**DOI:**10.14188/j. ajsh. 2023.06.002

# 河川沙塘鳢繁殖期与非繁殖期种群形态差异、雌雄个体差异及 遗传多样性分析

王雪1,任艳1,刘怡然1,李波1,刘国兴2,周琦1,朱文欢3,张琪3,朱思华1\*

(1. 武汉市农业科学院,湖北 武汉 430207;

2. 江苏省淡水水产研究所,江苏南京 210017;

3. 武汉市水产技术推广指导中心,湖北 武汉 430012)

**摘要**:本研究利用传统形态性状测量及框架性状分析方法研究了江苏省河川沙塘鳢繁殖期与非繁殖期种群形态特征及雌雄个体差异。结果显示,河川沙塘鳢存在形态特征的季节差异,繁殖期个体拥有相对较大的眼径、眼间距,推测与食物资源的季节性变化有关;另外,背鳍前距和胸鳍基长较长,可能因性腺发育饱满导致该时期个体腹腔容积变大。在两性特征中,两性异形指数为-0.013,表明雄鱼个体较大。雄性在尾柄高、尾鳍长等方面显著大于雌性,以此来增加竞争能力以及对后代的保护能力。雌性个体具有较大的腹腔容量,增加了繁殖输出,提高繁殖适合度。另外,本研究基于线粒体 *cyt b* 基因,84 个个体共识别出 17 个单倍型,整体表现出具有较高的遗传多样性(*h*=0.892,π=0.508%),表明江苏省河川沙塘鳢群体存在丰富的线粒体DNA 多态性。

**关键词:**河川沙塘鳢;繁殖期与非繁殖期;形态差异;雌雄个体差异;细胞色素 *b* 基因;遗传多样性 **中图分类号:** Q958.8 文献标志码:A 文章编号:2096-3491(2023)06-0523-11

## Morphological differences, individual differences between male and female, and genetic diversity analysis of reproductive and nonreproductive populations of *Odontobutis potamophilus*

## WANG Xue<sup>1</sup>, REN Yan<sup>1</sup>, LIU Yiran<sup>1</sup>, LI Bo<sup>1</sup>, LIU Guoxing<sup>2</sup>, ZHOU Qi<sup>1</sup>, ZHU Wenhuan<sup>3</sup>, ZHANG Qi<sup>3</sup>, ZHU Sihua<sup>1\*</sup>

(1. Wuhan Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430207, Hubei, China;

2. Freshwater Fisheries Research Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210017, Jiangsu, China;

3. Fisheries Technical Extension and Guidance Center of Wuhan, Wuhan 430012, Hubei, China)

**Abstract:** Morphological differences of *Odontobutis potamophilus* during reproduction and non-reproduction periods and the discrimination of male and female were investigated using samples collected in Jiangsu Province by traditional morphological character measurement and truss analysis methods. Results indicated that a distinct seasonal variation occurred in *O. potamophilus*. Individuals had larger eye diameter and interorbital width during reproduction period, which might be related to food resource availability. Individuals in this period also had larger pre-dorsal length and pectoral fin base

作者简介:王雪(1990-),女,博士,主要从事鱼类分子生态学研究。E-mail: wangxue\_ihb@163.com

\*通讯联系人:朱思华(1965-),男,高级工程师,主要从事淡水名优鱼类苗种繁育、成鱼养殖。E-mail: zhushwuhanagri@163.com

Wang X, Ren Y, Liu Y R, *et al.* Morphological differences, individual differences between male and female, and genetic diversity analysis of reproductive and nonreproductive populations of *Odontobutis potamophilus* [J]. Biotic Resources, 2023, 45(6): 523–533.

收稿日期: 2023-07-07 修回日期: 2023-09-19 接受日期: 2023-12-29

基金项目: 湖北省重点研发计划(2022BBA009);湖北省农业事业发展中心项目(鄂农发计发[2022]1号);武汉市农科院 2023年创新体系学科 创新项目(XKCX202303-3)

引用格式:王雪,任艳,刘怡然,等.河川沙塘鳢繁殖期与非繁殖期种群形态差异、雌雄个体差异及遗传多样性分析[J].生物资源,2023,45 (6):523-533.

length, likely associated with the increasing capacity of abdominal cavity as a result of gonadal maturity. The sexual dimorphism index was -0.013, indicating a significant sexual dimorphism in body size, with males larger than females. Males had larger caudal peduncle depth and caudal fin length than females, which could be advantageous in competition for spouses and protection of offspring. Females increased individual fecundity by increasing the capacity of abdominal cavity. Furthermore, 17 haplotypes were derived from 84 individuals of *O. potamophilus* based on *cyt b* gene analysis. High haplotype diversity and high nucleotide diversity were detected ( $h=0.892, \pi=0.508\%$ ), suggesting that there are abundant mitochondrial DNA polymorphisms in *O. potamophilus* populations.

**Key words**: *Odontobutis potamophilus*; reproduction and non-reproduction period; morphological difference; individual difference between male and female; *cyt b*; genetic diversity

## 0 引 言

河川沙塘鳢(Odontobutis potamophilus)隶属于 鰕鯱鱼目(Gobiiformes)沙塘鳢科(Odontobutidae)沙 塘鳢属(Odontobutis),又称土布鱼、虎头鲨等,为淡 水小型肉食性底栖鱼类,分布于长江中下游及沿江 各支流、钱塘江和闽江等水系<sup>[1]</sup>。其肉质细嫩,氨基 酸含量丰富,系餐桌名肴,深受江浙沪等地人们欢 迎。近年来,受生态环境变化和人为过度捕捞等因 素的影响,河川沙塘鳢的野生资源急剧减少,开展相 关种质遗传研究对其资源保护和利用具有重要意 义。另外,随着市场需求的不断增长,河川沙塘鳢已 成为一个非常具有潜力的水产养殖品种<sup>[2]</sup>。

形态特征是物种分类和资源鉴定的主要指标。 传统形态测量法不能全面地利用鱼体提供的信 息<sup>[3,4]</sup>,且对种内不同地理群体的形态差异存在局限 性[5]。而框架测量法[6]利用鱼体若干形态坐标点,比 较一些关键点的位置或框架长度,较传统测量法更 能准确地反映同一物种不同种群的形态差异。在鱼 类的生产实践中,性别判定是进行繁殖及选育的重 要基础[7]。部分鱼类在雌、雄形态上差异显著,如马 口鱼类(Opsariichthine)雄鱼在繁殖季节具有明显的 婚姻色和珠星,腹鳍条和臀鳍条会显著延长<sup>[8]</sup>;稀有 **饷鲫**(Gobiocypris rarus)的雄鱼胸、腹鳍较雌鱼更长 且鳃盖、胸鳍上有细小的棘状珠星<sup>[9]</sup>。沙塘鳢属鱼 类雌、雄最显著的是繁殖期生殖突的形状,雌鱼厚而 圆,呈扁管状,末梢有两个小的突起;雄鱼薄而尖,呈 三角形,尖端指向后方,灰黑色<sup>100</sup>。通常,鱼类形态 上的雌雄差异特征仅适用于性成熟个体,且在繁殖 期易于鉴别。而当雌、雄个体间无明显差异时,需解 剖观察、性腺切片等进行性别判别。此法需剖杀活 体,操作步骤繁琐。因此,目前通过测定大量鱼类样 本的形态和框架指标来进行性别判定是一种较为有 效的方法。

近年来,随着线粒体DNA研究的深入化和使用的广泛性,其作为有效的分子标记被应用于水产生

物的种群遗传学、生物地理学以及保护生物学等研究<sup>[11~13]</sup>。其中,cytb基因进化速率适中,适合种群水 平差异的检测。目前,通过 cytb基因对不同地区河 川沙塘鳢种群遗传学已进行了一些研究。有学者通 过对长江中下游5个湖泊的河川沙塘鳢 cytb基因的 比较分析,探讨了其种群遗传多样性和进化关系<sup>[14]</sup>。 另有学者研究了浙江湖州河川沙塘鳢野生和人工繁 育种群遗传多样性,并与太湖、鄱阳湖以及巢湖等3 个种群的遗传结构进行了对比,为河川沙塘鳢种质 资源分类评估,种群关系研究等提供了参考<sup>[15]</sup>。

本研究利用传统测量和框架测量方法研究了河 川沙塘鳢繁殖期与非繁殖期的种群形态特征以及雌 雄个体差异,分别建立判别方程,并分析其形成原 因。同时,基于线粒体 cyt b 基因分析了种群遗传多 样性,为河川沙塘鳢亲本识别、种质资源保护和良种 选育提供理论依据和参考。

#### 1 材料与方法

#### 1.1 样本采集

2021年4月在江苏省淡水水产研究所扬中基地 采集河川沙塘鳢繁殖期样本46尾,其中,雌性样本 23尾,雄性样本23尾;6月在南京市高淳区采集非繁 殖期样本40尾,其中雌性样本17尾,雄性样本23尾 (表1)。采集到的样本随即进行形态测量,并进行 常规生物学解剖,目测性腺发育情况,性腺发育期的 确定参照黄海研究所(1981)的六期划分标准<sup>[16]</sup>。每 个样本取适量鳍条用95%的酒精固定便于后期 DNA提取。

## 1.2 形态测量

样本的形态测量过程中,以身体左侧特征为基 准。使用传统测量性状和框架测量性状描述鱼体的 外部形态。传统测量性状包括全长、体长、体高、体 宽、头长、头高、头宽、口宽、口裂宽、眼后头长、眼径、 眼间距、胸鳍长、腹鳍长、臀鳍长、尾柄长、尾柄高、尾 鳍长。框架测量性状每个样本选取12个坐标点进 行测量(图1),共测量了13个形态数据,包括AB(根

1 able 1	moma	tion of sample conection of <i>Outhiobuils</i>
Tabla 1	Informo	tion of sample collection of <i>Odontobutis</i>
	衣工	<b>冯川沙塘雴忤华木朱</b> 信忌
	主 1	河川沙塘蛐垟木叉隹信自

	Porum	opnins	
种群	样本数	体长分布/mm	体重分布/g
繁殖期(R)	46	83.70~124.30	$18.5 \sim 49.8$
非繁殖期(N-R)	40	80.18~113.83	$13.5 \sim 41.2$
雌性(♀)	40	80.18~117.30	$13.5 \sim 49.8$
雄性(含)	46	80.40~124.30	$17.7 {\sim} 47.6$
总计	86	80.18~124.30	13.5~49.8

据图1所示的坐标点,AB指的是A坐标点到B坐标 点的直线距离)、BC、BD、BF、BG、BK、DH、EF、 FG、FJ、FK、GI、KL。测量时采用电子数显卡尺进 行测量,精确度为0.01 mm,使用电子天平称量体质 量(g)。肥满度(condition factor,CF)=体质量(g)/ 体长<sup>3</sup>(cm<sup>3</sup>)×100%。两性异形指数(sexual dimorphism index, SDI)=(雌性的体长平均值/雄性的体 长平均值)-1<sup>[17]</sup>,其值为正时雌性偏大,为负时雄性 偏大。



图 1 河川沙塘鳢框架测量的 12 个坐标位点示意图(图片 引自参考文献[1])

## Fig. 1 Location of the 12 loci used to construct the truss network on *Odontobutis potamophilus* (picture cited from reference [1])

#### 1.3 DNA提取及序列扩增测序

基因组 DNA 提取方法参照试剂盒(天根生化: 磁珠法动物组织基因组 DNA 提取试剂盒)。正向引物 cytb - F (GACCAATGACTTGAAAAAC-CACCG)和反向引物cytb - R (TAATTA-AGAATTTTAGCTTTGGGAGCT)。PCR反应体系为30  $\mu$ L:2×PowerTaqPCRMasterMix 15  $\mu$ L, DNA模板1 $\mu$ L, 正反向引物(浓度10 mmol/L)各1 $\mu$ L, ddH<sub>2</sub>O 12  $\mu$ L。PCR反应条件:95 °C预变性5 min,95 °C变性30 s, 58 °C退火30 s, 72 °C延伸1 min, 共35个循环,最后72 °C延伸5 min。获得的PCR产物经1%琼脂糖凝胶电泳检测后,由武汉天一辉远公司完成纯化和序列测定。

## 1.4 数据处理与分析

利用 Kolmogorov-Smirnov test(K-S test)检验 原始形态数据测量值的正态性。为了消除样本大 小和异速生长对形态性状的影响<sup>[18]</sup>,对形态数据进 行转换<sup>[19]</sup>。对于转化后的数据,利用单因素方差分 析(one-way ANOVA),2个独立样本*t*检验、主成分 分析、判别分析等对河川沙塘鳢的形态性状差异进 行分析。上述统计分析均采用 SPSS 22.0软件 完成。

DNA 序列比对使用 CLUSTALX 1.8 软件<sup>[20]</sup>, 并在 SEAVIEW 程序<sup>[21]</sup>中对序列进行手工调整。序 列中各碱基的含量及变异情况使用 MEGA 5.0<sup>[22]</sup>软 件进行分析。使用 DNASP 5.10 软件<sup>[23]</sup>计算各种群 及总体遗传多样性参数。

#### 2 结果

2.1 繁殖期与非繁殖期形态分化

所有形态测量数据经转换后,与全长无显著的 相关性,数据转换有效。

方差分析结果表明在河川沙塘鳢繁殖期与非繁 殖期种群 33 个形态特征中,有 18 项存在显著差异 (表 2)。其中,繁殖期个体在空壳重、头高、头宽、眼 后头长、眼径、尾柄高、BD、DH以及EF共9项形态 特征中极显著大于非繁殖期个体(P < 0.01);在体 宽、眼间距、胸鳍长以及FG中显著大于非繁殖期个 体(P < 0.05);其余 5 个形态指标中,均表现为繁殖 期个体小于非繁殖期个体,其中尾柄长、FJ以及FK 达到极显著水平(P < 0.01),肥满度和体长达到显 著水平(P < 0.05)。

KMO统计量检验表明,性状变量间的偏相关性 小,Bartlett 球形检验(Bartlett's test of sphericity)表 明各性状变量间不独立(P<0.01)。因此,转换后 的性状测量数据可以用于主成分分析。对存在差异 的18个形态特征变量进行主成分分析。主成分的 负荷值及方差贡献率见表3。结果表明5个主成分 的累计方差贡献率为63.726%。第一主成分上有 较高载荷值的主要形态特征是空壳重、肥满度、体 长、体宽(解释25.078%变异);第二主成分上有较 高载荷值的主要形态特征是头宽、眼后头长、眼径、 眼间距(解释13.833%变异);第三主成分上有较高 载荷值的主要形态特征是BD、DH、胸鳍长(解释 10.129%变异);第四主成分上有较高载荷值的主 要形态特征是EF、FG(解释7.799%变异);第五主 成分上有较高载荷值的主要形态特征是尾柄长(解 释 6.887% 变异)。繁殖期与非繁殖期河川沙塘鳢 性状变量主成分散布图见图 2a。结果显示,分散明 显,但仍部分重叠,呈现混合性。

对所有数据进行逐步判别分析,依据各变量对

衣 2	РЛ	有性状单因素力差分析结果以及分化系数( $m{Q}_{ m sr}$ )
Table	2	Results of one-way ANOVA and differentiation
		coefficient for all traits $(O_{st})$

变量	繁殖期(R)/非繁殖 期(N-R)		雌(♀)/雄(含)		Q <sub>ST</sub>
	F值	比较	F值	比较	~31
空壳重	10.219**	$R \ge N - R$	34.009**	₽<\$	0.026
肥满度	4.849*	$R \le N - R$	2.065	₽<\$	0.020
体重	0.599	$R \ge N - R$	0.001	₽<\$	0.005
体长	13.376**	$R \le N - R$	3.34	₽<\$	0.107
体高	0.037	$R \ge N - R$	3.163	₽>\$	-0.012
体宽	6.253*	$R \ge N - R$	0.281	₽<\$	0.060
头长	0.315	$R \ge N - R$	2.844	₽<\$	-0.009
头高	16.103**	$R \ge N - R$	4.247*	₽<\$	0.092
头宽	24.395**	$R \ge N - R$	8.32**	₽<\$	0.125
口宽	3.767	$R \ge N - R$	4.534*	₽<\$	0.046
口裂宽	0.111	$R \ge N - R$	10.38**	₽<\$	-0.003
眼后头 长	8.202**	$R \ge N - R$	1.776	₽<\$	0.100
眼径	33.598**	$R \ge N - R$	0.098	₽<\$	0.043
眼间距	4.427*	$R \ge N - R$	11.725**	₽<\$	0.02
胸鳍长	5.37*	$R \ge N - R$	1.366	₽<\$	0.006
腹鳍长	3.830	$R \ge N - R$	0.405	\$<₽	0.018
臀鳍长	0.010	$R \ge N - R$	64.088**	₽<\$	-0.011
尾柄长	7.403**	$R \le N - R$	2.493	₽>\$	0.103
尾柄高	10.873**	$R \ge N - R$	9.304**	₽<\$	0.062
尾鳍长	0.140	$R \ge N - R$	4.794*	₽<\$	0.034
AB	3.355	$R \ge N - R$	9.987**	₽<\$	0.014
BC	0.457	$R \ge N - R$	4.322*	₽<\$	0.014
BD	29.503**	$R \ge N - R$	0.043	₽<\$	0.134
BF	0.595	$R \ge N - R$	1.081	₽<\$	-0.008
BG	0.050	$R \ge N - R$	0.084	₽<\$	-0.010
BK	3.063	$R \ge N - R$	10.191**	₽>\$	-0.008
DH	9.323**	$R \ge N - R$	4.111*	₽<\$	0.037
EF	13.955**	$R \ge N - R$	1.311	₽<\$	0.101
FG	5.000*	$R \ge N - R$	5.662*	₽>\$	0.041
FJ	29.002**	$R \le N - R$	0.035	₽<\$	0.146
FK	18.19**	$R \le N - R$	0.225	₽<\$	0.075
GI	1.399	$R \ge N - R$	0.09	₽<\$	-0.012
KL	1.951	$R \ge N - R$	11.271**	₽<\$	-0.011

注:\*表示 P<0.05;\*\*表示 P<0.01 Note: \* indicates P<0.05, \*\* indicates P<0.01

判别模型的贡献大小逐步剔除不相关变量,最终共 筛选出6个变量,分别为 $X_1$ (空壳重)、 $X_2$ (眼径)、 $X_3$ (眼间距)、 $X_4$ (BD)、 $X_5$ (EF)、 $X_6$ (FJ)。这6个形态指 标反映了河川沙塘鳢繁殖期与非繁殖期个体在眼部 和鳍条方面的差异,根据筛选出的6个变量所建立 的典型判别模式方程为:

#### 繁殖期:

 $Y_{R} = -7\ 284.\ 364 + 60.\ 200X_{1} + 34.\ 513X_{2} -$ 

161.348X<sub>3</sub>+3001.817X<sub>4</sub>+599.528X<sub>5</sub>+526.960X<sub>6</sub> 非繁殖期:

 $Y_{N-R} = -7\ 251.\ 286 + 68.\ 095X_1 + 29.\ 790X_2 -$ 

 $170.492X_3 + 2976.137X_4 + 612.190X_5 + 537.771X_6$ 

判别函数的显著性检验显示 P<0.01,表明判 别函数达到极显著水平。分别计算出繁殖期与非 繁殖期的判别分数值,得到其个体的频布图,表明 该模型可以用于区分河川沙塘鳢的繁殖期与非繁 殖期(图3)。表4中,判别准确率P1(%)=(某一群 体的判别正确尾数/该群体的实际尾数)×100%: P2(%)=(某一群体的判别正确尾数/判入该群体 的尾数)×100%;根据所建立的判别方程可以看 出,判别函数与BD、EF、FJ之间的相关性比较高, 这些性状主要与鳍条相关。将所有样本按照上述 公式进行判别预测分析,结果显示(表4),综合判别 准确率为84.9%,判别效果极其显著(P < 0.01)。 对用于建立判别函数的6个形态指标进行t检验,结 果显示,除眼间距在繁殖期与非繁殖期个体间呈现 出显著差异(P<0.05),其余5个形态指标均呈现 出极显著差异(P<0.01)(表5),表明繁殖期个体拥 有相对较大的眼径、眼间距以及较长的背鳍前距和 胸鳍基长。

## 2.2 雌雄个体差异

河川沙塘鳢两性异形指数为-0.013。方差分 析结果显示,33个形态数量特征中,有15项存在显 著差异(表2),仅FG(P<0.05)及BK(P<0.01)表 现为雌性个体大于雄性个体,其余13项均表现为雄 性大于雌性。其中,空壳重、头宽、口裂宽、眼间距、 臀鳍长、尾柄高、AB和KL共8项差异达到极显著水 平(P<0.01);头高、口宽、尾鳍长、BC和DH共5项 差异达到显著水平(P<0.05)。

主成分的载荷值及方差贡献率见表6。前5个 主成分的累计方差贡献率为64.232%。空壳重、头 高、头宽在第一主成分上具有较高的载荷值(解释 24.880%变异);BC、口宽、AB以及口裂宽在第二主 成分上具有较高的载荷值(解释13.085%变异);第 三主成分上有较高载荷值的主要形态特征是眼间 距、DH、FG(解释11.127%变异);第四主成分上有 较高载荷值的主要形态特征是BK和臀鳍长(解释 8.085%变异);第五主成分上有较高载荷值的形态 特征是尾柄高及尾鳍长(解释7.055%变异)。河川 沙塘鳢雌雄性状变量主成分散布图见图2b。结果

<b>耒</b> 3	河川沙塘鳢剱碣	前期与非敏殖期	日性状变量的	主成分的负	荷值和贡献家
ৰু ১	<b>川川ツ店 短</b> 系加	1	北水文里的	工成刀的贝	19 伹 fl 贝 瞅 竿

Table 3	Load values and contribution rates of principal components for measurements of morphometric characters during
	reproduction and non-reproduction periods of O. potamophilus

形态性状	主成分1(PC1)	主成分2(PC2)	主成分3(PC3)	主成分4(PC4)	主成分5(PC5)
空壳重	0.755	0.051	0.180	0.265	0.172
肥满度	0.675	0.120	0.139	-0.028	0.036
体长	0.646	-0.002	0.159	-0.066	0.271
体宽	0.612	-0.322	0.068	0.185	0.016
头高	0.499	0.287	-0.074	0.349	0.321
头宽	0.071	0.799	-0.094	0.106	-0.170
眼后头长	-0.040	0.717	0.161	-0.110	-0.153
眼径	0.129	0.560	-0.090	0.102	0.229
眼间距	-0.268	0.537	-0.250	-0.389	0.099
BD	0.129	0.003	0.910	0.119	0.157
DH	0.144	-0.072	0.876	0.221	0.253
胸鳍长	-0.263	0.019	-0.534	0.064	0.408
EF	-0.011	0.110	-0.111	-0.902	-0.082
FG	0.168	0.482	0.110	0.768	0.172
FJ	-0.269	0.267	-0.422	-0.49	0.073
FK	0.100	0.061	0.102	0.034	0.846
尾柄长	0.334	-0.032	0.018	0.093	0.776
尾柄高	0.137	-0.309	0.189	0.045	0.432
特征根	4.514	2.490	1.823	1.404	1.240
方差贡献率/%	25.078	13.833	10.129	7.799	6.887
累计贡献率/%	25.078	38.911	49.040	56.839	63.726

表4 河川沙塘鳢繁殖期与非繁殖期判别结果

Table 4 Discriminant results of O. potamophilus during reproduction and non-reproduction periods

лч / <del>1</del> -	预测分类		判别准确率/%		し 人 水口 コーナ
相手 1 <del>1</del> -	繁殖期	非繁殖期	P1	P2	际合判别举
繁殖期	38	8	82.6	88.4	04.00/
非繁殖期	5	35	87.5	81.4	84.9%

显示,分散不明显,但仍表现出分离态势。

逐步判别分析最终共筛选出5个变量,分别为  $X_1$ (空壳重)、 $X_2$ (FG)、 $X_3$ (BK)、 $X_4$ (臀鳍长)、 $X_5$ (尾鳍 长),根据筛选出的5个变量所建立的典型判别模式 方程为:

雌性:

 $Y_{\varphi} = -13\ 299.\ 218 - 308.\ 439X_1 - 169.\ 523X_2 + 4\ 925.\ 909X_3 + 1\ 105.\ 086X_4 + 1\ 104.\ 646X_5$ 

雄性:

 $Y_{\diamond} = -13\ 327.\ 416 - 294.\ 688X_1 - 176.\ 857X_2 + \\ 4\ 899.\ 876X_3 + 1\ 125.\ 612X_4 + 1\ 118.\ 347X_5$ 

判别函数的显著性检验显示 P<0.01,表明判 别函数达到极显著水平。分别计算出雌雄的判别分 数值,得到雌雄个体的频布图,表明该模型可以用于 区分河川沙塘鳢的两性个体(图4)。将所有样本按 照上述公式进行判别预测分析,结果见表7,综合判 别准确率为89.5%,判别效果极其显著(P<0.01)。 对用于建立判别函数的5个形态指标进行t检验,结 果显示,尾鳍长和FG在雌雄个体间呈现出显著差 异(P<0.05),其余3个形态指标均呈现出极显著差 异(P<0.01)(表5),表明雌性个体拥有更大的胸腹 腔,而雄性个体拥有相对较长的臀鳍和尾鳍。

## 2.3 种群遗传多样性

本研究分析了江苏省河川沙塘鳢84个个体的 线粒体 cyt b 基因序列,对比后得到序列长度为 1140 bp。序列中无碱基的缺失或插入。所有序列 的转换和颠换均未达到饱和,转换数明显大于颠换 数,其平均 Ti/Tv 的值为3.76。序列的变异位点29

	ences of O	). potamophilus	
性状	种群	均值土标准差	P值
应当手	繁殖期	$30.224 \pm 8.46$	<0.01
全冗里	非繁殖期	$24.93 \pm 6.938$	< 0.01
四日 47	繁殖期	$5.441 \pm 0.987$	<0.01
眼它	非繁殖期	$3.774 \pm 0.513$	< 0.01
明白匠	繁殖期	$9.635 \pm 1.73$	
眼則起	非繁殖期	$7.652 \!\pm\! 1.142$	< 0.05
DD	繁殖期	$48.939 \pm 3.675$	<0.01
BD	非繁殖期	$42.306 \pm 3.728$	< 0.01
EF	繁殖期	$10.839 \pm 1.066$	<0.01
	非繁殖期	$10.38 \pm 1.317$	< 0.01
	繁殖期	$27.348 \pm 3.329$	<0.01
FJ	非繁殖期	$28.499 \pm 3.44$	< 0.01
应主手	雌	$24.535 \pm 6.765$	<0.01
<b></b>	<i>太</i> 隹	$30.567 \pm 8.346$	< 0.01
<b>国告 在老 レ</b>	雌	$22.38 \pm 2.591$	<0.01
膋蝔长	<i>太</i> 隹	$26.77 \pm 5.084$	< 0.01
	雌	$24.21 \pm 2.301$	<0.05
尾鳍长	<i>太</i> 隹	$25.475 \pm 2.993$	< 0.05
	雌	$9.038 \pm 1.577$	< 0.05
FG	雄	$8.802 \pm 1.628$	< 0.05
DV	雌	$69.994 \pm 6.171$	<0.01
ВК	旋	$69.547 \pm 5.796$	< 0.01

表 5 河川沙塘鳢特征性状的 t 检验及形态差异 Table 5 *t*-test of characteristics and morphological differ-

个,占2.5%;其中简约信息位点25个,占2.2%。 所有个体平均碱基组成分别为:T=28.1%、C= 31.3%、A=26.6%、G=14.0%,其中,A+T (54.7%)含量高于G+C(45.3%),碱基组成存在 强烈的偏倚,G的含量尤其在密码子第三位的含量 特别的低(仅6.4%)。

所有 cyt b序列中共检测到 17个单倍型。整体 单倍型多样性(h)和核苷酸多样性(π)分别为0.892 和0.508%,表现为具有较高的遗传多样性。扬中群 体与南京群体均表现为高单倍型多样性,分别为 0.771和0.793;低核苷酸多样性,分别为0.195%和 0.319%。基于 Kimura 双参数(Kimura 2-parameter, K2P)模型计算得到两种群间的遗传距离为0.009。

## 3 讨 论

3.1 繁殖期与非繁殖期种群形态差异

形态学研究是沙塘鳢属鱼类研究的重要内容之一,对于其开发利用具有重要意义。目前对于河川 沙塘鳢的形态学研究主要集中在不同群体、家系间 的比较。有研究分析了河川沙塘鳢4个不同地理群 体的15项形态比例参数<sup>[24]</sup>,结果表明,4个群体在形 态上即相似又有一定程度的差异。近年来,也有学 者对沙塘鳢雌雄的形态和生长差异进行过研究,结 果证明,河川沙塘鳢的雌雄在形态特征或生长速度 上都存在较大差异<sup>[25,26]</sup>。

本研究对于河川沙塘鳢在繁殖期与非繁殖期各 形态指标进行测定,发现不同时期种群局部特征具 有差异性。方差分析结果显示繁殖期个体在包括空 壳重在内的13个性状显著大于非繁殖期个体(表 2),该结果提示了繁殖期个体因性腺发育饱满导致 该时期个体腹部鼓且圆,腹腔容积变大,而较大的体 型和腹腔为提高繁殖能力提供了可能。

通过主成分分析和判别分析可以识别出对种群 间差异具有贡献的形态特征变量。繁殖期与非繁殖 期存在差异的18个形态特征变量可以构建5个主成



Fig. 2 Scatter plot of principal components of measurements of morphometric characters of reproduction and non-reproduction period (a)/sexual distinction (b) in *O. potamophilus* 

生物资源

	表 6	河川沙塘鳢雌雄状变量的主成分的负荷值和贡献率
Table 6	Load values and contributio	n rates of the principal components for measurements of morphometric characters of
		sexual distinction of O. potamophilus

形态性状	主成分1(PC1)	主成分2(PC2)	主成分3(PC3)	主成分4(PC4)	主成分 5(PC5)
空壳重	0.804	0.269	0.134	0.104	-0.08
头高	0.760	-0.121	0.140	-0.097	-0.100
头宽	0.752	0.140	0.065	0.114	0.059
BC	0.177	0.764	0.220	0.105	-0.007
口宽	0.069	0.689	-0.073	-0.189	-0.428
AB	-0.038	0.676	0.022	-0.077	0.202
口裂宽	0.143	0.638	0.151	0.245	0.250
眼间距	-0.231	-0.112	0.743	-0.152	0.265
DH	0.238	0.187	0.735	0.106	-0.159
FG	0.295	0.112	0.609	0.190	-0.011
BK	0.013	-0.084	0.130	0.804	-0.034
臀鳍长	0.034	0.535	-0.161	0.571	0.016
KL	0.289	0.132	0.438	0.465	0.137
尾柄高	-0.416	0.178	0.066	-0.190	0.718
尾鳍长	0.488	0.120	-0.004	0.231	0.629
特征根	3.732	1.963	1.669	1.213	1.058
方差贡献率/%	24.880	13.085	11.127	8.085	7.055
累计贡献率/%	24.880	37.965	49.092	57.176	64.232







表7 氵	可川沙塘鳢性别判别结果
------	-------------

Table 7	Discriminant results	of sexual	distinction of O.	potamophilus
---------	----------------------	-----------	-------------------	--------------

群体	预测分类		判别准确率/%		它合利用家
	雌性	雄性	P1	P2	场百判劝平
雌性	35	5	87.5	89.7	89.5%
雄性	4	42	91.3	89.4	

分:第一主成分主要反映了鱼类整体形态,代表鱼类 对生境的适应性;第二主成分上有较高载荷值的均 为头部特征,体现在摄食能力方面;第三至第五主成 分均反映了鳍条的变化,代表着鱼类的游泳能力。



Fig. 4 Frequency distribution of discriminant score of sexual distinction of *O. potamophilus* (a, reproduction period; b, non-reproduction period)

判别分析中共提取了6个形态变量,这些特征中,与 主成分分析共有的形态特征有空壳重、眼径、眼间 距、BD、EF,主要反映了河川沙塘鳢头部特征变化。 形态变异在头部比较常见,被认为是对摄食环境和 食物网的一种适应,如丽科(Cichlidae)鱼类<sup>[27]</sup>。研 究表明,头部形态的可塑性使鱼类能够在食物来源 较少的环境中较快适应以生存下来<sup>[28,29]</sup>。食物资源 的季节性变化可能会造成动物的形态差异,经调查 发现,河川沙塘鳢非繁殖期食物资源更为丰富,种内 竞争相对较小。

动物的形态结构在生命过程中是动态的。本研 究结果证实河川沙塘鳢存在形态特征的季节差异,生 活史不同时期物质和能量分配不同,繁殖期会投入更 多的能量用于繁殖,而非繁殖期则是将更多的能量用 于与繁殖无直接关系的器官的生长<sup>[30]</sup>。另外,随着季 节的更替,生境的改变也会影响生物的形态。不同季 节的生态差异,包括食物和空间资源的供应、环境温 度、繁殖策略、交配竞争、捕食压力以及水体环境等的 变化都可能会对河川沙塘鳢的形态产生影响<sup>[31]</sup>。 3.2 两性异形机制

鱼类普遍存在两性异形现象,主要涉及个体大 小、体色等局部特征和某些身体功能方面,这些两性 异形是受性选择压力、繁殖力压力、自然选择压力以 及生长过程物质和能量的分配等多种选择压力的作 用<sup>[32,33]</sup>。个体大小异形是鱼类两性研究中最广泛的 现象,其表现形式有3种:雌性大于雄性,如食蚊鱼 (Gambusia affinis)<sup>[31]</sup>;雄性大于雌性,如黄颡鱼 (Pelteobagrus fulvidraco)<sup>[34]</sup>;雌雄个体大小相似,如 温州厚唇鱼(Acrossocheilus wenchowensis)<sup>[35]</sup>。第1 种类型有利于雌性提高个体生殖力,表现出生育力 选择的强烈作用。第2、3种个体大小类型与雄性个 体追逐配偶,提高受精和繁殖成功率有关。

河川沙塘鳢雌雄个体大小异形表现明显,两性 异形指数为-0.013,指示雄鱼大于雌鱼。方差分析 结果也显示了局部特征的两性异形(表2)。33个形 态特征中有15项存在显著差异,仅FG和BK在雌性 个体中显著大于雄性个体,其余形态指标如空壳重、 头高等均表现为雄性个体显著大于雌性个体。该结 果提示雌性个体拥有较大的胸腔容积,由于雌性对 繁殖投入的能量远远大于雄性,所以繁殖力选择压 力主要作用于雌性个体,驱使其向大腹腔大容纳量 方向进化,通过腹腔容积的增加,提高个体的怀卵数 量,从而增加雌性个体的生育力;而性选择压力主要 作用于雄性个体,能够促使其个体形态和行为的变 化,从而获得更多的交配机会,如较大的头部和其他 如鳍等器官对于雄性个体的食物资源、社群地位等 可能有积极作用[36]。因此可以认为,性选择和繁殖力 选择是驱动河川沙塘鳢两性异形进化的主要力量。

主成分分析结果同样构建了5个主成分:第一及 第二主成分上具有较高载荷值的均为头部特征,尤 其是强调了吻部的变化,代表了鱼类的摄食能力;其 余三个主成分主要反映了鳍条的变化,代表着鱼类 的游泳能力。判别分析中共提取了5个形态变量,在 主成分分析中均有体现,主要反映了河川沙塘鳢的 腹部特征以及鳍条的变化,这与方差分析结果一致。

通过形态特征对比、主成分分析、判别分析表 明,河川沙塘鳢存在显著的两性异形,雄性个体在体 长和体重方面均大于雌性个体。有研究表明,雄性 典型的筑巢、护巢和孵卵行为是促使雄性个体显著 大于雌性的重要影响因素。因此,当存在雄性护卵、 一雄多雌的交配体制现象时,雄性为提高竞争力、交 配成功率和对后代的保护,便形成大个体<sup>[37]</sup>。沙塘 鳢属鱼类自然孵化率和仔鱼成活率并不高,雄性沙 塘鳢有明显的营巢和护卵行为(包括驱赶敌害、清除 杂物、激起水流进行孵化),雄鱼护卵显著提高卵的 孵化率和降低水霉病的感染率,且有明显的的一雄 多雌现象<sup>[38]</sup>。另外,本研究结果表明河川沙塘鳢两 性局部特征差异显著,雄性个体在尾柄高、尾鳍长等 方面显著大于雌性个体,鱼尾的形状会影响鱼类的 运动形式、速度以及捕食的战略<sup>[39]</sup>,雄鱼尾柄越大, 运动能力和护巢能力越强,后代成活率就可能越高。 雌性个体较雄性个体粗短,具有较大的腹腔容量,表 明雌鱼为获得更大的怀卵量而演化出更大的腹腔。 空壳重的反差表明了雌雄两性个体用于生长和繁殖 的物质和能量分配上的差异,雌性更多地用于繁殖, 雄性更多地用于个体的生长。

3.3 种群遗传多样性

遗传多样性是生物多样性的基础,是物种长期 生存和进化的前提,也是评估生物资源现状的一个 重要参数。物种遗传多样性最直接的表达方式就是 遗传变异的大小,一个种群的遗传多样性越高或者 遗传变异越丰富,表明对环境变化的适应能力就越 强,越容易扩展其分布范围和开拓新的环境<sup>[40]</sup>。因 此,遗传多样性是遗传选育的考量依据。单倍型多 样性(*h*)和核苷酸多样性(π)是衡量一个物种种群遗 传多样性的重要指标<sup>[41]</sup>。有学者基于线粒体*D-loop* 基因序列对于河川沙塘鳢5个地理种群遗传多样性 进行分析,结果显示,河川沙塘鳢具有高的单倍型多 样性以及较低的核苷酸多样性<sup>[42]</sup>。

本研究中基于线粒体 cyt b 基因序列, 江苏省河 川沙塘鳢84尾个体共识别出17个单倍型,整体表现 出具有较高的遗传多样性( $h=0.892, \pi=0.508\%$ ), 表明江苏省河川沙塘鳢群体存在丰富的线粒体 DNA 多态性,符合小型鱼类种群数量大、遗传多样 性丰富的特点。扬中群体与南京群体的单倍型多样 性分别为0.771和0.793,核苷酸多样性分别为 0.195%和0.319%,与同省其他地区河川沙塘鳢比 较(大纵湖: $h=1.000, \pi=0.148\%$ ; 固城湖:h=0.947, *π*=0.175%)<sup>[14]</sup>, 均表现为单倍型多样性较 高,核苷酸多样性较低。目前这种高h、低 $\pi$ 的特征, 可能是群体受到瓶颈效应后种群迅速扩张导致的结 果,因为核苷酸的积累时间比单倍型多样性的积累 时间要漫长的多,亦有可能是种群进化历史很短的 原因<sup>[43]</sup>。另外,基于K2P模型计算得到两种群间的 遗传距离较小,本研究中两个群体均来自江苏省相 邻水系,容易发生临近水域间的迁徙,造成种群间的 交流,而河川沙塘鳢繁殖力较小,参与繁殖的个体相 对较多,因此形成了较高的多态性。本研究将为河 川沙塘鳢的遗传资源评估、物种保护、科学选育以及 可持续利用等工作提供遗传数据信息。

#### 参考文献

127.131.

- [1] 伍汉霖,钟俊生.中国动物志·硬骨鱼纲 鲈形目(五) 虾虎鱼亚目[M].北京:科学出版社,2008:150-153.
  Wu H L, Zhong J S. Fauna sinica • Ostichthyes Perciformes (V) Gobioidei [M]. Beijing: Science Press, 2008: 150-153.
- [2] 张根玉,施永海,张海明,等.河川沙塘鳢的生物学特 性及市场前景[J].水产科技情报,2012,39(3):123-127,131.
  Zhang G Y, Shi Y H, Zhang H M, et al. Biological characteristics and market prospect of Odontobutis potamophila [J]. Fish Sci Technol Inf, 2012, 39(3):123-
- [3] Marcus L F. Traditional morphometrics [A]. In: Rohlf J and Bookstein F L (Eds), Proceedings of the Michigan morphometgrics workshop [M]. Ann Arbor: University of Michigan Museum of Zoology, 1990, 77-122.
- [4] Humphries J M, Bookstein F L, Chernoff B, et al. Multivariate discrimination by shape in relation to size
   [J]. Syst Biol, 1981, 30(3): 291-308.
- [5] Cadrin S X. Advances in morphometric identification of fishery stocks [J]. Rev Fish Biol Fisher, 2000, 10(1): 91 -112.
- [6] Strauss R E, Bookstein F L. The truss: body form reconstructions in morphometrics [J]. Syst Biol, 1982, 31 (2): 113-135.
- [7] 武兆文,郑翔,张佳佳,等.杂交黄颡鱼"黄优1号"形态指标体系的建立及雌雄差异判别[J].海洋渔业,2019,41(5):578-588.
   Wu Z W, Zheng X, Zhang J J, *et al.* Establishment of

morphological index system of hybrid yellow catfish "Huangyou-1" (*Pelteobagrus vachelli*  $\diamond \times P$ . fulvidraco  $\uparrow$ ) and discrimination of male and female differences [J]. Mar Fish, 2019, 41(5): 578-588.

- [8] 陈宜瑜.马口鱼类分类的重新整理[J].海洋与湖沼, 1982,13(3):293-299.
  Chen Y Y. A revision of opsariichthine cyprinid fishes
  [J]. Oceanologiaet Limnologia Sinica, 1982, 13(3): 293 -299.
- [9] 王剑伟,曹文宣.中国本土鱼类模式生物稀有韵鲫研 究应用的历史与现状[J].生态毒理学报,2017,12(2): 20-33.

Wang J W, Cao W X. *Gobiocypris rarus* as a Chinese native model organism: history and current situation [J]. Asian J Ecotoxicol, 2017, 12(2): 20-33.

- [10] 郝天和.梁子湖沙鳢的生态研究[J].水生生物学集 刊,1960(2):145-158.
  Hao T H. An ecological study of a fresh-water goby *Odontobutis obscura* (Temm. et Schl.) in Liang-tze Lake of Hupei [J]. Acta Hydrobiol Sin, 1960(2): 145 -158.
- [11] Tang Q Y, Liu H Z, Mayden R, et al. Comparison of evolutionary rates in the mitochondrial DNA cytochrome b gene and control region and their implications for phylogeny of the Cobitoidea (Teleostei: Cypriniformes) [J]. Mol Phylogenet Evol, 2006, 39 (2): 347 -357.
- [12] 刘思情,唐琼英,李小娟,等.基于线粒体细胞色素 b 基因的黑鳍鳈生物地理学过程分析[J].动物学研究, 2013,34 (5):437-445.
   Liu S Q, Tang Q Y, Li X J, et al. Phylogeographic

analyses of *Sarcocheilichthys nigripinnis* (Teleostei: Cyprinidae) based on mitochondrial DNA *cyt b* gene sequences [J]. Zool Res, 2013, 34(5): 437-445.

[13] 王雪, 唐琼英, 刘飞,等.赤水河两种荷马条鳅属鱼类的遗传多样性及谱系生物地理学过程分析[J].水生生物学报, 2017, 41(2): 356-362.

Wang X, Tang Q Y, Liu F, *et al.* Genetic diversity and phylogeography of two *Homatula* species (Teleostei: Nemacheilidae) in the Chishui River [J]. Acta Hydrobiol. Sinica, 2017, 41(2): 356-362.

- [14] 徐宇,钟立强,李潇轩,等.5个湖泊河川沙塘鳢 (Odontobutis potamophila)种群线粒体细胞色素b基因 的遗传变异分析[J]. 湖泊科学, 2015, 27(4): 693-699.
  Xu Y, Zhong L Q, Li X X, et al. Genetic variation analysis of Odontobutis potamophila from five lakes based on Mitochondrial DNA cyt b [J]. J Lake Sci, 2015, 27(4): 693-699.
- [15] 卞玉玲, 刘士力, 刘一诺, 等. 湖州河川沙塘鳢群体线 粒体 DNA cyt b 基因序列的遗传多样性分析[J]. 水产 学杂志, 2023, 36(1): 22-28, 35.
  Bian Y L, Liu S L, Liu Y N, et al. Genetic diversity analysis of mitochondrial DNA cyt b gene sequence of Odontobutis potamophila population in Huzhou [J]. Chin J Fish, 2023, 36(1): 22-28, 35.
- [16] 殷名称.鱼类生态学[M].北京:中国农业出版社, 1995.
  Yin M C. Fish Ecology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995.
- [17] Lovich J E, Gibbons J W. A review of techniques for quantifying sexual size dimorphism [J]. Growth Dev Aging, 1992, 56(4): 269-281.
- [18] Tsoumani M, Apostolidis A P, Leonardos I D. Biogeography of *Rutilus* species of the southern Balkan Penin-

sula as inferred by multivariate analysis of morphological data [J]. J Zool, 2012, 289(3): 204-212.

- [19] Reist J D. An empirical evaluation of several univariate methods that adjust for size variation in morphometric data [J]. Can J Zool, 1985, 63(6): 1429-1439.
- [20] Thompson J D, Gibson T J, Plewniak F, et al. The CLUSTAL\_X windows interface: flexible strategies for multiple sequence alignment aided by quality analysis tools [J]. Nucleic Acids Res, 1997, 25(24): 4876-4882.
- [21] Galtier N, Gouy M, Gautier C. SEAVIEW and PHY-LO\_WIN: two graphic tools for sequence alignment and molecular phylogeny [J]. Bioinformatics, 1996, 12(6): 543-548.
- [22] Tamura K, Peterson D, Peterson N, et al. MEGA5: molecular evolutionary genetics analysis using maximum likelihood, evolutionary distance, and maximum parsimony methods [J]. Mol Biol Evol, 2011, 28(10): 2731-2739.
- [23] Librado P, Rozas J. DnaSP v5: a software for comprehensive analysis of DNA polymorphism data [J]. Bioinformatics, 2009, 25(11): 1451-1452.
- [24] 丁严冬,藏雪,张国松,等.河川沙塘鳢4个不同地理 群体的形态差异分析[J].海洋渔业,2015,37(1):24 -30.

Ding Y D, Zang X, Zhang G S, *et al.* Analysis of morphological variations among four different geographic populations of *Odontobutis potamophila* [J]. Mar Fish, 2015, 37(1): 24-30.

- [25] 樊晓丽,林植华,卢静,等.沙塘鳢形态特征的两性异 形和雌性个体生育力[J].上海交通大学学报:农业科 学版,2009,27(6):587-591,623.
  Fan X L, Lin Z H, Lu J, *et al.* Sexual dimorphism in morphological traits and female individual fecundity of *Odontobutis obscurus* [J]. J Shanghai Jiaotong Univ Agric Sci, 2009, 27(6):587-591, 623.
- [26] 张宏叶,陈树桥,王涛,等.河川沙塘鳢的形态指标体 系及雌雄差异分析[J]. 江苏农业科学,2018,46(6): 138-142.

Zhang H Y, Chen S Q, Wang T, *et al.* Morphological index system and gender difference analysis of *Odontobutis sinensis* [J]. Jiangsu Agric Sci, 2018, 46(6): 138 -142.

- [27] Fryer G, Iles T D. The cichlid fishes of the great lakes of Africa: their biology and evolution [M]. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1972.
- [28] Smith T B. Resource use by bill morphs of an African finch: evidence for intraspecific competition [J]. Ecology, 1990, 71(4): 1246-1257.
- [29] Pfennig D W. Polyphenism in spadefoot toad tadpoles

 [30] 林植华, 雷焕宗, 林植云, 等. 花鳎的两性异形和雌体 繁殖输出[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2005, 23(3): 284-288.
 Lin Z H, Lei H Z, Lin Z Y, *et al.* Sexual dimorphism

and female reproductive output of *Hemibarbus maculates* [J]. J Shanghai Jiaotong Univ Agric Sci, 2005, 23 (3): 284-288.

- [31] 谢梅凤.西部食蚊鱼的形态可塑性及稳定性研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.
  Xie MF. Study on morphological plasticity and stability of *Gambusia affinis* [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018.
- [32] Legrand R S, Morse D H. Factors driving extreme sexual size dimorphism of a sit-and-wait predator under low density [J]. Biol J Linn Soc, 2000, 71(4): 643-664.
- [33] Székely T, Reynolds J D, Figuerola J. Sexual size dimorphism in shorebirds, gulls, and alcids: the influence of sexual and natural selection [J]. Evolution, 2000, 54 (4): 1404-1413.
- [34] 林植华, 雷焕宗. 黃颡鱼的两性异形和雌性繁殖特征
  [J]. 动物学杂志, 2004, 39(6): 13-17.
  Lin Z H, Lei H Z. Sexual dimorphism and female reproductive characteristics of *Pseudobagrus fulvidraco* [J].
  Chinese J Zool, 2004, 39(6): 13-17.
- [35] 徐德钦,林植华,雷焕宗.温州厚唇鱼形态特征的两 性异形和雌性个体生育力[J].上海交通大学学报(农业 科学版),2006,24(4):335-340.
  Xu D Q, Lin Z H, Lei H Z. Sexual dimorphism in morphological traits and female individual fecundity of *Acrossocheilus wenchowensis* [J]. J Shanghai Jiaotong Univ Agric Sci, 2006, 24(4):335-340.
- [36] Preziosi R F, Fairbairn D J. Lifetime selection on adult body size and components of body size in a waterstrider: opposing selection and maintenance of sexual size dimor-

phism [J]. Evol, 2000, 54(2): 558-566.

- [37] Snelson F F. Systematics of the subgenus Lythrurus, genus Notropis (Pisces: Cyprinidae) [D]. New York: Cornell University, 1972.
- [38] 王吉桥, 史建国, 姜玉声, 等. 鸭绿沙塘鳢繁殖习性的观察及性腺发育周期的组织学研究[J]. 水产科学, 2008, 27(8): 379-385.
  Wang J Q, Shi J G, Jiang Y S, *et al.* Observation of the reproductive habits and histological gonad development cycle of dark sleeper (*Odontobutis yaluensis*) [J]. Fish Sci, 2008, 27(8): 379-385.
- [39] Webb P W. Body form, locomotion and foraging in aquatic vertebrates [J]. Integr Comp Biol, 1984, 24(1): 107-120.
- [40] 王瑾瑾,童金苟,张耀光,等.厚颌鲂两个野生群体遗 传多样性分析[J].水生生物学报,2014,38(5):975 -979.

Wang J J, Tong J G, Zhang Y G, *et al.* Study on the genetic diversity of two wild populations of *Megalobra-ma pellegrini* (Teleostei, Cyprinidae) [J]. Acta Hydrobiol Sin, 2014, 38(5): 975-979.

- [41] Neigel J E, Avise J C. Application of a random walk model to geographic distributions of animal mitochondrial DNA variation [J]. Genetics, 1993, 135(4): 1209-1220.
- [42] Hou X, Zhu F, Yin S, et al. Genetic diversity of Odontobutis potamophila from different geographic populations inferred from mtDNA control region [J]. Mitochondrial DNA, 2014, 25(5): 400-406.
- [43] Grant W, Bowen B. Shallow population histories in deep evolutionary lineages of marine fishes: insights from sardines and anchovies and lessons for conservation [J]. J Hered, 1998, 89(5): 415-426.

□ (编辑:张丽红)