

# 三种鲷属(*Seriola*)鱼类表型特征比较分析\*

王开杰 徐永江<sup>①</sup> 崔爱君 姜燕 王滨 柳学周

(中国水产科学研究院黄海水产研究所 青岛海洋科学与技术试点国家实验室深蓝渔业工程联合实验室 山东青岛 266071)

**摘要** 为全面了解鲷属鱼类表型性状的种间差异,描述了我国养殖的黄条鲷(*Seriola lalandi*)、高体鲷(*Seriola dumerili*)和五条鲷(*Seriola quinqueradiata*)的形态学特征,测量了群体的表型数据,通过单因素方差分析、通径分析、主成分分析、判别分析和聚类分析等多元统计方法,对 3 种鲷鱼共计 190 尾样品的形态种质特征和可量可数性状进行了比较研究。单因素方差分析显示,除叉长/体长(FL/SL)、体长/尾柄长(SL/PL)、头长/眼间距(HL/ID)和下颌长/上颌长(LJL/UJL)外,其余 9 个指标均存在显著性差异( $P < 0.05$ )。通径分析显示,黄条鲷的体长(SL)、体高(BH)、尾柄长(PL)和尾柄高(PD)是主要影响其体质量的 4 个表型性状;高体鲷的体长(SL)、体高(BH)、眼间距(ID)、下颌长(LJL)和眼后头长(POL)是主要影响其体质量的 5 个表型性状;五条鲷的体高(BH)、下颌长(LJL)和全长(TL)是主要影响其体质量的 3 个表型性状。主成分分析构建了 4 个主成分,其中第一项主成分贡献率为 34.974%,其他 3 个主成分的贡献率依次为 23.897%、11.587%、9.489%,累积方差贡献率为 79.947%。判别分析显示,3 种鲷鱼的判别准确率  $P_1$ 、 $P_2$  均为 100%,综合判别率为 100%。聚类分析显示,黄条鲷和五条鲷聚为一个分支,之后再与高体鲷聚为一大支。研究结果可为建立鲷属鱼类种类鉴别、种质标准和开展遗传育种研究提供表型参数的判别依据。

**关键词** 鲷鱼; 表型特征; 通径分析; 多变量形态度量学; 多元统计分析

**中图分类号** Q789; Q954; S965 **doi:** 10.11693/hyhz20220400110

鲷鱼是鲈形目(Perciformes)、鲷科(Carangidae)、鲷属(*Seriola*)鱼类的统称,在全球分布的 9 种鲷鱼中(Takeyama *et al*, 2001; Nwani *et al*, 2011),我国分布有 3 种,分别为黄条鲷(*Seriola lalandi*)、高体鲷(*Seriola dumerili*)和五条鲷(*Seriola quinqueradiata*),鲷鱼肉质鲜嫩、营养丰富,深受消费者喜爱(柳学周, 2017)。鲷鱼生长快、个体大,是我国近年来发展深远海养殖和陆基工厂化循环水养殖的优良鱼种。近年来,有关鲷鱼养殖的研究报道主要集中在人工繁育(柳学周, 2017)、网箱养殖(陆忠康, 1990; 廖志强, 2003; 缪圣赐, 2010)、病害防治(任忻生等, 2012; Rigos *et al*, 2021)、生长生理适应机制(Matsumoto *et al*, 2017; Yokoyama *et al*, 2020; 史宝等, 2020; 王维鑫等, 2021)

等方面,而 3 种鲷鱼表型特征的相关研究,仅见黄条鲷的研究报道(李荣等, 2017),未见有五条鲷和高体鲷的相关研究。

传统分类方法通过形态特征的可数及可量性状比较,分析方法单一,有局限性,且测量的形态位点较少。多变量形态度量学方法则是基于框架位点引入多元统计的一种分析方法,可对鱼类体形外貌的连续性数量特征差异进行分析(杨天燕等, 2018),在描述亲缘关系较近鱼类形态变异及识别物种方面十分有效。侯吉伦等(2016)通过多元统计方法分析了中国沿海 6 个地理群体的花鲈(*Lateolabrax maculatus*)形态特征;陈杰等(2014)用 3 种多元统计方法分析了我国鳊鲂属(*Parabramis* and *Megalobrama*)鱼类群体

\* 国家重点研发计划项目, 2022YFD2401100 号, 2019YFD0900901 号; 中国水产科学研究院基本科研业务费, 2020TD47 号; 国家海洋水产种质资源库项目, 2021-2025; 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系资助, CARS-47 号。王开杰, 硕士, E-mail: jasions@qq.com

通信作者: 徐永江, 研究员, E-mail: xuyj@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2022-04-27, 收修改稿日期: 2022-07-09

的形态差异。

黄条鲷、高体鲷和五条鲷具有相似的外形特征,尤其在苗种和幼鱼阶段更难以区分。本研究从我国鲷鱼养殖基地采集了黄条鲷、高体鲷和五条鲷样本,对 3 种鲷鱼的表型性状和体质量的关系进行通径分析,并构建其表型性状与体质量间的多元线性回归方程,同时,采用多元统计方法和形态结构框架法对 3 种鲷鱼的形态特征及可量可数性状的差异进行全面比较分析,为建立 3 种鲷鱼养殖生产中的形态种质辨识方法、种质标准以及遗传育种研究提供直观的形态度量学依据,同时也可为社会公众提供产品消费鉴别支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

本研究所使用的实验样品采集于 2020~2021 年期间,采集了大连富谷食品有限公司(39°36'17"N, 122°51'9"E)养殖的黄条鲷60 尾,福建宁德富闽洋水产养殖有限公司(26°62'48"N, 119°75'27"E)养殖的高体鲷70 尾、五条鲷60 尾。实验鱼的年龄为 2<sup>+</sup>龄,其亲本均为海上采捕的野生苗种经人工养殖而成,养殖网箱规格 10 m×10 m×8 m,养殖水温 20~24 °C,实验鱼日投喂 2 次,投喂率为鱼体重的 5%,饵料为冰鲜玉筋鱼,鱼体健康无损伤。其表型性状特征见表 1。

### 1.2 表型性状度量

捕获实验鱼后使用 MS-222 (120 mg/L)进行麻醉后,对 3 种鲷鱼外部形态进行观察,确定可用于物种鉴别的直观形态特征。

对其 8 个可数性状进行度量和计数,包括胸鳍鳍条数、臀鳍鳍条数、尾鳍鳍条数、背鳍鳍条数、腹鳍鳍条数、第一鳃弓数、鳃耙数和脊椎骨数。

利用卷尺和游标卡尺测量 3 种鲷鱼的 12 个可量性状,包括全长(total length, TL)、叉长(fork length, FL)、体长(soma length, SL)、体高(body height, BH)、头长(head length, HL)、眼后头长(post orbital length, POL)、上颌长(upper jaw length, UJL)、下颌长(lower jaw length, LJL)、眼径(eye diameter, ED)、眼间距(interorbital distance, ID)、尾柄长(peduncle length, PL)和尾柄高(peduncle distance, PD),精确到 1 mm。使用电子天平测量体重、精确到 0.01 g。

### 1.3 统计分析

利用 Microsoft Excel 2016 和统计软件 SPSS 23.0 (IBM, 美国)对数据进行统计处理。对获得的 3 种鲷鱼

的表型可量性状数据进行 Pearson 相关性分析和单因素方差分析(One-way ANOVA)。为消除样本规格大小差异对形态特征的影响(李荣等, 2017),将得到的 3 种鲷鱼所有表型性状指标采取比值法予以校正,参照李思发等(1998)的方法构建形态度量框架图。

**1.3.1 通径分析** 探究 3 种鲷鱼的表型性状对体质量影响的主要表型指标(王新安等, 2008a),计算公式如下:

$$\gamma_{iy} = P_i + \sum \gamma_{ij} P_j; \quad d_i = P_i^2; \quad d_{ij} = 2r_{ij} \times P_i \times P_j, \quad (1)$$

式中,  $\gamma_{iy}$  为相关系数;  $P_i$  为通径系数;  $d_i$  为单个自变量对体重的决定系数;  $d_{ij}$  为两个自变量共同对体重的决定系数。

**1.3.2 主成分分析** 使用 SPSS 23.0 软件进行主成分分析(马爱军等, 2008),输出其特征根向量、方差贡献率和累计方差贡献率,然后再用 Origin.2021 软件输出主成分的散点图。

**1.3.3 判别分析** 使用 SPSS 23.0 软件首先对 13 个表型性状比值的均值进行均等性检验,采用 Wilks' Lambda 逐步判别法筛选变量,随后筛选贡献大的变量进行判别函数构建。并参照李思发等(2005)的方法计算各判别函数的判别正确率。

$$P_1 = \text{判别正确的鲷鱼尾数} / \text{实际鲷鱼尾数} \times 100, \quad (2)$$

$$P_2 = \text{判别正确的鲷鱼尾数} / \text{判别鲷鱼尾数} \times 100, \quad (3)$$

$$\text{综合判别率} = \sum_{i=1}^k A_i / \sum_{i=1}^k B_i, \quad (4)$$

式中,  $A_i$  为第  $i$  组判别正确的鲷鱼尾数,  $B_i$  为第  $i$  组的实际鲷鱼尾数,  $k$  为组数。

**1.3.4 聚类分析** 使用 Origin.2021 软件,基于 3 种鲷鱼 13 个校正后的表型性状比值的平均值,使用欧氏距离的最短距离系统聚类法,构建 3 种鲷鱼间的亲缘关系聚类热图(Heatmap)。设置差异显著水平,当  $P < 0.05$  时为差异显著,当  $P < 0.01$  时为差异极显著。

## 2 结果

### 2.1 3 种鲷鱼的外部特征描述及形态度量框架图的构建

**2.1.1 外部形态差异描述** 黄条鲷、高体鲷和五条鲷体型均为纺锤形,均有一条从吻端到尾鳍纵观全身的金黄色纵带,其主要的区别特征如表 1 和图 1。

**2.1.2 3 种鲷鱼可数性状统计分析** 对 3 种鲷鱼的 8 个可数性状数据整理分析表明(表 2),黄条鲷和五条鲷的鳃耙数目多于高体鲷,其他可数性状差异不明显( $P > 0.05$ )。



图 1 3 种鲷鱼表型形态鉴别示意图

Fig.1 The phenotype morphology of three *Seriola* fishes

注: 图中相同字母(A、B、C、D)表示形态差异辨识位点。A. 上颌骨后部拐角; B. 眼后到鳃盖的距离; C. 胸鳍与黄带位置关系; D. 尾叉开角程度

表 1 3 种鲷鱼外部形态差异辨识位点

Tab.1 The recognition sites with morphological difference in three *Seriola* fishes

辨识部位	黄条鲷	高体鲷	五条鲷
体色	体背青蓝色	体背草绿色带褐紫色	体背墨绿色
眼后到鳃盖的距离	较短	较短	较长
颌骨后上角	呈圆钝形	呈圆弧形	呈直角形
胸鳍与黄带位置关系	接近重合	胸鳍位于黄带下面	胸鳍位于黄带下面
尾叉开角程度	剪刀形	弧形	钝平开角形状

**2.1.3 3 种鲷鱼形态度量比统计分析**及结构框架图构建 对 3 种鲷鱼的 13 个形态度量性状比值进行单因素方差分析(表 3), 结果表明, 除叉长/体长(FL/SL)、体长/尾柄长 SL/PL)、头长/眼间距(HL/ID)和下颌长/上颌长(LJL/UJL)外, 其余 9 个指标均存在显著性差异( $P < 0.05$ )。根据 3 种鲷鱼各形态度量比值, 构建其结构测量框架图(图 2、图 3、图 4)。

**2.2 3 种鲷鱼表型性状对体重影响的通径分析**

**2.2.1 3 种鲷鱼表型性状统计及相关关系分析** 如表

4 所示, 黄条鲷表型性状的变异系数在 3.320%~13.284%, 其中变异系数值最小和最大的性状分别为眼径(ED)和体质量(BW)。高体鲷表型性状的变异系数在 3.140%~11.819%, 其中变异系数值最小和最大的性状分别为头长(HL)和体质量(BW)。五条鲷表型性状的变异系数在 3.411%~11.092%, 其中变异系数值最小和最大的性状分别为头长(HL)和体质量(BW)。

表 2 3 种鲷属鱼类可数性状统计

Tab.2 Statistics of countable traits of three *Seriola* fishes

可数性状/种	黄条鲷	高体鲷	五条鲷
鳃耙数	24~26 <sup>b</sup>	17~20 <sup>a</sup>	29~32 <sup>c</sup>
脊椎骨数	24~25	23~25	24~25
背鳍数	I, VI, I-31~35	I, VI, I-31~36	I, VI, I-32~34
胸鳍数	20~22	20~22	19~21
腹鳍数	I-5	I-5	I-5
臀鳍数	II, I-19~22	II, I-20~22	II, I-19~21
尾鳍数	17	16	19
鳃弓数	8	8	8

注: 表中鳍数的描述是鱼类特定的鳍式表达模式, 如: I, VI, I-31~35 表示有两个背鳍, 第一背鳍有 5 根硬棘刺, 第二背鳍有 1 根硬棘刺和 31~35 根软条。表格中上标不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

表 3 3 种鲷鱼形态度量性状比  
Tab.3 Ratios between measurable characters of *Seriola* fishes

度量 性状比	黄条鲷		高体鲷		五条鲷	
	范围	平均值±标准差	范围	平均值±标准差	范围	平均值±标准差
TL/SL	1.22~1.29	1.251±0.019 <sup>a</sup>	1.14~1.28	1.225±0.024 <sup>ab</sup>	1.14~1.25	1.202±0.024 <sup>b</sup>
FL/SL	1.05~1.13	1.085±0.035 <sup>a</sup>	1.08~1.14	1.112±0.012 <sup>a</sup>	1.08~1.12	1.099±0.009 <sup>a</sup>
SL/BH	3.41~4.17	3.718±0.169 <sup>a</sup>	2.66~3.39	3.121±0.157 <sup>b</sup>	3.16~3.60	3.392±0.106 <sup>b</sup>
SL/HL	3.49~3.80	3.638±0.082 <sup>a</sup>	3.10~3.48	3.289±0.087 <sup>b</sup>	3.07~3.39	3.207±0.077 <sup>b</sup>
SL/POL	6.82~8.01	7.390±0.289 <sup>a</sup>	6.10~7.87	6.907±0.297 <sup>a</sup>	5.73~6.45	6.106±0.178 <sup>b</sup>
HL/ED	6.48~7.80	7.086±0.349 <sup>a</sup>	4.57~5.83	5.154±0.259 <sup>b</sup>	7.32~9.57	8.500±0.632 <sup>c</sup>
SL/PL	11.74~18.26	14.386±1.289 <sup>a</sup>	11.06~18.42	13.660±1.560 <sup>a</sup>	12.04~17.13	13.882±1.213 <sup>a</sup>
SL/PD	21.86~27.42	24.654±1.387 <sup>a</sup>	17.10~23.73	20.700±1.396 <sup>b</sup>	24.83~31.14	28.195±1.510 <sup>c</sup>
PL/PD	1.24~2.04	1.726±0.175 <sup>ab</sup>	1.12~1.82	1.530±0.160 <sup>a</sup>	1.72~2.36	2.045±0.194 <sup>b</sup>
HL/ID	2.28~2.86	2.531±0.148 <sup>a</sup>	2.17~2.73	2.461±0.111 <sup>a</sup>	2.21~2.62	2.415±0.080 <sup>a</sup>
SL/UJL	8.78~10.81	9.550±0.621 <sup>a</sup>	7.13~9.61	8.118±0.488 <sup>b</sup>	7.88~9.44	8.703±0.308 <sup>ab</sup>
SL/LJL	6.82~8.44	7.511±0.378 <sup>a</sup>	5.65~7.30	6.468±0.282 <sup>b</sup>	6.63~8.61	7.344±0.325 <sup>a</sup>
LJL/UJL	1.14~1.43	1.274±0.091 <sup>a</sup>	1.10~1.43	1.257±0.080 <sup>a</sup>	1.10~1.26	1.187±0.032 <sup>a</sup>

注: 表格每行中不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )

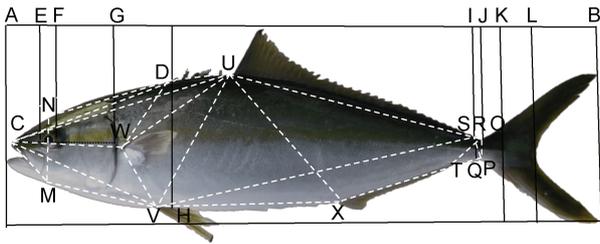


图 2 黄条鲷形态度量结构框架图

Fig.2 The truss network of morphometric measurement of *S. lalandi*

注: 可量性状: AB: 全长(TL); AL: 叉长(FL); AK: 体长(SL); DH: 体高(BH); AG: 头长(HL); FG: 眼后头长(POL); EF: 眼径(ED); IJ: 尾柄长(PL); RQ: 尾柄高(PD)。12 个位点: C: 吻端起点; N: 过眼睛中点垂直线与背部边缘交叉点; M: 过眼睛中点垂直线与腹部边缘交叉点; D: 第 1 背鳍起点; W: 胸鳍起点; V: 腹鳍起点; U: 第 2 背鳍起点; X: 臀鳍起点; S: 第 2 背鳍终点; T: 臀鳍终点; O: 尾鳍背部起点; P: 尾鳍腹部起点。下同

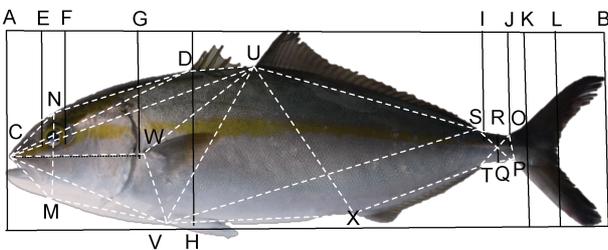


图 3 高体鲷形态度量结构框架图

Fig.3 The truss network of morphometric measurement of *S. dumerili*

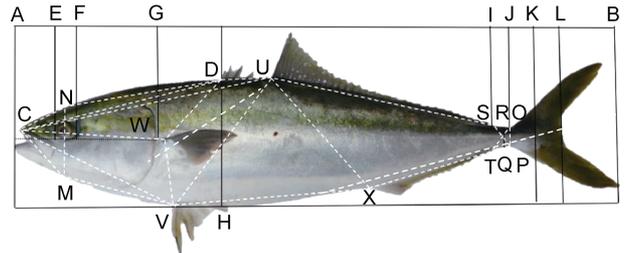


图 4 五条鲷形态度量结构框架图

Fig.4 The truss network of morphometric measurement of *S. quinqueradiata*

分析了黄条鲷、高体鲷和五条鲷各表型性状间的相关性(表 5、表 6、表 7)。结果显示, 所分析的 13 个可量表型性状中, 除眼径外其他 12 个性状间均存在显著相关性( $P<0.05$ )。

2.2.2 3 种鲷鱼表型性状途径分析及回归方程构建  
据途径分析原理, 筛选出对黄条鲷体质量具有显著影响的表型性状: 体长(SL)、体高(BH)、尾柄长(PL)和尾柄高(PD) (表 8), 计算得出的直接途径系数分别为 0.587、0.313、0.141 和 0.108, 其中, 体长的直接途径作用大于间接作用, 其他 3 个性状的直接途径作用均小于间接作用。体长对体质量的决定程度最高, 为 34.5%, 体高次之(9.8%); 在共同决定系数中, 体长与体高对体质量的共同决定程度最大, 为 22.9%, 总决定系数为 0.968。同时构建了黄条鲷 4 个表型性状对

表 4 3 种鲷鱼表型性状统计  
Tab.4 The statistics of phenotypical traits of *Seriola* fishes

性状	黄条鲷			高体鲷			五条鲷		
	平均值	标准偏差	变异系数/%	平均值	标准偏差	变异系数/%	平均值	标准偏差	变异系数/%
TL/cm	80.400	3.971	4.939	43.771	1.612	3.683	83.117	3.129	3.765
FL/cm	71.087	3.495	4.917	39.743	1.435	3.611	75.967	2.791	3.674
SL/cm	64.243	3.180	4.950	35.720	1.254	3.511	69.200	2.670	3.858
BH/cm	17.300	0.907	5.243	11.477	0.730	6.361	20.417	0.948	4.643
HL/cm	17.660	0.861	4.875	10.861	0.341	3.140	21.577	0.736	3.411
POL/cm	8.707	0.561	6.443	5.180	0.270	5.212	11.337	0.415	3.661
ED/cm	2.477	0.082	3.320	2.111	0.097	4.595	2.550	0.176	6.902
LJL/cm	8.560	0.565	6.600	5.531	0.275	4.972	9.433	0.436	4.622
UJL/cm	6.757	0.582	8.613	4.416	0.301	6.816	7.957	0.314	3.946
PD/cm	2.613	0.189	7.233	1.733	0.124	7.155	2.460	0.145	5.894
PL/cm	4.517	0.445	9.852	2.644	0.277	10.477	5.023	0.488	9.715
ID/cm	6.997	0.469	6.703	4.420	0.217	4.910	8.940	0.365	4.083
BW/g	4 968.330	660.000	13.284	1 187.143	140.312	11.819	7 856.667	871.48	11.092

表 5 黄条鲷各表型性状间相关性分析  
Tab.5 Correlation coefficients among morphometric traits of *S. laland*

性状	TL	FL	SL	BH	HL	POL	ED	LJL	UJL	PD	PL	ID	BW
TL	1	0.948**	0.957**	0.586**	0.899**	0.800**	0.171	0.759**	0.766**	0.665**	0.661**	0.574**	0.920**
FL		1	0.965**	0.571**	0.867**	0.787**	0.255	0.730**	0.751**	0.641**	0.635**	0.568**	0.903**
SL			1	0.622**	0.894**	0.800**	0.188	0.696**	0.754**	0.617**	0.598**	0.532**	0.933**
BH				1	0.572**	0.642**	0.033	0.381*	0.656**	0.481**	0.449*	0.371*	0.794**
HL					1	0.862**	0.192	0.695**	0.711**	0.667**	0.597**	0.560**	0.851**
POL						1	-0.049	0.497**	0.744**	0.487**	0.697**	0.361*	0.823**
ED							1	0.345	-0.066	0.267	-0.198	0.268	0.114
LJL								1	0.648**	0.619**	0.423*	0.426*	0.684**
UJL									1	0.341	0.657**	0.171	0.796**
PD										1	0.457*	0.615**	0.685**
PL											1	0.289	0.682**
ID												1	0.495**
BW													1

注: \*表示差异显著( $P < 0.05$ ), \*\*表示差异极显著( $P < 0.01$ )。下同

表 6 高体鲷各表型性状间相关性分析  
Tab.6 Correlation coefficients among morphometric traits of *S. duremili*

性状	TL	FL	SL	BH	HL	POL	ED	LJL	UJL	PD	PL	ID	BW
TL	1	0.913**	0.866**	0.498**	0.727**	0.597**	0.109	0.556**	0.612**	0.313**	0.02	0.598**	0.792**
FL		1	0.963**	0.574**	0.755**	0.658**	0.121	0.553**	0.552**	0.280*	0.052	0.619**	0.815**
SL			1	0.574**	0.693**	0.578**	0.150	0.511**	0.510**	0.282*	0.095	0.625**	0.818**
BH				1	0.419**	0.369**	0.143	0.576**	0.152	0.476**	0.350**	0.451**	0.727**
HL					1	0.655**	0.198	0.491**	0.516**	0.238*	0.118	0.463**	0.651**
POL						1	0.070	0.366**	0.492**	0.024	-0.124	0.326**	0.605**
ED							1	0.068	0.162	-0.068	0.326**	-0.018	0.140
LJL								1	0.473**	0.443**	0.223	0.457**	0.674**

续表

性状	TL	FL	SL	BH	HL	POL	ED	LJL	UJL	PD	PL	ID	BW
UJL									1	0.042	-0.300*	0.332**	0.484**
PD										1	0.338**	0.266*	0.393**
PL											1	0.145	0.238*
ID												1	0.697**
BW													1

表 7 五条鲷各表型性状间相关性分析

Tab.7 Correlation coefficients among morphometric traits of *S. quinquerradiata*

性状	TL	FL	SL	BH	HL	POL	ED	LJL	UJL	PD	PL	ID	BW
TL	1	0.874**	0.862**	0.707**	0.677**	0.532**	0.045	0.483**	0.566**	0.31	0.460*	0.325	0.800**
FL		1	0.975**	0.732**	0.776**	0.734**	0.035	0.582**	0.666**	0.426*	0.519**	0.470**	0.835**
SL			1	0.749**	0.795**	0.712**	0.029	0.553**	0.606**	0.435*	0.553**	0.493**	0.834**
BH				1	0.593**	0.565**	-0.067	0.487**	0.631**	0.313	0.418*	0.363*	0.879**
HL					1	0.720**	0.127	0.516**	0.597**	0.517**	0.420*	0.624**	0.712**
POL						1	-0.04	0.478**	0.617**	0.655**	0.520**	0.309	0.619**
ED							1	-0.032	0.16	0.081	-0.054	0.398*	0.08
LJL								1	0.823**	0.349	0.353	0.357	0.684**
UJL									1	0.369*	0.243	0.473**	0.766**
PD										1	0.354	0.311	0.454*
PL											1	-0.15	0.454*
ID												1	0.482**
BW													1

表 8 黄条鲷表型性状对体重影响的通径分析

Tab.8 Effects of phenotypical traits on body weight of *S.lalandi* using path analysis

性状	相关系数 ( $\gamma_{iy}$ )	直接作用 ( $P_i$ )	间接作用( $\gamma_{ij} P_j$ )				共线性诊断		决定系数				
			$\Sigma$	SL	BH	PL	PD	Tol	VIF	SL	BH	PL	PD
SL	0.933**	0.587**	0.346	—	0.195	0.084	0.067	0.416	2.406	0.345	0.229	0.099	0.078
BH	0.794**	0.313**	0.480	0.365	—	0.063	0.052	0.591	1.691		0.098	0.040	0.033
PL	0.682**	0.141**	0.541	0.351	0.141	—	0.049	0.623	1.604			0.020	0.014
PD	0.685**	0.108*	0.577	0.362	0.151	0.064	—	0.595	1.680				0.012

注: 表格中“—”表示无。下同

体质量影响的回归方程:

$$Y = -8732.725 + 121.837X_1 + 227.847X_2 + 208.460X_7 + 379.031X_8 \quad (R^2 = 0.966), \quad (5)$$

在高体鲷中, 筛选出对体质量具有显著影响的 5 个表型性状: 体长(SL)、体高(BH)、眼间距(ID)、下颌长(LJL)和眼后头长(POL) (表 9), 计算得出的直接通径系数分别为 0.326、0.265、0.231、0.177 和 0.184, 5 个表型的直接通径作用均小于间接作用。体长对体质量的决定程度最高, 为 10.6%, 体高次之(7.0%); 在共同决定系数中, 体长与体高对体质量的共同决定程度最大, 为 9.9%, 总决定系数为 0.851。同时构

建了高体鲷 5 个表型性状对体质量影响的回归方程:

$$Y = -2354.733 + 36.248X_1 + 50.718X_2 + 151.078X_3 + 94.426X_4 + 91.680X_5 \quad (R^2 = 0.852), \quad (6)$$

在五条鲷中, 筛选出对体质量具有显著影响的 3 个表型性状: 体高(BH)、下颌长(LJL)和全长(TL) (表 10), 计算得出的直接通径系数分别为 0.544、0.285 和 0.277, 其中, 体长的直接通径作用大于间接作用, 其他 2 个性状的直接通径作用均小于间接作用。体高对体质量的决定程度最高, 为 21.6%, 下颌长次之(8.1%); 在共同决定系数中, 全长与体高对体质量的共同决定程度最大, 为 21.3%, 总决定系数为 0.894。

表 9 高体鲷表型性状对体重影响的途径分析  
Tab.9 Effects of phenotypical traits on body weight of *S. dumerili* using path analysis

性状	相关系数( $\gamma_{ij}$ )	直接作用( $P_i$ )	间接作用( $\gamma_{ij} P_j$ )						共线性诊断		决定系数				
			$\Sigma$	SL	BH	ID	POL	LJL	Tol	VIF	SL	BH	ID	POL	LJL
SL	0.818**	0.326**	0.492	—	0.152	0.144	0.102	0.094	0.395	2.530	0.106	0.099	0.094	0.067	0.061
BH	0.727**	0.265*	0.433	0.187	—	0.104	0.065	0.106	0.560	1.787		0.070	0.055	0.035	0.056
ID	0.697**	0.231**	0.466	0.204	0.120	—	0.058	0.084	0.577	1.732			0.053	0.027	0.039
POL	0.605**	0.177**	0.491	0.167	0.153	0.106	—	0.065	0.655	1.528				0.031	0.024
LJL	0.674**	0.184**	0.428	0.188	0.098	0.075	0.067	—	0.598	1.673					0.034

表 10 五条鲷表型性状对体重影响的途径分析  
Tab.10 Effects of phenotypical traits on body weight of *S. quinquerediata* using path analysis

性状	相关系数( $\gamma_{ij}$ )	直接作用( $P_i$ )	间接作用( $\gamma_{ij} P_j$ )				共线性诊断		决定系数		
			$\Sigma$	BH	LJL	TL	Tol	VIF	BH	LJL	TL
BH	0.879**	0.544**	0.335	—	0.139	0.196	0.472	2.117	0.296	0.151	0.213
LJL	0.684**	0.285**	0.399	0.265	—	0.134	0.724	1.38		0.081	0.076
TL	0.800**	0.277**	0.523	0.385	0.138	—	0.475	2.105			0.077

同时构建了五条鲷 3 个表型性状对体质量影响的回归方程:

$$Y = -14\ 159.820 + 500.625X_2 + 569.874X_4 + 77.236X_6 \quad (R^2 = 0.895), \quad (7)$$

式(5)、(6)、(7)中,  $Y$  为体质量(BW),  $X_1 \sim X_8$  分别为体长(SL)、体高(BH)、眼间距(ID)、下颌长(LJL)、眼后头长(POL)、全长(TL)、尾柄长(PL)、尾柄高(PD)。

### 2.3 3 种鲷表型性状的多元统计分析

**2.3.1 3 种鲷的表型性状的主成分分析** 在进行主成分分析前, 对 13 个表型性状指标的 KMO 和 Bartlett 的球形度进行检验, 结果为  $KMO = 0.593 > 0.5$ , 且 Bartlett 的  $P = 0.000 < 0.05$ , 表明本研究所采用的 13 个表型性状指标适合做主成分分析。结果表明, 3 种鲷属鱼类形态指标共得到 4 个主成分, 前 4 个主成分的初始特征值均大于 1, 且累积方差贡献率为 79.947%。其中第一项主成分贡献率为 34.974%, 其他 3 个主成分的贡献率依次为 23.897%、11.587%、9.489% (表 11)。由表 12 可知, 第一主成分中, 表型性状指标 SL/BH、HL/ED、SL/PD、SL/LJL 及 PL/PD 的作用最大, 其负荷值分别为 0.733、0.904、0.912、0.903 及 0.765; 第二主成分、第三主成分和第四主成分分别是由 SL/HL、SL/POL、SL/PL、LJL/UJL、HL/ID 决定。从构建的三维立体得分图(图 5)可知, 3 种鲷的表型性状指标各自簇成一团, 重叠区域较少。

**2.3.2 3 种鲷表型性状的判别分析** 通过 SPSS 23.0 软件中逐步判别筛选变量的方法, 从 13 个特征性状中剔除了贡献不显著的 6 个变量(FL/SL、SL/

POL、SL/PL、SL/LJL、PL/PD 和 UJL/LJL)。以剩余的 7 个比例性状为自变量, 判别函数判别效果的显著性检验结果为: 对 3 个种群进行判别分析得到 2 组特征值的典型相关系数为 0.954, Wilks Lambda 检验  $\lambda = 0.090$ ,  $\chi^2$  值为 298.488,  $P = 0.000 < 0.01$ , 表明利用这 7 个变量所建立的判别函数的判别效果具有显著性意义。建立的 3 种鲷的判别函数式如下:

黄条鲷:

$$Y = 4\ 073.030X_1 + 126.278X_2 + 922.101X_3 + 30.359X_4 + 4.309X_5 + 457.868X_6 + 89.555X_7 - 5\ 628.780, \quad (8)$$

表 11 3 种鲷表型性状指标的特征值与方差贡献率  
Tab.11 Eigenvalues and variance contribution rate of phenotypical traits of three *Seriola* fishes

成分	初始特征值	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
1	4.547	34.974	34.974
2	3.107	23.897	58.871
3	1.506	11.587	70.459
4	1.234	9.489	79.974
5	0.889	6.835	86.782
6	0.594	4.565	91.348
7	0.416	3.199	94.547
8	0.279	2.145	96.692
9	0.197	1.518	98.210
10	0.131	1.006	99.216
11	0.095	0.734	99.950
12	0.005	0.005	99.988
13	0.002	0.012	100.000

表 12 主成分载荷矩阵  
Tab.12 The component matrix

度量性状比	成分			
	PCA1	PCA2	PCA	PCA4
TL/SL	-0.176	0.612	0.323	0.346
FL/SL	-0.528	0.166	0.338	0.279
SL/BH	0.733	0.501	0.200	0.081
SL/HL	0.308	0.855	-0.013	-0.025
SL/POL	-0.217	0.869	-0.146	-0.023
HL/ED	0.904	-0.207	0.035	0.026
SL/PL	0.109	0.240	0.716	-0.568
SL/PD	0.912	-0.244	0.127	-0.029
HL/ID	0.047	0.199	0.203	0.749
SL/UJL	0.642	0.580	-0.352	-0.134
SL/LJL	0.903	0.202	0.115	-0.022
PL/PD	0.765	-0.375	-0.308	0.326
LJL/UJL	-0.282	0.500	-0.651	-0.133

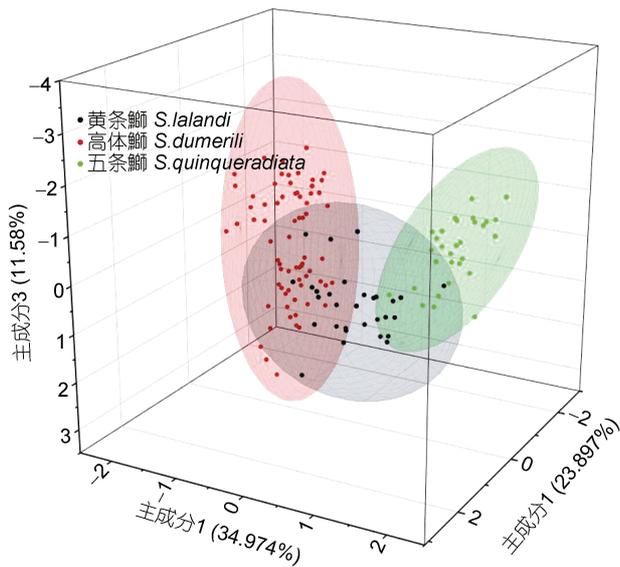


图 5 3 种鲷鱼主成分 1、2 和 3 的得分图

Fig.5 Score of principal components 1, 2, and 3 of three *Seriola* fishes

高体鲷:

$$Y=3\ 894.741X_1+103.847X_2+865.620X_3+17.910X_4+3.336X_5+443.652X_6+81.378X_7-4\ 928.930, \quad (9)$$

五条鲷:

$$Y=3\ 865.719X_1+107.174X_2+814.712X_3+40.877X_4+7.825X_5+410.910X_6+86.266X_7-4\ 967.871, \quad (10)$$

式中,  $X_1 \sim X_7$  分别对应 TL/SL、SL/BH、SL/HL、HL/ED、SL/PD、HL/ID、SL/UJL。

为验证判别公式的实用性, 将 3 种鲷鱼的测量数据按上述公式进行预测分类, 如表 13 所示。3 种鲷鱼的判别准确率  $P_1$ 、 $P_2$  均为 100%, 综合判别率为

100%。软件分析  $F$  值 $<0.01$ , 表明 3 种鲷鱼的判别公式是可靠的。因此, 在判别 3 种鲷鱼的群体归属时, 只需测量上述 7 个指标, 分别带入公式并计算出其函数值, 得出  $Y$  值最大的判别函数所对应的群体名称, 判定该鱼所属类群。

2.3.3 3 种鲷鱼表型性状的聚类分析 取 3 种鲷鱼的 13 个表型性状指标平均值, 基于欧式最短距离的聚类结果显示(见图 6), 黄条鲷和五条鲷聚为一个分支, 之后再与高体鲷聚为一大支。

### 3 讨论

#### 3.1 3 种鲷鱼的形态度量特征比较分析

形态度量特征是生物遗传学比较直观的外在表现形式, 也是生物分类系统上重要的理论依据 (Sistrom *et al*, 2012)。在可数性状中, 黄条鲷和五条鲷的鳃耙数量显著高于高体鲷, 可作为 3 种鲷鱼的一个鉴别特征。对测量的 13 个性状进行了 Pearson 相关性分析, 3 种鲷鱼除眼径外的其他 12 个性状间均存在显著相关性( $P<0.05$ )。方差分析显示, 3 种鲷鱼在叉长/体长(FL/SL)、体长/尾柄长(SL/PL)、头长/眼间距(HL/ID)和下颌长/上颌长(LJL/UJL) 4 个比例性状中无显著差异( $P>0.05$ ), 在体长/体高(SL/BH)、体长/头长(SL/HL)、体长/眼后头长(SL/POL)等比例性状中差异显著( $P<0.05$ ), 这也是 3 种鲷鱼在表型特征差异的主要表现。在其他鱼类群体研究中也有体现, 孙希福(2009)对中国沿海分布的 7 个群体的斑尾复虾虎鱼(*Synechogobius ommaturus*)的形态特征研究发现, 其可数性状中的鳃耙数, 比例性状中的体高/体长、头长/体长和尾柄长/尾柄高等性状在群体差异间起主导作用。谢鹏(2019)对于不同地理群体的尖头鲷(*Phoxinus oxycephalus*)和拉氏鲷(*Phoxinus lagowskii*)研究表明, 体长/体高、头长/尾柄高和尾柄长/尾柄高等比例性状在其群体变异中占比较高。

表 13 基于 7 个贡献显著的比率变量判别函数对 3 个鲷鱼群体判别分析结果

Tab.13 Results of discriminant analysis of three populations of *Seriola* based on seven significant ratio variables

物种	预测分类			判别准确率/%		综合判别率/%
	黄条鲷	高体鲷	五条鲷	$P_1$	$P_2$	
黄条鲷	40	0	0	100	100	
高体鲷	0	70	0	100	100	100
五条鲷	0	0	30	100	100	
总计	40	70	30			
百分率/%	28.57	50.00	21.43			

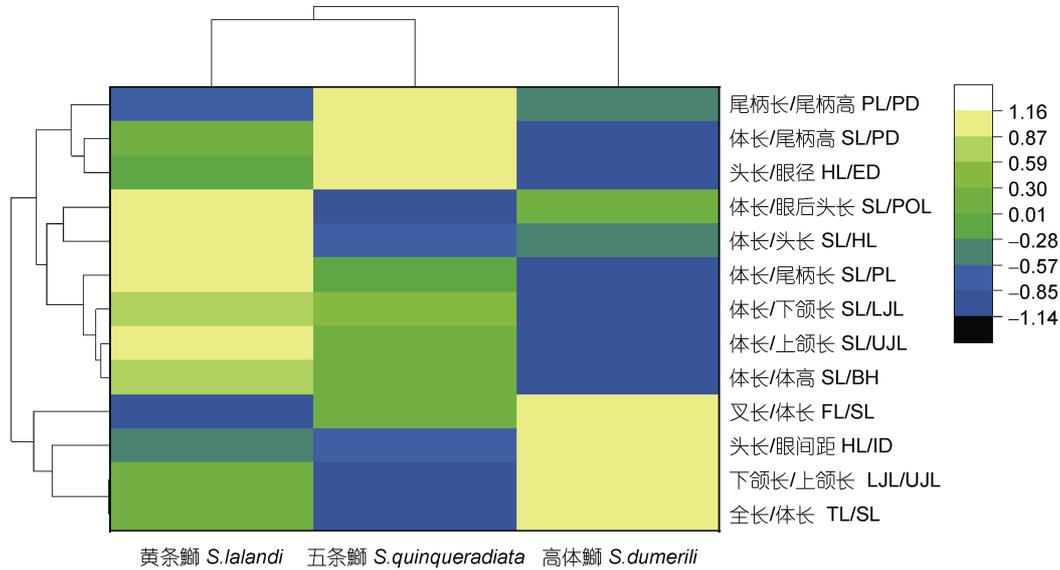


图 6 基于 13 个表型性状比值的 3 种鲷鱼群体的聚类热图

Fig.6 Cluster heatmap of three *Seriola* populations based on 13 phenotypical traits

### 3.2 通径分析

通径系数是直接体现自变量对因变量影响的大小,随筛选自变量的个数和参数的不同而改变(王新安等,2008b)。本研究中,3种鲷鱼表型性状的变异系数数值最大的均为体质量(BW),说明体质量在选育过程中具有较大的选择潜力,其可能易受环境等因素的影响。一般认为,当决定系数 $R^2$ 大于或等于0.85时,认为所选的性状指标对体质量有显著影响(刘小林等,2002)。本研究中经通径分析计算的黄条鲷、高体鲷和五条鲷的决定系数 $R^2$ 分别为0.966、0.852和0.895。说明在黄条鲷选育中对于体质量起主要作用的性状为体长、体高、尾柄长和尾柄高,且体长的决定系数占比最大;在高体鲷选育中对于体质量起主要作用的性状为体长、体高、眼间距、下颌长和眼后头长,且体长的决定系数占比最大;在五条鲷选育中对于体质量起决定主要作用的性状为体高、全长和下颌长,且体高的决定系数占比最大。不同的鱼类对其体质量影响的表型性状存在差异,张明辉等(2011)分析了以色列红罗非鱼(*Oreochromis mossambicus* × *O. niloticus*)发现,全长、体宽、眼间距和体高是影响体质量形态指标的主要因素;孟乾等(2020)对4月龄斑石鲷(*Oplegnathus punctatus*)研究发现,体长、体高和尾柄高是影响其体质量的主要形态性状。因此,在鱼类选育过程中,可将相关性分析、通径分析与回归分析结合研究表型性状对体质量影响的因素,以便提高结果的准确性。

### 3.3 多元统计分析比较

随着生物信息学技术的不断发展,多元统计方法(单因素方差分析及多重比较、主成分分析、判别分析和聚类分析)的应用,弥补了传统形态学分类方法的不足,为物种低阶元分类提供了新方向(Cadrin,2000)。本研究采用主成分分析、判别分析和聚类分析等多元统计方法对3种鲷鱼的形态特征进行探究。主成分分析是通过降维的方法,使用几个贡献大的因子来尽可能反应原始数据中多个变量的信息(梁宏伟等,2015)。主成分分析显示3种鲷鱼的差异主要集中在头部和躯干部,获得的4个主成分累积方差贡献率为79.947%,没有达到85%的临界值,表明仅凭这几个形态指标不足以概括3种鲷鱼的形态特征(Voss *et al.*,1990)。判别分析通过构建判别公式对鱼类种群进行判别,是鱼类种群鉴定的常用方法之一(练青平等,2011)。在本研究共筛选了贡献度较大的7个变量构建了判别函数,对3种鲷鱼群体的综合判别率为100%,判别效果较好。聚类分析是在水产领域应用中对不同品系进行初步归类,量化品系间的差异程度,通常被用来分析样本间的相似程度(乔德亮等,2010)。从聚类热图可以看出,3种鲷鱼间的亲缘关系中,黄条鲷与五条鲷聚为一簇,再与高体鲷聚为一大簇。鱼类形态性状易受外部环境因素和内在基因表达的影响(陈杰等,2014),分子生物学技术的运用填补了形态学研究中存在的不足。之前本团队根据线粒体DNA的特性,通过*Cyt b*、*ND1*和*ND2*基因等DNA

条形码(王开杰等, 2021)对 3 种鲷鱼进行系统发育分析, 结果表明黄条鲷与五条鲷亲缘关系最近, 同属一支, 之后在于高体鲷聚为一支, 与本研究形态学划分相一致。

#### 4 结论

综上所述, 本研究通过形态度量法、多元统计方法与框架结构法相结合, 可准确将 3 种鲷鱼表型进行区分, 为养殖生产中三种鲷鱼的快速鉴别提供了直观快捷的形态学依据, 同时采用通径分析筛选出了 3 种鲷鱼各自表型性状对体质量影响的主要性状, 为其种质标准和遗传育种提供精准的表型性状参数及判别依据。

#### 参 考 文 献

- 马爱军, 王新安, 雷霖霖, 2008. 大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)四个不同地理群体数量形态特征比较[J]. 海洋与湖沼, 39(1): 24-29.
- 王开杰, 徐永江, 崔爱君, 等, 2021. 基于 *Cyt b*、*ND1* 及 *ND2* 的 DNA 条形码在鲷属鱼类物种鉴定中的应用[J]. 渔业科学进展, 43: 1-14.
- 王维鑫, 崔爱君, 徐永江, 等, 2021. MS-222 和丁香油对黄条鲷麻醉效果研究[J]. 渔业科学进展, 42(6): 205-214.
- 王新安, 马爱军, 许可, 等, 2008a. 大菱鲆幼鱼表型形态性状与体重之间的关系[J]. 动物学报, 54(3): 540-545.
- 王新安, 马爱军, 陈超, 等, 2008b. 七带石斑鱼(*Epinephelus septemfasciatus*)两个野生群体形态差异分析[J]. 海洋与湖沼, 39(6): 655-660.
- 史宝, 柳学周, 曹亚男, 等, 2020. 盐度胁迫对黄条鲷消化生理和抗应激指标的影响[J]. 海洋科学, 44(6): 64-72.
- 乔德亮, 李思发, 2010. 细鳞斜颌鲷三个群体形态差异[J]. 生态学杂志, 29(12): 2425-2430.
- 任忻生, 陈宇, 2012. 鲷鱼异尖线虫病的防控[J]. 农村养殖技术(20): 39.
- 刘小林, 常亚青, 相建海, 等, 2002. 栉孔扇贝壳尺寸性状对活体重的影响效果分析[J]. 海洋与湖沼, 33(6): 673-678.
- 孙希福, 2009. 基于形态学和分子生物学资料探讨中国沿海 10 种虾虎鱼类的系统发育关系[D]. 青岛: 中国海洋大学: 38-41.
- 李荣, 徐永江, 柳学周, 等, 2017. 黄条鲷(*Seriola aureovittata*)形态度量与内部结构特征[J]. 渔业科学进展, 38(1): 142-149.
- 李思发, 王成辉, 程起群, 2005. 红鲷四品系的形态差异和种系关系[J]. 水产学报, 29(5): 606-611.
- 李思发, 李晨虹, 李家乐, 1998. 尼罗罗非鱼品系间形态差异分析[J]. 动物学报, 44(4): 450-457.
- 杨天燕, 孟玮, 郭焱, 等, 2018. 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), 37(3): 221-227.
- 张明辉, 陈刚, 谢俊刚, 2011. 以色列红罗非形态性状对体重影响的通径分析[J]. 安徽农学通报, 17(16): 47-49, 51.
- 陆忠康, 1990. 日本鲷鱼和真鲷沿海养殖方法与技术[J]. 现代渔业信息, 5(7): 20-23.
- 陈杰, 李福贵, 黄创新, 等, 2014. 不同鲷属鱼类群体的形态差异分析[J]. 上海海洋大学学报, 23(3): 388-394.
- 孟乾, 张志勇, 贾超峰, 等, 2020. 4 月龄斑石鲷生长性状的相关分析与通径分析[J]. 水产科技情报, 47(3): 135-139.
- 练青平, 宓国强, 胡廷尖, 等, 2011. 唇鱼骨、花鱼骨及其杂交  $F_1$  的形态差异分析[J]. 大连海洋大学学报, 26(6): 493-499.
- 柳学周, 2017. 黄条鲷人工繁育技术取得重大突破[J]. 海洋与渔业(8): 19.
- 侯吉伦, 赵雅贤, 任建功, 等, 2016. 中国沿海 6 个花鲈群体的形态差异分析[J]. 海洋渔业, 38(5): 459-467.
- 梁宏伟, 李忠, 罗相忠, 等, 2015. 长丰鲢与长江鲢形态差异与判别分析[J]. 水生生物学报, 39(5): 1059-1064.
- 谢鹏, 2019. 中国鲷属鱼类形态学比较和温度适应的研究[D]. 武汉: 华中农业大学: 45-49.
- 廖志强, 2003. 高体鲷网箱养殖技术[J]. 中国水产(12): 60-61.
- 缪圣赐, 2010. 智利正在开始实施黄条鲷的养殖事业[J]. 现代渔业信息, 25(9): 33.
- CADRIN S X, 2000. Advances in morphometric identification of fishery stocks [J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 10(1): 91-112.
- MATSUMOTO Y, THAO L X, MORIOKA K, *et al*, 2017. Effects of graded levels of taurine supplement to the no-fishmeal diet on the growth and physiology in juvenile yellowtail *Seriola quinqueradiata* [J]. Aquaculture Science, 65(3): 239-246.
- NWANI C D, BECKER S, BRAID H E, *et al*, 2011. DNA barcoding discriminates freshwater fishes from southeastern Nigeria and provides river system-level phylogeographic resolution within some species [J]. Mitochondrial DNA: The Journal of DNA Mapping, Sequencing, and Analysis, 22(S1): 43-51.
- RIGOS G, KATHARIOS P, KOGIANNOU D, *et al*, 2021. Infectious diseases and treatment solutions of farmed greater amberjack *Seriola dumerili* with particular emphasis in Mediterranean region [J]. Reviews in Aquaculture, 13(1): 301-323.
- SISTROM M, EDWARDS D L, DONNELLAN S, *et al*, 2012. Morphological differentiation correlates with ecological but not with genetic divergence in a *Gehyra* gecko [J]. Journal of Evolutionary Biology, 25(4): 647-660.
- TAKEYAMA H, CHOW S, TSUZUKI H, *et al*, 2001. Mitochondrial DNA sequence variation within and between tuna *Thunnus* species and its application to species identification [J]. Journal of Fish Biology, 58(6): 1646-1657.
- VOSS R S, MARCUS L F, PATRICIA ESCALANTE P, 1990. Morphological evolution in murid rodents I. Conservative patterns of craniometric covariance and their ontogenetic basis in the Neotropical genus *Zygodontomys* [J]. Evolution, 44(6): 1568-1587.
- YOKOYAMA S, ASADA Y, ISHIKAWA M, *et al*, 2020. Growth and physiological responses of juvenile amberjack (*Seriola dumerili*) fed pellet diets bound by different binders [J]. Journal of the World Aquaculture Society, 51(6): 1326-1340.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THREE *SERIOLA* SPECIES

WANG Kai-Jie, XU Yong-Jiang, CUI Ai-Jun, JIANG Yan, WANG Bin, LIU Xue-Zhou

(Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Joint Laboratory for Deep Blue Fishery Engineering of Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071, China)

**Abstract** To reveal the interspecific differences of phenotypic characteristics among three *Seriola* species, the morphology of farmed *Seriola lalandi*, *Seriola dumerili*, and *Seriola quinqueradiata* in China was analyzed. The countable and morphometrical characteristics were measured and compared, and the relationship and difference were determined using multivariate statistical methods including one-way ANOVA, path analysis, principal component analysis, discriminant analysis and cluster analysis. A total of 190 experimental fish were used. Results of one-way ANOVA show that there were significant differences among all the morphometric indexes ( $P < 0.05$ ) except for fork length/soma length (FL/SL), soma length/caudal peduncle length (SL/PL) and head length/eye diameter (HL/ID), and mandibular length/maxillary length (LJL/UJL). In addition, four phenotypic traits (SL, body height (BH), caudal peduncle length (PL), and caudal peduncle height (PD)) are the main traits affecting body weight in *S. lalandi* as path analysis shown. Five phenotypic traits, soma length (SL, BH, eye diameter (ID), mandibular length (LJL) and head length behind the eyes (POL) in *S. dumerili* were the main traits affecting their body weight. Three phenotypic traits (BH, LJL, and total length (TL)) were the main traits affecting the body weight of *S. quinqueradiata*. Four principal components were constructed by principal component analysis, of which the first principal component contributed 34.974%, followed by the other three principal components (23.897%, 11.587%, 9.489%, respectively), and their cumulative variance contribution rate was 79.947%. The discriminant accuracy rate of  $P_1$  and  $P_2$  of *Seriola* fishes was 100%, and the comprehensive discriminant rate was 100.00% as revealed by discriminant analysis. *S. lalandi* and *S. quinqueradiata* were clustered into a branch, and then were clustered into a large branch with *S. dumerili*. The present results provide intuitive morphometric basis for the species identity, germplasm norm establishment, and genetic breeding of *Seriola* fishes.

**Key words** *Seriola* species; phenotypic characteristics; path analysis; multivariate morphometrics; multivariate statistical analysis