

doi: 10.7541/2017.105

鲇亚科棒花鱼属鱼类的分类与系统发育关系

何欢 李玉火 曹恺 李明月 傅萃长

(复旦大学生命科学院生物多样性科学研究所, 生物多样性与生态工程教育部重点实验室, 上海 200438)

摘要: 鲇亚科棒花鱼属鱼类的分类与系统发育关系尚未解决。研究选择线粒体Cyt *b*基因和核基因*RAG1*、*MLH3*及*MSH6*作为分子标记, 重建了棒花鱼属鱼类的系统发育关系, 并结合形态证据对该属鱼类进行了分类厘定。结果表明: 棒花鱼与钝吻棒花鱼是单系种。拉林棒花鱼与辽宁棒花鱼是并系种, 一起形成单系群。拉林棒花鱼+辽宁棒花鱼一起嵌套在小鰾鲇属鱼类内部, 钝吻棒花鱼嵌套在片唇鲇属鱼类内部。拉林棒花鱼+辽宁棒花鱼+钝吻棒花鱼+片唇鲇属+胡鲇属+小鰾鲇属+琵琶鲇属鱼类组成单系群, 它们一起与棒花鱼形成姊妹群关系。可量性状与可数性状均不能区分拉林棒花鱼和辽宁棒花鱼。结合系统发育关系与形态证据, 棒花鱼属鱼类的分类厘定如下: 棒花鱼属鱼类包括棒花鱼和平江棒花鱼(未取样); 辽宁棒花鱼是拉林棒花鱼的同物异名, 后者的分类位置有待进一步校订; 钝吻棒花鱼校订为钝吻片唇鲇。

关键词: 鲤科; 鲇亚科; 棒花鱼属; 片唇鲇属; 小鰾鲇属; 系统发育

中图分类号: Q959.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2017)04-0843-10

依据Tang等^[1]建立的鲤科(Cyprinidae)鲇亚科(Gobioninae)鱼类分类系统, Jiang和Zhang^[2]进一步把鲇族(Gobionini)划分为鲇亚族(Gobionina)、鳅鲇亚族(Gobiobotiina)与似刺蛇鲇亚族(Armatogobionina)。其中, 似刺蛇鲇亚族包括7个属^[2]: 似鲇属(*Pseudogobio*)、蛇鲇属(*Saurogobio*)、棒花鱼属(*Abbottina*)、胡鲇属(*Huigobio*)、片唇鲇属(*Platysmacheilus*)、琵琶鲇属(*Biwia*)与小鰾鲇属(*Microphysogobio*)。先前放在鲇族的突吻鲇属(*Rostrogobio*)是小鰾鲇属的同物异名^[1]。似刺蛇鲇亚族鱼类中, 棒花鱼属鱼类的系统发育关系以及分类争议尚未很好地解决。

棒花鱼属包括5种鱼类^[3]: 棒花鱼[*Abbottina rivularis* (Basilewsky, 1855)], 模式地是中国北方, 广泛分布于东亚地区各主要水系; 钝吻棒花鱼[*Abbottina obtusirostris* (Wu & Wang, 1931)], 模式地是四川成都, 分布于长江上游水系; 辽宁棒花鱼[*Abbottina liaoningensis* Qin, 1987], 模式地是辽宁营口、丹东, 分布于辽河与鸭绿江水系; 拉林棒花鱼[*Abbottina lalinensis* Huang & Li, 1987], 模式地是黑龙江省五常市, 分布于黑龙江流域松花江水系;

平江棒花鱼(*Abbottina binhi* Nguyen, 2001), 模式地越南平江河(流入我国称为水口河), 分布于珠江流域西江水系左江。

棒花鱼属鱼类的分类争议主要包括2方面: (1)拉林棒花鱼和辽宁棒花鱼是否为同物异名。乐佩琦^[4]描述棒花鱼属鱼类时没有提及拉林棒花鱼。解玉浩^[5]把拉林棒花鱼作为辽宁棒花鱼的同物异名, 但并没有提供校订依据。(2)钝吻棒花鱼的分类归属有待进一步证实。Bănărescu和Nalbant^[6, 7]与Bănărescu^[8]将钝吻棒花鱼放在小鰾鲇属, 而罗云林等^[9]与乐佩琦^[4]将钝吻棒花鱼放在棒花鱼属。

基于头部侧线与骨骼特征的鲇亚科鱼类系统发育关系研究, Hosoya^[10]认为棒花鱼属是似鲇属的姊妹群。俞利荣和乐佩琦^[11]使用外部与骨骼特征对似鲇类(=似刺蛇鲇亚族)鱼类进行了系统发育关系研究, 结果表明棒花鱼属是琵琶鲇属+胡鲇属+片唇鲇+小鰾鲇属+突吻鲇属鱼类的姊妹群, 它们一起与蛇鲇属鱼类形成姊妹群关系。Yang等^[12]与Liu等^[13]使用线粒体细胞色素*b*基因对鲇亚科鱼类进行了系统发育关系研究, 揭示棒花鱼属和蛇鲇属是姊妹群关系, 它们一起与似鲇属+胡鲇属+突

收稿日期: 2016-04-28; 修订日期: 2016-08-25

基金项目: 国家自然科学基金(31471982)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China Science (31471982)]

作者简介: 何欢(1989—), 男, 四川德阳人; 硕士研究生; 主要从事鱼类生态与进化研究。E-mail: 13210700005@fudan.edu.cn

通信作者: 傅萃长, 教授, 博士生导师; E-mail: czfu@fudan.edu.cn

吻鲈属+片唇鲈属+小鰾鲈属+琵琶鲈属鱼类形成姊妹群关系。Tang等^[1]使用线粒体细胞色素*b*与细胞色素氧化酶*CO I*基因和核基因*Rag1*与*Rhodopsin*对鲈亚科鱼类进行了系统发育关系研究,他们的研究发现棒花鱼属鱼类是琵琶鲈属+胡鲈属+片唇鲈属+小鰾鲈属鱼类的姊妹群,它们一起与蛇鲈属鱼类形成姊妹群关系。上述基于形态证据与分子证据的鲈亚科鱼类的系统发育关系研究只探讨了棒花鱼属鱼类的系统发育位置,没有涉及棒花鱼属鱼类种间的系统发育关系。

本研究选择线粒体细胞色素*b*基因(*Cyt b*),核基因重组激活基因1(*RAG1*)、错配修复蛋白*MutL*基因3(*MLH3*)与错配修复蛋白*MutS*基因6(*MSH6*)作为分子标记,重建了棒花鱼属鱼类种间

的系统发育关系,并结合形态证据对该属鱼类进行了分类厘定。

1 材料与方法

1.1 物种取样和分子标记

本研究采集了棒花鱼属鱼类4种31尾(表1),包括黑龙江、辽河、海河、黄河、长江和珠江水系的棒花鱼13尾;黑龙江水系的拉林棒花鱼4尾;鸭绿江和辽河水系的辽宁棒花鱼7尾;长江上游水系的钝吻棒花鱼7尾。同时,还包括了胡鲈属、片唇鲈属、琵琶鲈属、小鰾鲈属、蛇鲈与似鲈属鱼类15种23尾(表1)。选择了2种鲈属鱼类作为外类群。分子标记选择线粒体基因*Cyt b*和核基因*RAG1*、*MLH3*及*MSH6*。

表1 种名、采样地点、个体编号及GenBank登录号
Tab. 1 Species, sampling sites, code and GenBank accession number of all individuals

采样地点Sampling site	编号Code	GenBank登录号GenBank accession number			
		Cyt <i>b</i>	<i>RAG1</i>	<i>MSH6</i>	<i>MLH3</i>
棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>					
内蒙古新巴尔虎右旗(黑龙江)	AR-XB	KX078780	KX078878	KX078928	KX078815
内蒙古扎兰屯市(黑龙江)	AR-ZL	KX096697	KX078879	KX078929	KX078816
吉林省抚松县(黑龙江)	AR-FSX	KX078781	KX078880	KX078930	KX078815
辽宁省抚顺市(辽河)	AR-FuS	KX078782	KX078881	KX078931	KX078816
辽宁省朝阳县(辽河)	AR-ZhaoY01	KX078783	KX078882	KX078932	KX078815
辽宁省朝阳县(辽河)	AR-ZhaoY02	KX078784	KX078883	KX078933	KX078816
北京市清水镇(海河)	AR-QingS01	KX078785	KX078884	KX078934	KX078815
北京市清水镇(海河)	AR-QingS02	KX078786	KX078885	KX078935	KX078816
山西省娄烦县(黄河)	AR-LF01	KX078787	KX078886	KX078936	KX078815
山西省娄烦县(黄河)	AR-LF02	KX078788	KX078887	KX078937	KX078816
江西省广昌县(长江下游)	AR-GC01	KX078789	KX078888	KX078938	KX078815
江西省广昌县(长江下游)	AR-GC02	KX078790	KX078889	KX078939	KX078816
江西省寻乌县(珠江东江)	AR-XW	KX078791	KX078890	KX078940	KX078815
拉林棒花鱼 <i>Abbottina lalinensis</i>					
吉林抚松县(黑龙江)	ALa-FS01	KX078792	KX078891	KX078941	KX078841
吉林抚松县(黑龙江)	ALa-FS02	KX078793	KX078892	KX078942	KX078842
吉林抚松县(黑龙江)	ALa-FS03	KX078794			
吉林抚松县(黑龙江)	ALa-FS04	KX078795			
辽宁棒花鱼 <i>Abbottina liaoningensis</i>					
辽宁桓仁满族自治县(鸭绿江)	AL-HR01	KX078796			
辽宁桓仁满族自治县(鸭绿江)	AL-HR02	KX078797	KX078895	KX078943	KX078843
辽宁清原县(辽河)	AL-QY01	KX078798	KX078893	KX078944	KX078844
辽宁清原县(辽河)	AL-QY02	KX078799	KX078894	KX078945	KX078845
辽宁宽甸县(鸭绿江)	AL-KD01	KX078800	KX078896	KX078946	KX078846
辽宁宽甸县(鸭绿江)	AL-KD02	KX078801	KX078897	KX078947	KX078847
辽宁宽甸县(鸭绿江)	AL-KD03	KX078802	KX078898	KX078948	KX078848
钝吻棒花鱼 <i>Abbottina obtusirostris</i>					
四川省新津县(长江上游)	AO-XJ01	KX078803	KX078899	KX078949	KX078849

续表1

采样地点Sampling site	编号Code	GenBank登录号GenBank accession number			
		Cyt b	RAG1	MSH6	MLH3
四川省新津县(长江上游)	AO-XJ02	KX078804	KX078900	KX078950	KX078850
四川省广汉市(长江上游)	AO-GH01	KX078805	KX078901	KX078951	KX078851
四川省广汉市(长江上游)	AO-GH02	KX078806	KX078902	KX078952	KX078852
四川省广汉市(长江上游)	AO-GH03	KX078807	KX078903	KX078953	KX078853
四川省罗江县(长江上游)	AO-LuoJ01	KX078808	KX078904	KX078954	KX078854
四川省罗江县(长江上游)	AO-LuoJ02	KX078809	KX078905	KX078955	KX078855
胡鲟 <i>Huigobio chenhshienensis</i>					
安徽省宁国市(长江下游)	HC-NG	KX078810	KX078907	KX078957	KX078857
安徽省黄山市(钱塘江)	HC-HuangS	KX078811	KX078908	KX078958	KX078858
薄尾胡鲟 <i>Huigobio exilicauda</i>					
广东省连州市(珠江北江)	HE-LianZ	KX078812	KX078906	KX078956	KX078856
片唇鲟 <i>Platysmacheilus exiguus</i>					
		KF926823*			
		AY953015*			
裸腹片唇鲟 <i>Platysmacheilus nudiventris</i>					
四川省绵竹镇(长江上游)	PN-LSMZ	KX078813	KX078909	KX078959	KX078859
四川省葫芦镇(长江上游)	PN-LSHL	KX078814	KX078910	KX078960	KX078860
长须片唇鲟 <i>Platysmacheilus longibarbatus</i>					
湖北省麻城市(长江中游)	PL-MC	KX078815	KX078911	KX078961	KX078861
江西省宁都县(长江下游)	PL-ND	KX078816	KX078912	KX078962	KX078862
琵琶鲟 <i>Biwia zezera</i>					
日本滋贺县(琵琶湖)	BZ-CN	KX078817	KX078913	KX078963	KX078863
横洞琵琶鲟 <i>Biwia yodoensis</i>					
日本精华町(木津川)	BY-SK	KX078818	KX078914	KX078964	KX078864
清徐小鲮鲟 <i>Microphysogobio chinssuensis</i>					
北京市密云县(海河)	MC-MY	KX078819	KX078915	KX078965	KX078865
陕西省神木县(黄河)	MC-SM	KX078820	KX078916	KX078966	KX078866
裸腹小鲮鲟 <i>Microphysogobio nudiventris</i>					
湖北省宜城市(长江中游)	MN-YC	KX078821	KX078917	KX078967	KX078867
湖北省宜昌市(长江下游)	MN-YiC01	KX078822	KX078918	KX078968	KX078868
湖北省宜昌市(长江下游)	MN-YiC02	KX078823	KX078919	KX078969	KX078869
黑龙江小鲮鲟 <i>Microphysogobio amurensis</i>					
内蒙古尼尔基镇(黑龙江)	MA-NE	KX078824	KX078920	KX078970	KX078870
吉林松原市(黑龙江)	MA-SongY	KX078825	KX078921	KX078971	KX078871
高丽小鲮鲟 <i>Microphysogobio koreensis</i>					
		JX179169*	HQ699728*		
湘江蛇鲟 <i>Saurogobio xiangjiangensis</i>					
江西遂川县(长江下游)	SX-SC	KU715718*	KX078924	KX078972	KX078874
长蛇鲟 <i>Saurogobio dumerili</i>					
江西湖口(长江下游)	SDu-HK	KU715692*	KX078925	KX078973	KX078875
似鲟 <i>Pseudogobio vaillanti</i>					
安徽省潜山县(长江下游)	PV-QS	KX096698	KX078923	KX078974	KX078872
桂林似鲟 <i>Pseudogobio guilinensis</i>					
广西省阳朔县(珠江西江)	PG-YS	KX096699	KX078922	KX078975	KX078873
凌源鲟 <i>Gobio lingyuanensis</i>					
内蒙古巴林右旗(辽河)	GL-SH	KX078826	KX078926	KX078977	KX078877
犬首鲟 <i>Gobio cynocephalus</i>					
内蒙古扎赉特旗(黑龙江)	GC-ZT	KX078827	KX078927	KX078976	KX078876

注: *表示该序列从GenBank下载, 其中蛇鲟属鱼类序列来自本实验室的同一个体

Note: *Denotes the sequence downloaded from GenBank, and the sequence of *Saurogobio* fishes in the present study belongs to the same individual

1.2 DNA提取、PCR扩增与测序

采用高盐法^[14]从95%酒精保存的肌肉组织中提取全基因组DNA。PCR扩增引物^[15, 16]见表2, 反应条件如下: 94℃预变性5min; 94℃变性50s, 52℃退火60s或者50s, 72℃延伸70s或者60s; 循环40或者35次; 72℃最后延伸8min。PCR产物纯化后在ABI 3730 DNA测序仪中使用扩增引物进行测序。

1.3 序列对位与系统发育关系重建

基因的序列对位在DAMBE ver. 5.6.7软件^[17]中完成, 包括3个步骤: (1)将核苷酸序列翻译成氨基酸序列; (2)使用Clustal W算法对位氨基酸序列^[18]; (3)将对位好的氨基酸序列转换为核苷酸序列。序列对位后排除插入或缺失区域。基因的分子特征计算在MEGA ver. 6.06软件^[19]中完成。采用线粒体基因数据集、核基因多位点数据集、线粒体与核基因联合数据集进行系统发育关系的重建。按基因进行分区, 基于赤池信息准则(AIC)选择最适碱基替换模型, 在jModeltest ver. 2.1.7软件^[20]中完成。使用MrBayes ver. 3.2.2软件^[21]进行贝叶斯分析。基于马尔可夫链蒙特卡罗(Markov chain Monte Carlo, MCMC)进行2000万代运算, 取样频率为1000, 保证分离频率平均标准偏差小于0.01。运行完成后舍弃前1/4的取样树, 根据剩余的3/4取样树构建50%的多数原则一致树, 并计算每个节点的后验概率值。使用RAxML ver. 7.2.6软件^[22]进行最大似然法分析。在GTRGAMMA模型下进行100次重复推算以搜索分值最高的最大似然树并进行1000次自展分析估计节点的支持度。

使用*BEAST ver. 2.3.0软件^[23]对线粒体与核基因联合数据进行分析, 重建物种树。选择对数正态分布的松散钟模型作为分子钟模型, 树的先验模型设定为Yule过程。运行4个独立的重复, MCMC代数设置为15000万代, 取样频率为5000, 舍弃前

1/5的样本后独立重复的log文档和trees文档在Log-Combiner ver. 2.3.0软件^[23]中合并。利用Tracer ver. 1.5软件^[24]估算合并后的log文档参数, 保证每个参数有效取样大小超过200。最后, 在TreeAnnotator ver. 2.3.0软件^[23]中生成最大谱系置信树。

1.4 形态特征的计数与测量

可数性状的计数依据陈宜瑜^[25], 可量性状的测量依据Kottelat和Freyhof^[26](图1), 统一采用对鱼体背部俯视方向的左侧进行计数与测量。可量性状数据的主成分分析在Past ver. 1.90软件^[27]中完成。为消除异速生长的影响, 可量性状数据进行对数转换(Log-transformed)并使用Burnaby方法进行校正^[28, 29]。

2 结果

2.1 序列特征

本研究使用的Cyt b序列长度为1140 bp, 变异位点470个、简约信息位点451个; RAG1序列长度为1446 bp, 变异位点230个、简约信息位点175个; MLH3序列长度2139 bp, 变异位点558个、简约信息位点419个; MSH6序列长度2118 bp, 变异位点398个、简约信息位点305个。GenBank登录号信息见表1。

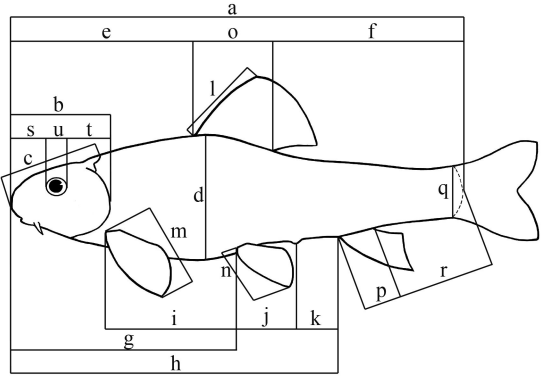


图1 可量性状示意图(参考Kottelat & Jorg^[26])

Fig. 1 The diagram of morphometric characters (referring to Kottelat & Jorg^[26])

a. 体长; b. 头长; c. 背侧头长; d. 体高; e. 背鳍前长; f. 背鳍后长; g. 腹鳍前长; h. 臀鳍前长; i. 胸腹鳍起点间距离; j. 腹鳍肛门起点间距离; k. 肛门臀鳍起点间距离; l. 背鳍长; m. 胸鳍长; n. 腹鳍长; o. 背鳍基长; p. 臀鳍基长; q. 尾柄高; r. 尾柄长; s. 吻长; t. 眼后头长; u. 眼径; v. 眼间距(图中未显示)

a. Standard length (SL); b. Head length (HL); c. Dorsal head length; d. Body depth; e. Pre-dorsal length; f. Post-dorsal length; g. Pre-pelvic length; h. Pre-anal length; i. Distance between pectoral- and pelvic-fin origins; j. Distance between pelvic-fin and anus origins; k. Distance between anus and anal-fin origins; l. Length of dorsal fin; m. Length of pectoral fin; n. Length of pelvic fin; o. Length of dorsal-fin base; p. Length of anal-fin base; q. Depth of caudal peduncle; r. Length of caudal peduncle; s. Snout length; t. Postorbital length; u. Eye diameter; v. Eye diameter (not shown in this figure)

表2 分子标记扩增使用的引物

Tab. 2 Primers for the amplification of molecular markers

基因 Gene	引物Primer (5'-3')	来源 Source
Cyt b	TCTTGCTCGGAYTTTAACCGAG	正向为本研究设计, 反向来自Hardman & Page ^[15]
	TAGTTTAGTTTAGAATTCTGGCTTTGG	
RAG1	CAGTAYCAYAAGATGTACCGTTGTGAGCYTCCATRAACT T	Kim & Bang ^[16]
MLH3	TAGACATAGAAGCCTGCAA	本研究
	TGGTTCRAGGCATATGTCAT	
	CGTGAGGGYCATTACAA	
MSH6	CCGCCATGTTTGTGACATC	本研究
	CAGACAGCCCTGTAAAC	
	GAGTACCCATGCTRTGGAT	
	AACCTTGAGATCCTTCAGAA	
	GAAGAGTCTCCTCATGCAGTC	

2.2 棒花鱼属鱼类的系统发育关系

基于线粒体细胞色素**b**基因重建的系统发育树(图2)和基于核基因多位点联合序列重建的系统发育树(图3)结果均显示棒花鱼与钝吻棒花鱼是单系种。拉林棒花鱼与辽宁棒花鱼是并系种,它们一起形成一单系群。基于线粒体细胞色素**b**基因与核基因多位点联合序列重建的系统发育树(图4)与*BEAST物种树(图5)树形一致。一般认为*BEAST物种树比基因多位点联合序列重建的系统发育树更能准确反映鱼类的系统发育关系^[30-32]。因此,以下仅描述*BEAST物种树揭示的结果。

*BEAST物种树(图5)揭示的广义棒花鱼属鱼类系统发育关系为: 拉林棒花鱼和辽宁棒花鱼嵌套在小鰾属鱼类内部, 它们一起形成一单系群(贝叶斯后验概率100%); 钝吻棒花鱼嵌套在片唇鲃属鱼类内部, 它们一起形成一单系群(贝叶斯后验概率93%), 钝吻棒花鱼与裸腹片唇鲃形成姊妹群关系(贝叶斯后验概率100%); 拉林棒花鱼+辽宁棒花鱼+钝吻棒花鱼+片唇鲃属+胡鲃属+小鰾属+琵琶鲃属鱼类一起形成一单系群(贝叶斯后验概率100%), 它们一起和棒花鱼形成姊妹群关系(贝叶斯后验概率100%)。

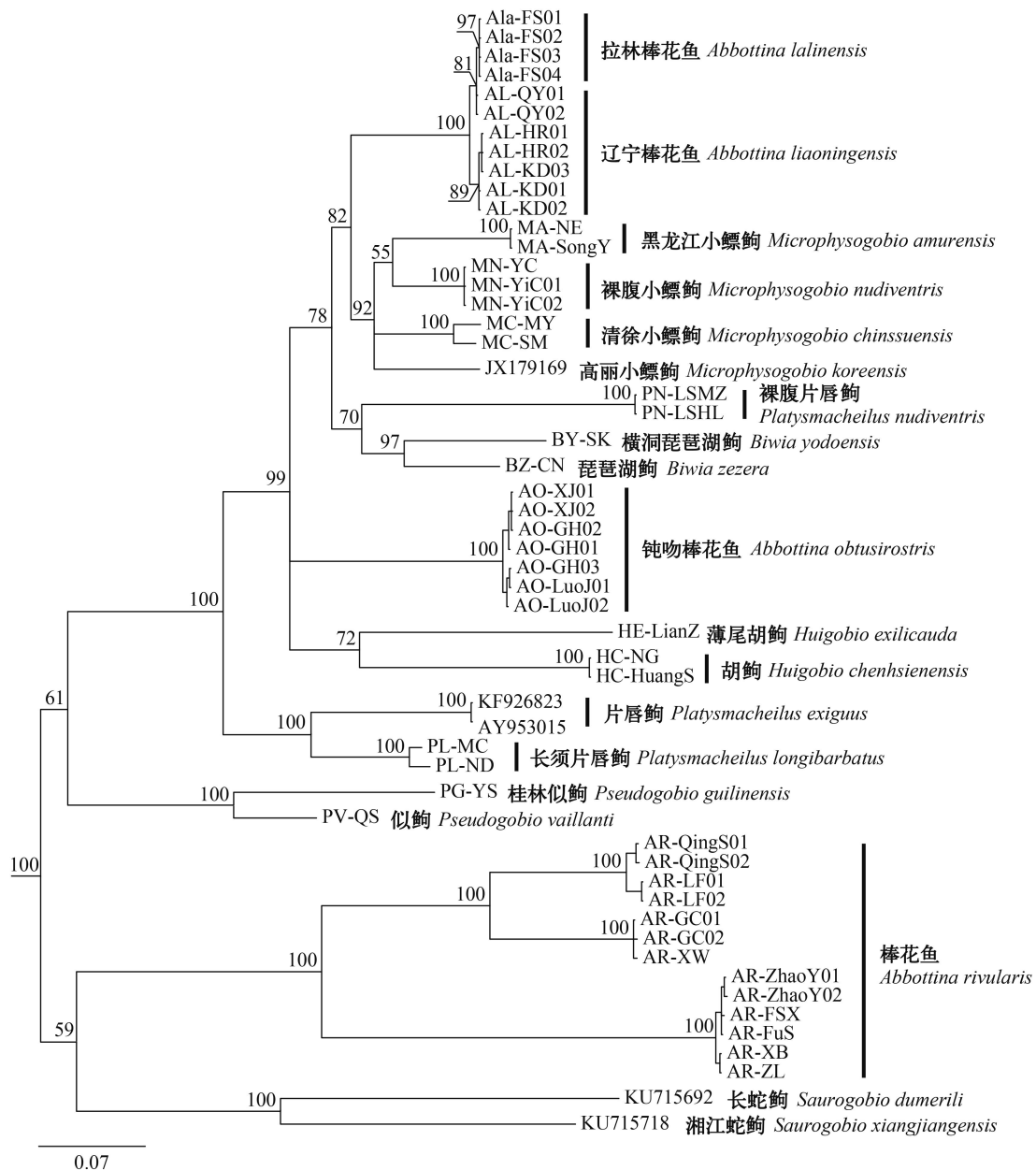


图2 基于Cyt *b*序列重建的棒花鱼属鱼类贝叶斯系统发育树

Fig. 2 Bayesian tree of *Abbottina* fishes based on Cyt *b* sequence

节点上方为贝叶斯后验概率, 外类群没有显示; 下同

Above nodes are Bayesian posterior probabilities, and outgroup taxa are not shown; the same applies below

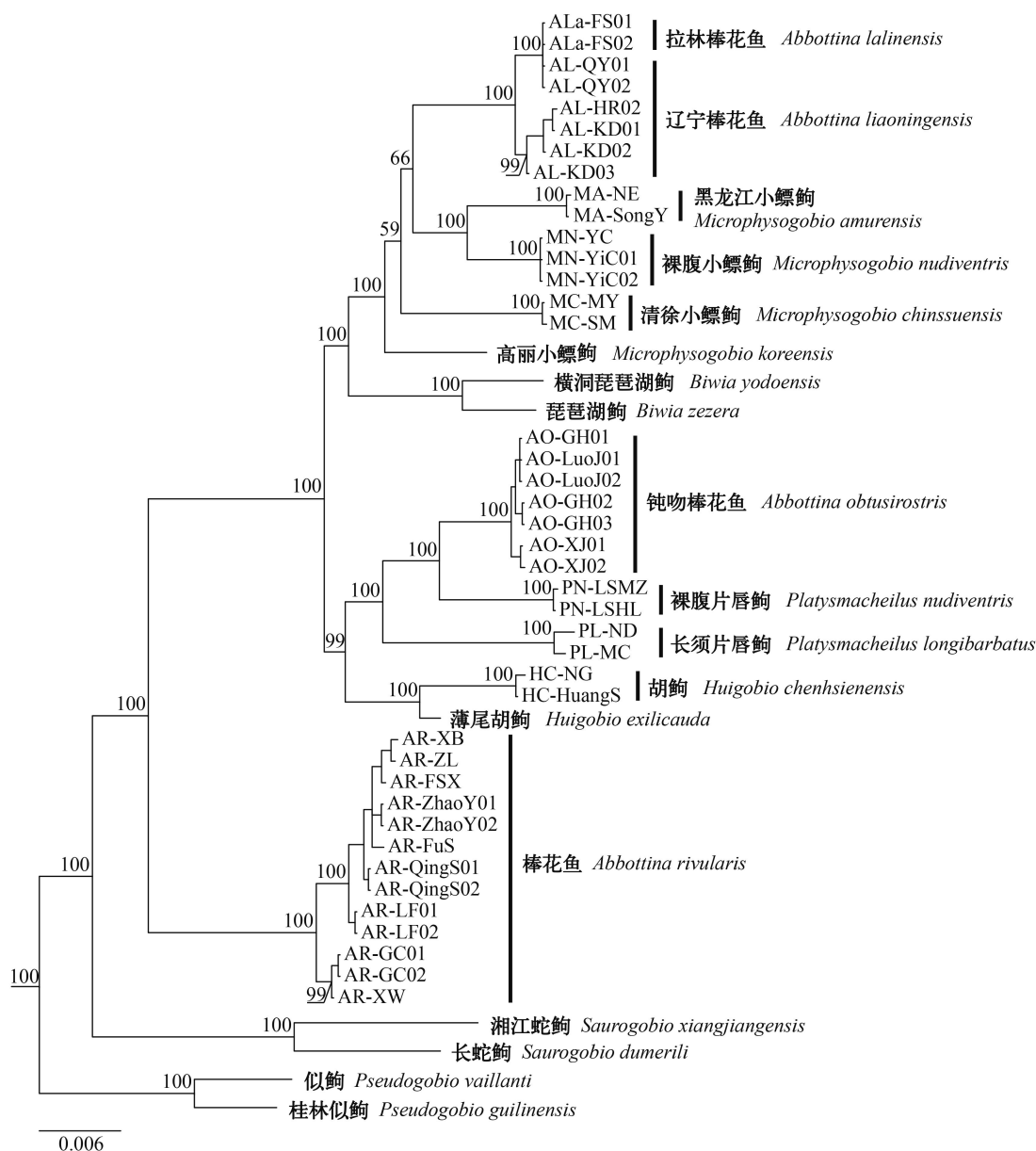


图3 基于核基因多位点联合序列重建的棒花鱼属鱼类贝叶斯系统发育树

Fig. 3 Bayesian tree of *Abbottina* fishes based on concatenated sequences of nuclear loci

2.3 辽宁棒花鱼与拉林棒花鱼的形态特征比较

辽宁棒花鱼与拉林棒花鱼的可数性状与可量性状见表3。结果表明两种鱼类可数性状与可量性状的每一个形态特征均相互重叠, 没有不连续的分。基于可量性状的主成分分析结果亦表明不支持把辽宁棒花鱼与拉林棒花鱼划分为两个形态群(图6)。

3 讨论

物种的进化谱系概念认为种是系统发育树中单系群所代表的集合种群^[33, 34]。最近涉及物种界定的分类与系统发育关系研究广泛地采纳物种的进化谱系概念^[35—37]。本研究基于线粒体与核基因

多位点重建的系统发育树(图2—4)显示拉林棒花鱼与辽宁棒花鱼一起形成单系群, 两者相互之间是并系关系。采纳物种的进化谱系概念, 本研究结果表明拉林棒花鱼与辽宁棒花鱼为同一物种, 进一步的形态特征分析支持它们是同种(表3、图6)。由于拉林棒花鱼新种发表于1987年4月^[38], 辽宁棒花鱼新种发表于1987年8月^[39]。基于动物命名法则的优先原则, 辽宁棒花鱼是拉林棒花鱼的同物异名。**Beast*物种树(图5)揭示拉林棒花鱼嵌套在小鲈属鱼类内部, 它们一起形成单系群。拉林棒花鱼的分类位置有待进一步全面的小鲈属鱼类系统发育关系研究后再确定。

Bănărescu和Nalbant^[6, 7]与Bănărescu^[8]将钝吻棒

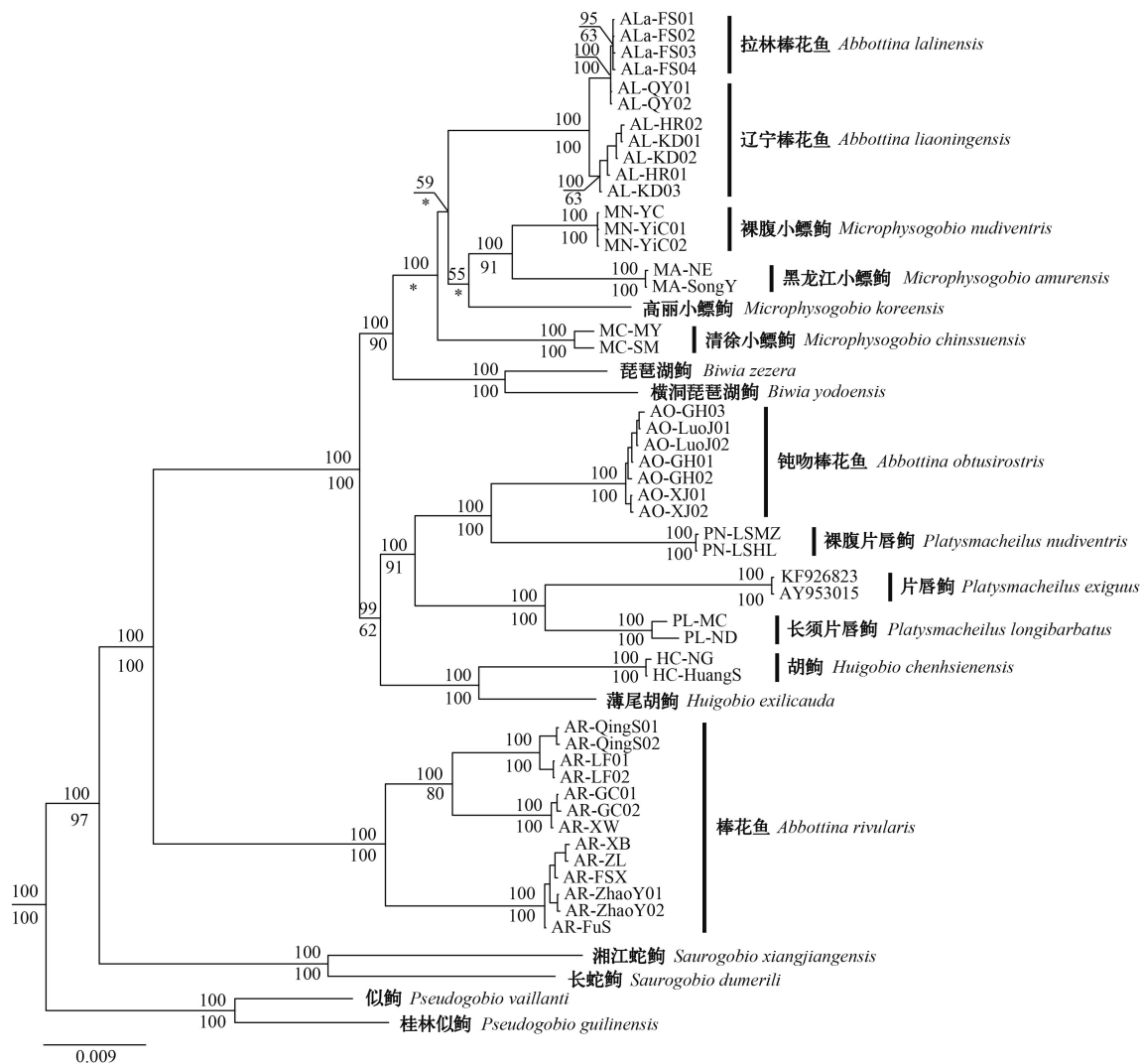


图4 基于Cyt *b*和核基因多位点联合序列重建的棒花鱼属鱼类贝叶斯系统发育树

Fig. 4 Bayesian tree of *Abbottina* fishes based on concatenated sequences of Cyt *b* and nuclear loci

节点上方为贝叶斯后验概率, 下方为最大似然法的自展支持度; “*”代表贝叶斯树和最大似然树不一致; 外类群没有显示

Above nodes are Bayesian posterior probabilities and below nodes are bootstrap confidences for Maximum Likelihood analyses. “*” indicate that the difference between Bayesian tree and Maximum Likelihood tree. Outgroup taxa are not shown

花鱼放在小鰾属, 而罗云林等^[9]和乐佩琦^[4]将钝吻棒花鱼放在棒花鱼属。本研究重建的系统发育树(图2—5)不支持他们各自的观点, 揭示了钝吻棒花鱼与裸腹片唇鲈的姊妹群关系, 支持它与其他片唇鲈属鱼类形成单系群。基于本研究的结果, 为了保持片唇鲈属鱼类作为单系群, 钝吻棒花鱼应校订为钝吻片唇鲈, 这将导致需要进一步的研究校订片唇鲈属的属征。

本研究重建的系统发育关系(图2—5)表明片唇鲈属+胡鲈属+琵琶鲈属+小鰾属鱼类一起是棒花鱼的姊妹群。这与先前使用形态证据^[11]或者多位点分子证据^[1]的研究结果一致。由于棒花鱼属的模式种是棒花鱼, 因此我们认为严格意义棒花鱼

属鱼类包括棒花鱼与平江棒花鱼(未取样)。先前研究描述的3个外部形态特征能很好地区分严格意义棒花鱼属鱼类与它的姊妹群^[4, 11, 40—42]: (1)“下唇侧叶在中叶前方是否相连”这个形态特征能区分严格意义棒花鱼属鱼类(下唇侧叶在中叶前方相连)与片唇鲈属+胡鲈属+琵琶鲈属+小鰾属鱼类(下唇侧叶在中叶前方不相连); (2)“口角须是否存在”这个形态特征能区分严格意义棒花鱼属鱼类(无口角须)与琵琶鲈属鱼类(有口角须); (3)“上下颌是否具有角质边缘”这个形态特征能区分严格意义的棒花鱼属鱼类(上下颌不具角质边缘)与片唇鲈属+胡鲈属+小鰾属鱼类(上下颌具角质边缘)。拉林棒花鱼与钝吻棒花鱼具有“下唇侧叶在中叶前方不相

表 3 辽宁棒花鱼与拉林棒花鱼的可数性状与可量性状

Tab. 3 Meristic and morphometric characters between *Abbottina liaoningensis* and *A. lalinensis*

可数性状与可量性状 Morphometrics and Meristics	辽宁棒花鱼 <i>Abbottina liaoningensis</i> (n=7)	拉林棒花鱼 <i>Abbottina lalinensis</i> (n=4)
背鳍Dorsal fin	iii-7 (7)	iii-7 (4)
胸鳍Pectoral fin	i-10 (6), i-11 (1)	i-10 (4)
腹鳍Pelvic fin	i-7 (7)	i-7 (4)
臀鳍Anal fin	iii-6 (7)	iii-6 (4)
侧线鳞Lateral-line scales	36 (1), 37 (5), 38 (1)	37 (4)
侧线上鳞Scales between lateral line and dorsal-fin origin	5 (7)	5 (4)
至腹鳍侧线下鳞Scales between lateral line and pelvic-fin origin	2 (4), 3 (3)	2 (2), 3 (2)
至臀鳍侧线下鳞Scales between lateral line and anal-fin origin	3 (7)	3 (4)
背鳍前鳞Pre-dorsal scales	10 (3), 11 (4)	10 (1), 11 (3)
围尾柄鳞Circumpeduncular scales	12 (7)	12 (4)
体长Standard length (mm)	41.2—51.3	36.4—59.4
体长的百分比Percent (%)		
头长Head length	23.2—25.7	24.2—25.1
背侧头长Dorsal head length	21.5—23.4	21.4—23.5
体高Body depth	17.8—23.2	18.5—20.9
背鳍前长Pre-dorsal length	41.8—45.6	43.7—44.3
背鳍后长Post-dorsal length	40.1—48.3	40.3—41.8
腹鳍前长Pre-pelvic length	51.1—55.5	51.1—53.7
臀鳍前长Pre-anal length	74.4—79.1	74.7—78.9
胸腹鳍起点间距离Distance between pectoral- and pelvic-fin origins	27.9—34.5	28.4—31.5
腹鳍肛门起点间距离Distance between pelvic-fin and anus origins	7.5—9.0	8.3—9.5
肛门臀鳍起点间距离Distance between anus and anal-fin origins	14.3—17.8	14.7—17.6
背鳍长Length of dorsal fin	22.8—28.7	25.0—26.4
胸鳍长Length of pectoral fin	19.8—26.4	21.9—25.0
腹鳍长Length of pelvic fin	15.4—20.0	16.7—18.5
背鳍基长Length of dorsal-fin base	13.4—16.0	15.0—15.4
臀鳍基长Length of anal-fin base	7.4—8.7	7.6—8.5
尾柄高Depth of caudal peduncle	7.6—10.9	8.4—9.3
尾柄长Length of caudal peduncle	13.8—16.1	13.8—14.0
头长的百分比Percent (%)		
吻长Snout length	29.7—33.6	29.0—31.2
眼后头长Postorbital length	33.6—38.6	36.5—40.9
眼间距Interorbital width	22.2—27.8	22.7—31.6
眼径Eye diameter	31.0—36.0	30.1—32.4

注: 显示可数性状的记数(括号中是个体数)和可量性状的测量范围

Note: The count of meristic characters (individual numbers in bracket) and the range of morphometric characters were shown

连”以及“上下颌具角质边缘”两个形态特征, 表明它们不属于严格意义棒花鱼属鱼类。

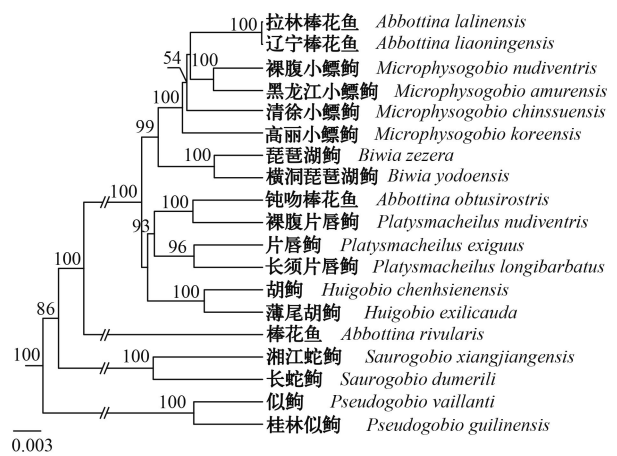


图 5 基于Cyt b和核基因多位点重建的棒花鱼属鱼类*BEAST物种树

Fig. 5 *BEAST species tree of *Abbottina* fishes based on Cyt b and nuclear loci

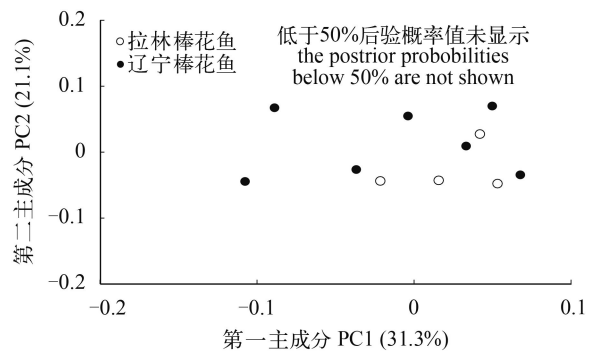


图 6 拉林棒花鱼和辽宁棒花鱼的第一与第二主成分得分散点图

Fig. 6 Scatter plots of scores on the first and second principal components of *Abbottina lalinensis* and *A. liaoningensis*

综上所述, 棒花鱼属鱼类包括棒花鱼和平江棒花鱼; 确认辽宁棒花鱼是拉林棒花鱼的同物异名, 后者的分类位置有待进一步校订; 揭示钝吻棒花鱼应该归入片唇鲃属, 并校订为钝吻片唇鲃。本研究厘定了棒花鱼属鱼类的分类, 为后续进一步解析鲃亚科鲃族鱼类的系统发育关系与生物地理学研究奠定了基础。

参考文献:

- [1] Tang K L, Agnew M K, Chen W J, *et al.* Phylogeny of the gudgeons (Teleostei: Cyprinidae: Gobioninae) [J]. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2011, **61**(1): 103—124
- [2] Jiang Z G, Zhang E. Molecular evidence for taxonomic status of the gudgeon genus *Huigobio* Fang, 1938 (Teleostei: Cypriniformes), with a description of a new species from Guangdong Province, South China [J]. *Zootaxa*,

- 2013, **3731**(1): 171—182
- [3] Eschmeyer W N, Fricke R, Van der Laan R. Catalog of Fishes: Genera, Species, References, <http://researcharchive.calacademy.org/research/ichthyology/catalog/fishcatmain.asp>, accessed 2016.04.15
- [4] Yue P Q. *Abbottina* Jordan *et* Fowler, 1903 [A]. In: Chen Y Y (Eds.), Fauna Sinica, Osteichthyes, Cypriniformes (II) [C]. Beijing: Science Press. 1998, 347—353 [乐佩琦. 棒花鱼属. 见: 陈宜瑜, 中国动物志硬骨鱼纲鲤形目(中卷). 北京: 科学出版社. 1998, 347—353]
- [5] Xie Y H. *Abbottina* Jordan *et* Fowler, 1903 [A]. In: Xie Y H (Eds.), Freshwater Fishes in Northeast Region of China [C]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press. 2007, 194—198 [解玉浩. 棒花鱼属. 见: 解玉浩, 东北地区淡水鱼类. 沈阳: 辽宁科学技术出版社. 2007, 194—198]
- [6] Bănărescu P, Nalbant T T. Some New Chinese Minnows (Pisces, Cypriniformes) [J]. *Proceedings of the Biological Society of Washington*, 1968, **81**: 335—342
- [7] Bănărescu P, Nalbant T T. Pisces, Teleostei, Cyprinidae (Gobioninae) [M]. Das Tierreich, Lieferung 93, Berlin: Walter de Gruyter. 1973, 1—304
- [8] Bănărescu P. A critical updated checklist of Gobioninae (Pisces, Cyprinidae) [J]. *Travaux du Muséum National d'Histoire Naturelle "Grigore Antipa"*, 1992, **32**: 303—330
- [9] Luo Y L, Yue P Q, Chen Y Y. *Abbottina* Jordan *et* Fowler, 1903 [A]. In: Wu X W (Eds.), Fauna of Cyprinidae in China (II) [C]. Shanghai: Shanghai People's Publishing House. 1977, 516—529 [罗云林, 乐佩琦, 陈宜瑜. 棒花鱼属. 见: 伍献文, 中国鲤科鱼类志(下卷). 上海: 上海人民出版社. 1977, 516—529]
- [10] Hosoya K. Interrelationships of the Gobioninae (Cyprinidae) [A]. In: Uyeno T, Arai T, Taniuchi T, *et al.* (Eds.), Indo-Pacific Fish Biology: Proceeding of the Second International Conference on Indo-Pacific Fishes [C]. Tokyo: The Ichthyological Society of Japan. 1986, 484—501
- [11] Yu L R, Yue P Q. Studies on phylogeny of the *Pseudogobiini* fishes (Cypriniformes: Cyprinidae) [J]. *Acta Zootaxonomica Sinica*, 1996, **21**(2): 244—255 [俞利荣, 乐佩琦. 似鲟类鱼类的系统发育研究(鲤形目: 鲤科). 动物分类学报, 1996, **21**(2): 244—255]
- [12] Yang J Q, He S P, Freyhof J, *et al.* The phylogenetic relationships of the Gobioninae (Teleostei: Cyprinidae) inferred from mitochondrial cytochrome *b* gene sequences [J]. *Hydrobiologia*, 2006, **553**(1): 255—266
- [13] Liu H Z, Yang J Q, Tang Q Y. Estimated evolutionary tempo of East Asian gobionid fishes (Teleostei: Cyprinidae) from mitochondrial DNA sequence data [J]. *Hydrobiologia*, 2010, **55**(15): 1502—1510
- [14] Miller S A, Dykes D D, Polesky H F. A simple salting out procedure for extracting DNA from human nucleated cells [J]. *Nucleic Acids Research*, 1988, **16**(3): 12—15
- [15] Hardman M, Page L M. Phylogenetic relationships among bullhead catfishes of the Genus *Ameiurus* (Siluriformes: Ictaluridae) [J]. *Copeia*, 2003, **2003**(1): 20—33
- [16] Kim K Y, Bang I C. Molecular phylogenetic position of *Abbottina springeri* (Cypriniformes, Cyprinidae) based on nucleotide sequences of *RAG1* gene [J]. *Korean Journal of Ichthyology*, 2010, **22**(4): 273—278
- [17] Xia X H. DAMBE5: A comprehensive software package for data analysis in molecular biology and evolution [J]. *Molecular Biology and Evolution*, 2013, **30**(7): 1720—1728
- [18] 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 Research*, 1997, **25**(25): 4876—4882
- [19] Tamura K, Stecher G, Peterson D, *et al.* MEGA6: Molecular evolutionary genetics analysis version 6.0 [J]. *Molecular Biology and Evolution*, 2013, **30**(12): 2725—2729
- [20] Darriba D, Taboada G L, Doallo R, *et al.* jModelTest 2: more models, new heuristics and parallel computing [J]. *Nature Methods*, 2012, **9**(9): 772
- [21] Ronquist F, Teslenko M, Van der Mark P, *et al.* MrBayes 3.2: Efficient Bayesian phylogenetic inference and model choice across a large model space [J]. *Systematic Biology*, 2012, **61**(3): 539—542
- [22] Stamatakis A. RAXML-VI-HPC: maximum likelihood-based phylogenetic analyses with thousands of taxa and mixed models [J]. *Bioinformatics*, 2006, **22**(21): 2688—2690
- [23] Bouckaert R, Heled J, Kuhnert D, *et al.* BEAST 2: A software platform for bayesian evolutionary analysis [J]. *PLoS Computational Biology*, 2014, **10**(4): 1—6
- [24] Rambaut A, Drummond A. Tracer v1.5. 2007. Available at: <http://tree.bio.ed.ac.uk/software/tracer>
- [25] Chen Y Y. Fauna Sinica, Osteichthyes, Cypriniformes (II) [M]. Beijing: Science Press. 1998, 16—18 [陈宜瑜. 中国动物志硬骨鱼纲鲤形目(中卷). 北京: 科学出版社. 1998, 16—18]
- [26] Kottelat M, Freyhof J. Handbook of European freshwater fishes [M]. Delémont: Imprimerie du Démocrate SA. 2007, 15—16
- [27] Hammer Ø, Harper D A T, Ryan P D. Past: Paleontological statistics software package for education and data analysis [J]. *Palaeontologia Electronica*, 2001, **4**(1): 9
- [28] Burnaby T P. Growth-invariant discriminant functions and generalized distances [J]. *Biometrics*, 1966, **22**(1): 96—110
- [29] Rolf F J, Bookstein F L. A comment on shearing as a method for 'size correlation' [J]. *Systematic Zoology*, 1987, **36**(4): 356—367
- [30] Waters J M, Rowe D L, Burrige C P. Gene trees versus species trees: reassessing life-history evolution in a freshwater fish radiation [J]. *Systematic Biology*, 2010, **59**(5):

504—517

- [31] Fu C Z, Guo L, Xia R. A multilocus phylogeny of Asian noodlefishes Salangidae (Teleostei: Osmeriformes) with a revised classification of the family [J]. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2012, **62**(3): 848—855
- [32] Xia R, Durand J D, Fu C Z. Multilocus resolution of Mugilidae phylogeny (Teleostei: Mugiliformes): Implications for the family's taxonomy [J]. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2016, **96**: 161—177
- [33] De Queiroz K. Species concepts and species delimitation [J]. *Systematic Biology*, 2007, **56**(6): 879—886
- [34] Wiens J J. Species delimitation: new approaches for discovering diversity [J]. *Systematic Biology*, 2007, **56**(6): 875—878
- [35] Chen H, Polgar G, Fu C Z, *et al.* Cryptic species and evolutionary history of *Boleophthalmus pectinirostris* complex along the northwestern Pacific coast [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2014, **38**(1): 75—86 [陈卉, Polgar G, 傅萃长, 等. 西北太平洋海岸带大弹涂鱼复合体的隐存种与进化历史. 水生生物学报, 2014, **38**(1): 75—86]
- [36] Hedin M. High-stakes species delimitation in eyeless cave spiders (Cicurina, Dictynidae, Araneae) from central Texas [J]. *Molecular Ecology*, 2015, **24**(2): 346—361
- [37] Karanovic T, Djurakic M, Eberhard S M. Cryptic Species or Inadequate Taxonomy? Implementation of 2D Geometric Morphometrics Based on Integumental Organs as Landmarks for Delimitation and Description of Copepod Taxa [J]. *Systematic Biology*, 2016, **65**(2): 304—327
- [38] Huang Z H, Li Z P. A new species of *Abbottina*: *Abbottina lalinensis* (Cyprinidae: Gobioninae) [J]. *Heilongjiang Fisheries*, 1987, **1**: 7—10 [黄智弘, 李再培. 棒花鱼属一新种: 拉林棒花鱼(鲤科: 鲈亚科). 黑龙江水产, 1987, **1**: 7—10]
- [39] Qin K J. *Abbottina* Jordan *et* Fowler, 1903 [A]. In: Liu C X, Qin K J (Eds.), *Fauna Sinica (Pisces)* [C]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press. 1987, 167—171 [秦克静. 棒花鱼属. 见: 刘蝉馨, 秦克静, 辽宁动物志(鱼类). 沈阳: 辽宁科学技术出版社. 1987, 167—171]
- [40] Kim I, Yang H. A Revision of the Genus *Microphysogobio* in Korea with Description of a New Species (Cypriniformes, Cyprinidae) [J]. *Korean Journal of Ichthyology*, 1999, **11**(1): 1—11
- [41] Nguyen V H, Ngo S V. Freshwater fishes of Viet Nam, Volume I, Family Cyprinidae [M]. Vietnam: Nha Xuat Ban Nong Nghiep. 2001, 1—622
- [42] Kawase S, Hosoya K. *Biwia yodoensis*, a new species from the Lake Biwa / Yodo River Basin, Japan (Teleostei: Cyprinidae) [J]. *Ichthyological Exploration of Freshwaters*, 2010, **21**(1): 1—7

TAXONOMY AND PHYLOGENETIC RELATIONSHIPS OF THE GENUS *ABBOTTINA* FISHES IN THE SUBFAMILY GOBIONINAE

HE Huan, LI Yu-Huo, CAO Kai, LI Ming-Yue and FU Cui-Zhang

(Ministry of Education Key Laboratory for Biodiversity Science and Ecological Engineering, Institute of Biodiversity Science and School of Life science, Fudan University, Shanghai 200438, China)

Abstract: Taxonomy and phylogeny of the genus *Abbottina* fishes in the subfamily Gobioninae (Cypriniformes: Cyprinidae) remain unresolved. The current study utilized mitochondrial gene (cytochrome *b*) and nuclear loci (*RAG1*, *MLH3* and *MSH6*) as molecular markers to reconstruct phylogenetic relationships of *Abbottina* fishes, and revised their classification by merging morphological evidence. The results showed that *Abbottina rivularis* and *A. obtusirostris* were monophyletic species. *Abbottina lalinensis* and *A. liaoningensis* were paraphyletic species, which formed a monophyletic group. *Abbottina lalinensis*+*A. liaoningensis* were nested within *Microphysogobio* fishes, and *Abbottina obtusirostris* was nested within *Platysmacheilus* fishes. *Abbottina lalinensis*+*A. liaoningensis*+*A. obtusirostris*+*Platysmacheilus*+*Huigobio*+*Microphysogobio*+*Biwia* fishes formed a monophyletic group, which were a sister taxon of *Abbottina rivularis*. Meristic and morphometric characters did not separate *Abbottina lalinensis* from *A. liaoningensis*. The molecular evidence and morphological evidence demonstrated that the genus *Abbottina* fishes include *Abbottina rivulari* and *A. binhi* (un-sampling in this study), and that *Abbottina liaoningensis* was a junior synonym of *A. lalinensis*, which needs further revision; and *Abbottina obtusirostris* was revised as *Platysmacheilus obtusirostris*.

Key words: Cyprinidae; Gobioninae; *Abbottina*; *Platysmacheilus*; *Microphysogobio*; Phylogeny