差异十分明显。主成分分析散点图显示, 尖吻细鳞鲑、钝吻细鳞鲑和秦岭细鳞鲑三者主成分1(贡献率91.909%)轴上差异明显, 基本无重叠交错, 不同类群样本间能够形成相对集中的组, 说明3个类群存在一定程度的分化; 所有的形态学性状与主成分1呈正相关, 表明在类群形态学分析中存在尺寸效应(Size effect), 类群间差异体现在鱼体的整体结构上, 与扁鲮(*Pomatomus saltatrix*)^[41]的研究结果相似。由判别分析结果可知, 3个细鳞鲑类群的判别准确率为99.4%, 能够精确地判别细鳞鲑的类群归属; 典型判别函数得分图呈现了明显分类趋势。高判别率提示: (1) 3个细鳞鲑类群的形态差异显著; (2) 这种判别程度可能达到亚种间或种间判别。聚类树形图显示尖吻细鳞鲑和秦岭细鳞鲑

聚为一支, 而钝吻细鳞鲑单独呈一个分支, 尖吻细鳞鲑和秦岭细鳞鲑分类地位较近, 亲缘关系也相对较近。

根据Mayr等^[32]提出的75%亚种识别和鉴定的标准, 如果同一物种的2个异域分布的种群之间存在形态特征差异, 即A群体75%的个体和B群体97%的个体能分开, 那么这2个群体之间的形态特征差异系数值应为1.28, 则2个群体应分属于不同的亚种, 即1.28是亚种分化的阈值。若差异系数(CD)值大于1.28则认为它们之间的差异达亚种水平; 反之, 小于1.28则认为差异属于不同地理种群的差异。然而, Mayr等^[32]也强调指出使用差异系数这一指标区分亚种时应慎重: 该方法并没有完全考虑到在亚种确认上的其他生物学和生物地理学的因素; 要确认亚种地位还必须借助其他资料予以准确估量。本研究中尖吻细鳞鲑和秦岭细鳞鲑类群仅第一鳃弓外鳃耙数的差异达亚种分化水平。在鱼类分类中, 仅仅以形态特征的CD值1.28作为亚种划分依据, 研究者须持谨慎态度^[42, 43]。例如, 基于54项形态特征分析胡鲶属(*Clarias*)4个物种间的差异系数值, 结果显示鳊胡鲶(*C. anguillaris*)和尖齿胡鲶(*C. gariepinus*) 2个物种间的CD值小于1.28; 白斑胡鲶(*C. albopunctatus*)和伊布里胡鲶(*C. ebriensis*)物种间的CD值也小于1.28^[44]。徐敬明等^[45]发现厚蟹属原分类为2个物种的天津厚蟹和侧足厚蟹之间的形态差异较小, 它们的差异系数值均小于亚种识别的阈值1.28, 因而将它们作为同一物种的2个亚种处理。

细鳞鲑属类群间形态学测量值的方差分析、

表 7 不同类群比例性状和可数性状的差异系数值

Tab. 7 The coefficient of difference of the proportional and meristic characters among different *Brachymystax* groups

性状Character	差异系数1 CD1	差异系数2 CD2	性状Character	差异系数1 CD1	差异系数2 CD2
比例性状Proportional characters					
C2/C1	0.76	1.33	C19/C1	0.88	1.74
C3/C1	0.28	1.15	C20/C1	0.78	1.51
C4/C1	0.58	1.43	C21/C1	1.06	1.86
C5/C1	0.01	1.20	C22/C1	0.70	1.79
C6/C1	0.70	2.59	C23/C1	0.63	1.38
C7/C1	0.63	1.67	C24/C1	0.89	1.85
C8/C1	0.60	2.01	C25/C1	0.88	5.30
C9/C1	0.43	1.73	C26/C1	0.72	1.34
C10/C1	0.58	1.73	C27/C1	0.93	1.82
C11/C1	0.33	1.83	C28/C1	0.95	1.46
C12/C1	0.66	0.96	C29/C1	1.19	2.16
C13/C1	0.53	1.35	C30/C1	0.98	1.57
C14/C1	0.75	1.29	C31/C1	0.70	1.51
C15/C1	0.80	1.37	C32/C1	1.24	2.50
C16/C1	0.98	1.42	C33/C1	0.98	2.40
C17/C1	0.51	1.56	C34/C1	1.01	2.59
C18/C1	0.91	1.77	C35/C1	0.82	2.10
可数性状Meristic characters					
第一鳃弓外鳃耙数Number of outer gill rakers in the first gill arch	2.01	0.91	侧线鳞数Number of lateral scales	0.48	1.69
幽门盲囊数Number of pyloric caeca	1.18	2.8	侧线下鳞数Number of scale below lateral line	0.68	0.65
侧线上鳞数Number of scale above lateral line	0.62	0.99			

注: 表中CD代表尖吻细鳞鲑和秦岭细鳞鲑类群间的差异系数; CD2代表钝吻细鳞鲑和秦岭细鳞鲑类群间的差异系数。加粗数字表示CD>1.28

Note: CD 1 represents the coefficient of difference between the groups *B. lenok lenok* and *B. lenok tsinlingensis*; CD 2 represents the coefficient of difference between the groups *B. tumensis* and *B. lenok tsinlingensis*. Numbers in bold denote CD>1.28

主成分分析、判别分析和CD值等的结果显示, 秦岭细鳞鲑在形态特征上与黑龙江流域的尖吻细鳞鲑、钝吻细鳞鲑存在明显差异。

3.2 细鳞鲑属鱼类分类地位探讨

细鳞鲑属起源于亚欧北寒带, 主要分布于北寒带及北温带北部, 少数分布于暖温带高海拔地区, 在第四纪冰期南迁至我国, 而分布在秦岭地区的细鳞鲑被认为是冰川期的残留种^[46]。Froufe等^[47]研究了分布在西伯利亚地区的尖吻细鳞鲑和钝吻细鳞鲑的进化史, 确定这2种细鳞鲑应被作为2个独立的物种, 随后这一观点被我国学者在黑龙江流域的2种不同吻部特征的细鳞鲑上得到证实^[18–22]。

相比其他脊椎动物而言, 鱼类形态特征在种群内部和种群之间的变异更大, 且更易受环境的影响^[48]。细鳞鲑属鱼类群体间形态差异和地理隔离有直接关系, 大约在216万年前黄河流域和黑龙江流域的细鳞鲑就已形成地理隔离, 且细鳞鲑的点状不连续

分布与青藏高原隆起导致亚洲内陆干旱化有关^[49]。李思忠于1966年对比了采自秦岭太白山东侧和南侧的40余尾细鳞鲑和黑龙江汤原县的2尾标本后, 以幽门盲囊、侧线鳞、鳃耙数等形态学指标变化差异以及体长大小等为主要区别特征, 认定秦岭细鳞鲑为新的亚种, 并定名为秦岭细鳞鲑*Brachymystax lenok tsinlingensis* Li, 同文指出黑龙江和新疆等地的细鳞鲑为指名亚种*B. lenok lenok* (Pallas)^[14]。随后一些学者比对陕西渭河、汉水、甘肃黄河水系与黑龙江、图们江、鸭绿江及松花江等地的多尾细鳞鲑标本, 发现除体长比北方个体稍小外, 其他性状的变异仍在同一区间范围, 因而对秦岭细鳞鲑的亚种地位提出质疑, 他们认为秦岭细鳞鲑与细鳞鲑(指名亚种)群体之间形态特征部分重叠, 生化同工酶电泳谱带一致, 不能把秦岭细鳞鲑划分为新亚种^[2, 16, 17]。马波等^[18]对黑龙江流域两种细鳞鲑(尖吻细鳞鲑和钝吻细鳞鲑)进行形态学比较, 并依

据文献资料推测秦岭细鳞鲑的主要形态学性状与钝吻细鳞鲑较相似。早期文献采用传统形态学测量和解剖法认定秦岭细鳞鲑为新亚种, 而其分类地位至今仍不明晰的原因主要是传统的形态测量方法上存在一定的缺陷, 仅采用水平和垂直方向的测量距离, 多局限于测量头部和尾部特征, 未能覆盖整个鱼体表面, 无法全面地描述鱼体外部形态特征, 容易造成细鳞鲑属鱼类形态特征差异及物种有效性鉴别偏差。而本文选用多变量形态度量学方法结合多元统计分析, 通过筛选存有显著性差异的形态特征来反映鱼体形态差异, 能更有效地辨别的尖吻细鳞鲑、钝吻细鳞鲑和秦岭细鳞鲑之间的形态差异。

分子生物学角度, 杜岩岩等^[15]基于线粒体控制区(D-Loop)部分序列的测定结果, 发现秦岭细鳞鲑在进化分支上呈单系支且3个细鳞鲑类群间的遗传距离大于类群内遗传距离, 该结果支持秦岭细鳞鲑的亚种分类地位。通过对Cyt *b*基因的分子系统研究, Xing等^[25]发现秦岭细鳞鲑与尖吻细鳞鲑、钝吻细鳞鲑的遗传距离(0.020—0.022和0.034)大于哲罗鲑属3个物种两两间的遗传距离(0.008—0.016); 且秦岭细鳞鲑类群在系统发育树上呈一个有独立进化史的单系群, 与尖吻细鳞鲑构成一个分支, 而钝吻细鳞鲑单独成一支, 该文认为秦岭细鳞鲑是一个有效的独立物种, 重命名为*B. tsinlingensis* Li, 1966。结合已有的分子生物学证据, 本研究的多元统计分析结果提示, 秦岭细鳞鲑和尖吻细鳞鲑类群间的形态差异显著, 而与钝吻细鳞鲑类群的差异更大; 同时, 本文基于形态学数据构建的聚类分析图显示秦岭细鳞鲑与尖吻细鳞鲑聚为一支, 与Xing等^[25]基于线粒体DNA数据的分子进化树结果一致, 而之前的秦岭细鳞鲑与钝吻细鳞鲑更相近的观点不一致^[18]。

本研究的结果支持秦岭细鳞鲑与黑龙江流域内的尖吻细鳞鲑的分化程度至少已达亚种水平, 但秦岭细鳞鲑是否应该被看作一个独立物种, 有待商榷以及进一步研究来证实。此外, 要揭示秦岭细鳞鲑与尖吻细鳞鲑、钝吻细鳞鲑的关系, 尚需结合分子遗传标记做更深入的研究。

参考文献:

- [1] Zhang J M. Fishes of Heilongjiang Province [M]. Harbin: Heilongjiang Science and Technology Press. 1995, 52 [张觉民. 黑龙江省鱼类志. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社. 1995, 52]
- [2] Qin S Z, Wang S A. Studies on the subspecies of *Brachymystax lenok* (Pallas), China [J]. *Salmon Fishery*, 1989, 2(1): 52—61 [秦树臻, 王所安. 细鳞鱼亚种问题的研究. 鲑鳟渔业, 1989, 2(1): 52—61]

- [3] Wang Y Z. Species characteristics and protective counter measures of Qinling lenok [J]. *Acta Ecologiae Animalis Domastici*, 2008, 29(1): 103—105 [王亚洲. 秦岭细鳞鲑种质特性及保护对策. 家畜生态学报, 2008, 29(1): 103—105]
- [4] Cheng Y F, He S P, He C C. Chinese Freshwater Fish Color Atlas (Part III) [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press. 1993, 166 [陈毅峰, 何舜平, 何长才. 中国淡水鱼类原色图集(第三集). 上海: 上海科学技术出版社. 1993, 166]
- [5] Shaanxi Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences Institute of Aquatic Biology, Lanzhou University Department of Biology (Eds.), Qinling Fish [M]. Beijing: Science Press. 1987, 14—15 [陕西省动物研究所, 中国科学院水生生物研究所, 兰州大学生物系(编). 秦岭鱼类志. 北京: 科学出版社. 1987, 14—15]
- [6] Yue P Q, Chen Y Y. China Red Data Book of Endangered Animals: Pisces [M]. Beijing: Science Press. 1998, 35—37 [乐佩琦, 陈宜瑜. 中国濒危动物红皮书(鱼类). 北京: 科学出版社. 1998, 35—37]
- [7] Ren J, Liang G. Resource survey report of *Brachymystax lenok tsinlingensis* in Qianhe River Valleys of Qinling Mountains [J]. *Journal of Shaanxi Normal University* (Natural Science Edition), 2004, 32(9): 165—168 [任剑, 梁刚. 千河流域秦岭细鳞鲑资源调查报告. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2004, 32(9): 165—168]
- [8] Li Y F, Zhang Y Q, Liu Y, et al. Comparative analysis of nutritional ingredient in muscle of lenok (*Brachymystax lenok*) in two water areas of Heilongjiang Province [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2011, 42(9): 97—103 [李永发, 张永泉, 刘洋, 等. 黑龙江两种生态类型水域细鳞鱼肌肉营养成分的比较分析. 东北农业大学学报, 2011, 42(9): 97—103]
- [9] Mou Z B, Liu Y, Xu G F, et al. The optimum temperature for growth and feeding in *Brachymystax lenok* [J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2011, 24(4): 6—8 [牟振波, 刘洋, 徐革锋, 等. 细鳞鱼摄食和生长最适水温的研究. 水产学杂志, 2011, 24(4): 6—8]
- [10] Shi D L, Wei Q W, Sun Q L, et al. Early ontogenesis of *Brachymystax lenok tsinlingensis* [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2012, 19(4): 557—567 [施德亮, 危起伟, 孙庆亮, 等. 秦岭细鳞鲑早期发育观察. 中国水产科学, 2012, 19(4): 557—567]
- [11] Xu G F, Wang Y Y, Han Y, et al. Growth, feed utilization and body composition of juvenile Manchurian trout, *Brachymystax lenok* (Pallas) fed different dietary protein

- and lipid levels [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2015, **21**(3): 332—340
- [12] Lee S, Yoshizaki G. Successful cryopreservation of spermatogonia in critically endangered Manchurian trout (*Brachymystax lenok*) [J]. *Cryobiology*, 2016, **72**(2): 165—168
- [13] Li Z, Zhang S Y, Gao J X, *et al.* Structural and functional characterization of CATH_BRALE, the defense molecule in the ancient salmonoid, *Brachymystax lenok* [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2013, **34**(1): 1—7
- [14] Li S Z. On a new subspecies of fresh-water trout, *Brachymystax lenok tsinlingensis*, from Taibaishan, Shannxi, China [J]. *Acta Zootaxon Sinica*, 1966, **3**(1): 92—94 [李思忠. 陕西太白山细鳞鲑的一新亚种. 动物分类学报, 1966, **3**(1): 92—94]
- [15] Du Y Y, Wang T, Yang S W, *et al.* Discussion on species validity of *Brachymystax lenok tsinlingensis* in Qinling Mountains [J]. *Gansu Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2016, **46**(11): 122—126 [杜岩岩, 王太, 杨顺文, 等. 秦岭细鳞鲑物种有效性的探讨. 甘肃畜牧兽医, 2016, **46**(11): 122—126]
- [16] Song S L, Fang S M. Discussion of the subspecies of Salmonidae fishes, *Brachymystax lenok tsinlingensis* Li, from Shaanxi, China [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 1984, **20**(4): 92—95 [宋世良, 方树淼. 秦岭细鳞鲑 *Brachymystax lenok tsinlingensis* Li 亚种问题的商榷. 兰州大学学报(自然科学版), 1984, **20**(4): 92—95]
- [17] Wang H Y. Research of *Brachymystax* and *B. lenok* (Pallas) from Northern area of Hebei [J]. *Salmon Fishery*, 1988, **1**(1): 16—25 [王鸿媛. 细鳞鱼属的研究和河北北部的细鳞鱼. 鲑鳟渔业, 1988, **1**(1): 16—25]
- [18] Ma B, Yin J S, Li J P. Comparative studies on morphology and taxonomic position of two species of lenok [J]. *Acta Zootaxonomica Sinica*, 2005, **30**(2): 257—260 [马波, 尹家胜, 李景鹏. 黑龙江流域两种细鳞鲑的形态学比较及其分类地位初探. 动物分类学报, 2005, **30**(2): 257—260]
- [19] Mou Z B, Liu W, Xu G F. Study on comparative biology of two species lenok (*Brachymystax lenok*) in Ussuri River [J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2006, **19**(2): 1—8 [牟振波, 刘伟, 徐革峰. 乌苏里江二种细鳞鲑鱼生物学比较研究. 水产学杂志, 2006, **19**(2): 1—8]
- [20] Ma B, Jiang Z F. Genetic diversity and relationship between two species of *Brachymystax* in Wusuli River revealed by microsatellites [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2007, **14**(1): 39—45 [马波, 姜作发. 乌苏里江 2 种细鳞鲑种群遗传多样性及亲缘关系的微卫星分析. 中国水产科学, 2007, **14**(1): 39—45]
- [21] Ma B, Jiang Z F, Huo T B. Study on the taxonomic status of species of *Brachymystax* in Heilongjiang River and Tumen River systems based on mitochondrial control region sequence [J]. *Acta Zootaxonomica Sinica*, 2009, **34**(3): 499—506 [马波, 姜作发, 霍堂斌. 基于线粒体 DNA 控制区序列变异探讨黑龙江和图们江细鳞鲑属鱼类的分类地位. 动物分类学报, 2009, **34**(3): 499—506]
- [22] Wang D, Xu G F, Liu Y, *et al.* Assessing genetic diversity of the *Brachymystax lenok* and *Brachymystax tumensis* populations in Ussuri River [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2010, **19**(1): 19—23 [王荻, 徐革峰, 刘洋, 等. 乌苏里江流域尖吻细鳞鲑及钝吻细鳞鲑群体遗传多样性分析. 上海海洋大学学报, 2010, **19**(1): 19—23]
- [23] Wang F. Research progress of *Brachymystax lenok tsinlingensis* Li [J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2011, **57**(5): 181—183 [王丰. 秦岭细鳞鲑的研究进展. 陕西农业科学, 2011, **57**(5): 181—183]
- [24] Huang H M, Zhang D L, Zhuang L J, *et al.* Biological studies of *Brachymystax lenok* (Pallas) in the Yalu River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1989, **13**(2): 160—169 [黄浩明, 张德龙, 庄龙杰, 等. 鸭绿江细鳞鱼的生物学. 水生生物学报, 1989, **13**(2): 160—169]
- [25] Xing Y C, Lv B B, Ye E Q, *et al.* Revalidation and redescription of *Brachymystax tsinlingensis* Li, 1966 (Salmoniformes: Salmonidae) from China [J]. *Zootaxa*, 2015, **3962**(1): 191—205
- [26] Strauss R E, Bookstein F L. The truss: body form reconstructions in morphometrics [J]. *Systematic Biology*, 1982, **31**(2): 113—135
- [27] Reist J D. 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] Xue C, Wei Q W, Sun Q L, *et al.* Age and growth of *Brachymystax lenok tsinlingensis* [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, **20**(4): 743—749 [薛超, 危起伟, 孙庆亮, 等. 秦岭细鳞鲑的年龄与生长. 中国水产科学, 2013, **20**(4): 743—749]
- [29] Dong C Z, Wang Z X. Ecological characteristics and resource protection of *Brachymystax lenok* groups in Huma River [J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 1997, **9**(1): 77—81 [董崇智, 王忠学. 呼玛河细鳞鱼种群生态学特征及资源保护. 水产学杂志, 1997, **9**(1): 77—81]
- [30] Xie Z G, Xie C X, Zhang E. Morphological variations among the Chinese species of *Sinibrama* (Pisces: Teleostei: Cyprinidae), with comments on their species validities [J]. *Zoological Research*, 2003, **24**(5): 321—330 [谢

- 仲桂, 谢从新, 张鄂. 我国华鳊属鱼类形态差异及其物种有效性的研究. 动物学研究, 2003, **24**(5): 321—330]
- [31] Williams B, Onsmann A, Brown T. Exploratory factor analysis: A five-step guide for novices [J]. *Journal of Emergency Primary Health Care*, 2010, **8**(3): 1—13
- [32] Mayr E, Gorton Linsley E, Usinger R L. Methods and Principles of Systematic Zoology [M]. New York, McGraw-Hill Book Company. 1953, 125—154
- [33] Wu Y F. Systematic Biology [M]. Beijing: China Ocean University Press. 2004, 90 [武云飞. 系统生物学. 北京: 中国海洋大学出版社. 2004, 90]
- [34] Kinsey S T, Orsoy T, Bert T M, *et al.* Population structure of the Spanish sardine *Sardinella aurita*: Natural morphological variation in a genetically homogenous population [J]. *Marine Biology*, 1994, **118**(2): 309—317
- [35] Vatandoust S, Abdoli A, Mousavi-Sabet H, *et al.* Morphometric and meristic characteristics and morphological differentiation of Brown Trout *Salmo trutta fario* (Pisces: Salmonidae) along the Southern Caspian Sea Basin [J]. *European Journal of Zoological Research*, 2014, **3**(2): 56—65
- [36] He Y F, Li R, Wang J W, *et al.* Morphological variation among wild populations of Chinese rare minnow (*Gobio-cypris rarus*): deciphering the role of evolutionary processes [J]. *Zoologicalence*, 2013, **30**(6): 475—483
- [37] Wang D T, Yang J, Jiang T, *et al.* A comparative study of the morphology of different geographical populations of *Coilia nasus* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2012, **36**(1): 78—90 [王丹婷, 杨健, 姜涛, 等. 不同水域刀鲚形态的分析比较. 水产学报, 2012, **36**(1): 78—90]
- [38] Zaccara S, Trasforini S, Antognazza C M, *et al.* Morphological and genetic characterization of Sardinian trout *Salmo cettii* Rafinesque, 1810 and their conservation implications [J]. *Hydrobiologia*, 2015, **760**(1): 205—223
- [39] Xu D G, Li X M, Zhu Y J, *et al.* Morphological variations of bighead carp (*Aristichthys nobilis*) fed by feed-stuff [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2016, **40**(6): 873—881 [许德高, 李学梅, 朱永久, 等. 不同投喂方式对鳊形态特征的影响. 水产学报, 2016, **40**(6): 873—881]
- [40] Allaya H, Faleh A B, Rebaya M, *et al.* Morphological differences between two populations of the Little Tunny, *Euthynnus alletteratus* (Rafinesque, 1810) in Tunisian Waters (Central Mediterranean Sea) [J]. *Pakistan Journal of Zoology*, 2017, **49**(5): 1621—1629
- [41] Turan C, Oral M, Öztürk B, *et al.* Morphometric and meristic variation between stocks of Bluefish (*Pomatomus saltatrix*) in the Black, Marmara, Aegean and northeastern Mediterranean Seas [J]. *Fisheries Research*, 2006, **79**(1): 139—147
- [42] Yang Y Z, Yin L J, Qin D G, *et al.* The variation of the posture characteristics and its position as a subspecies of the Jingbo lack Burbout, *Lota lota* (Linnaeus) [J]. *Universitatis Pekinensis* (Acta Scientiarum Naturalium), 2002, **38**(6): 850—854 [杨雨壮, 殷丽洁, 秦大公, 等. 镜泊湖江鳊的性状变异和分类地位. 北京大学学报(自然科学版), 2002, **38**(6): 850—854]
- [43] Yang Q, Zhou W, Shu S S. Morphological variation and differentiation of *Discogobio yunnanensis* from different population [J]. *Acta Zootaxonomica Sinica*, 2011, **36**(1): 117—124 [杨琴, 周伟, 舒树森. 云南盘鮠不同地理居群的形态变异及分化. 动物分类学报, 2011, **36**(1): 117—124]
- [44] Eyo J E, Inyang N M. Mayr's coefficient of difference and taxonomy of *Clarias* (Clariidae-Scopoli, 1777) [J]. *Animal Research International*, 2004, **1**(1): 36—41
- [45] Xu J M, Yang F and Sun S C. Morphological studies on 10 populations of *Helice tientsinensis* and *H. latimera* (Crustacea, Decapoda) from coasts of China [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2010, **34**(3): 533—540 [徐敬明, 杨帆, 孙世春. 厚蟹属种群形态量度分析. 水生生物学报, 2010, **34**(3): 533—540]
- [46] Li S Z. Discussion on the geographical distribution of Salmonidae in China [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 1984, **1**(3): 34—37 [李思忠. 中国鲑科鱼类地理分布的探讨. 动物学杂志, 1984, **1**(3): 34—37]
- [47] Froufe E, Alekseyev S, Alexandrino P, *et al.* The evolutionary history of sharp-and blunt-snouted lenok (*Brachymystax lenok* (Pallas, 1773)) and its implications for the paleo-hydrological history of Siberia [J]. *BMC Evolutionary Biology*, 2008, **8**(40): 1—18
- [48] Wimberger P H. Plasticity of fish body shape. The effects of diet, development, family and age in two species of *Geophagus* (Pisces: Cichlidae) [J]. *Biological Journal of the Linnean Society*, 1992, **45**(3): 197—218
- [49] Du H B. Characteristics on the origin of Salmon fishes in the north and south of the Qinling Mountains [J]. *Henan Fisheries*, 2012, **19**(2): 5—7 [杜汉斌. 秦岭南北鲑科鱼类渊源质疑. 河南水产, 2012, **19**(2): 5—7]

THE VALIDITY OF SUBSPECIES OF *BRACHYMISTAX LENOK* *TSINLINGENSIS* LI BASED ON MORPHOLOGICAL DIFFERENCE ANALYSIS

MENG Yan-Xiao¹, WANG Gui-Hua¹, XIONG Dong-Mei¹, LIU Hai-Xia¹, ZHANG Jian-Lu², WANG Ji-Long³,
WANG Li-Xin¹ and LIU Xiao-Lin¹

(1. Department of Fisheries Science, College of Animal Science and Technology, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Shaanxi Key Laboratory for Animal Conservation, Shaanxi Institute of Zoology, Xi'an 710032, China; 3. Heilongjiang River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Harbin 150070, China)

Abstract: The taxonomic status of *Brachymystax lenok tsinlingensis* Li, distributing in Qinling area of China, is controversial since it was found. In this study, the morphological differences among three *Brachymystax* groups (*B. lenok lenok* (Pallas, 1773) and *B. tumensis* (Mori, 1930) from Amur river basin and *B. lenok tsinlingensis* (Li, 1966) from the Qinling area) were investigated, including five meristic characters and thirty-four standardized morphometric characters through multivariate morphometrics methods. Results of one-way ANOVA showed that five meristic characters and thirty-two standardized morphometric characters were significantly different ($P < 0.01$) among three groups. Principal component analysis indicated that the cumulative contribution of the top three principal components was 92.779%. Effective linear discriminant formulas were obtained from fourteen standardized morphometric characters, with the discriminating accuracy of 99.4% in the three groups. The tree diagram of these groups based on the squared Euclidean distance showed that *B. lenok tsinlingensis* had a close distance with *B. lenok lenok*, but it is distant from *B. tumensis*. The coefficient of difference (CD) for the outer gill raker number in the first gill arch between *B. lenok tsinlingensis* and *B. lenok lenok* is larger than the threshold value of 1.28, and the CD for the thirty-one standardized morphometric characters and two meristic characters in *B. lenok tsinlingensis* and *B. tumensis* was also greater than 1.28. According to the results listing above, and the geographical isolation of *B. lenok tsinlingensis* together with its morphological differences from *B. lenok lenok* and *B. tumensis*, it is deduced that the morphological difference between *B. lenok tsinlingensis* in Qinling and *B. lenok lenok* in Amur river basin has at least reached subspecies level.

Key words: *Brachymystax lenok tsinlingensis*; *Brachymystax lenok lenok*; *Brachymystax tumensis*; Morphological variations; Multivariate statistical analysis