

额尔齐斯河流域湖拟鲤寄生指环虫 ——中国分布新记录种十字花指环虫

刘彦君 魏念文 穆妮热·喀迪尔 冯龙基 岳城 郝翠兰*

新疆农业大学动物医学学院 乌鲁木齐 830052

摘要: 2021年7月在额尔齐斯河哈巴河河段于湖拟鲤 (*Rutilus rutilus lacustris*) 鳃部发现有指环虫寄生。进行形态比较,发现其形态与国内记载寄生于湖拟鲤的指环虫差异明显:本研究采集虫体的交接管基部膨大呈“8”字形,随后管径均匀,延伸呈弯曲状,形似“6”形;中央大钩内突长超过外突长,背连接片呈“一”字型且中部弯曲,腹联结片呈蝶形。与已报道指环虫形态数据比较,本研究采集的虫体偏小,其后吸器与 *Dactylogyrus caballeroi* 的形态最为接近,但交接器不同;与其余指环虫相比,十字花指环虫 (*D. crucifer*) 的腹联结片呈蝶形,而极小指环虫 (*D. rarissimus*) 呈倒“T”字型,湖拟鲤指环虫 (*D. rutili*) 呈“十”字型,双髻指环虫 (*D. sphyrna*) 和维氏指环虫 (*D. vistulae*) 没有腹联结片。在背联结片形态中,十字花指环虫 (*D. crucifer*) 呈现“一”字型,而维氏指环虫呈“V”字型。本研究所采集的虫体结构特征明显不同于国内已记载寄生在湖拟鲤上的双髻指环虫、维氏指环虫和湖拟鲤指环虫,而与俄罗斯记载的寄生于湖拟鲤鳃部的十字花指环虫形态高度相似。28S rDNA 基因比对结果与形态鉴定结果基本一致。综合鉴定结果,最终鉴定该虫为指环虫属十字花指环虫。经查阅文献后,确定该虫为中国分布新记录种。

关键词: 额尔齐斯河; 湖拟鲤; 指环虫; 分布新记录种

中图分类号: Q959 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2023) 04-579-11

Dactylogyrus crucifer, A New Record From *Rutilus rutilus lacustris* in Irtysh River, China

LIU Yan-Jun WEI Nian-Wen Munira KADIR FENG Long-Ji YUE Cheng HAO Cui-Lan*

College of Veterinary Medicine, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

Abstract: [Objectives] This paper reported a new geographical record of the genus *Dactylogyrus* on the gills of *Rutilus rutilus lacustris* from Irtysh River (Haba River section) investigation of fish parasites in July 2021. **[Methods]** Based on careful morphological comparison with those relevant species, significant differences in

基金项目 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目 (No. 2021D01B56), 2022 年新疆农业大学研究生科研创新计划项目 (No. XJAUGRI2022007);

* 通讯作者, E-mail: haocuilan@126.com;

第一作者介绍 刘彦君, 女, 硕士研究生; 研究方向: 预防兽医学; E-mail: 837250431@qq.com.

收稿日期: 2022-11-10, 修回日期: 2023-04-14 DOI: 10.13859/j.cjz.2023040010

the copulatory complex and the opisthaptor of the parasite were observed. **[Results]** In copulatory complex, the parasite has an “8” structure at the base of the tube. Then the diameter of the tube is uniform. The tube extended in a curved shape resembling “6”. About the opisthaptor, the parasite’s inner root of anchor was longer than the length of the outer root, with seven pairs of small marginal hooks. And this *Dactylogyrus* has the “—”-shaped dorsal bar and a butterfly-shaped ventral bar (Fig. 1, 2). The characteristic structure of this parasite differs from other *Dactylogyrus* that parasitic *Rutilus rutilus lacustris* in China (Appendix 2). The parasite in this study is small. Compared with *D. caballeroi*, the morphology of the opisthaptor of the two insects was most similar, but the morphology of the copulatory complex of the two was very different. In comparison with the rest of *Dactylogyrus* spp, the parasite has a butterfly-shaped ventral bar, *D. rarissimus* has an inverted “T”-shaped ventral bar, and *D. rutili* has a “十”-shaped ventral bar. However, *D. sphyrna* and *D. varius* have no ventral bar. In the dorsal bar morphology, *D. crucifer* showed a “—”-shape, while the dorsal bar of *D. varius* had a “V” shape. After comparison, the morphology of the parasite was highly similar to that of *D. crucifer*, recorded in Russia. The Bayesian inference and maximum likelihood trees constructed based on the 28S rDNA gene fragments showed that the *D. crucifer* in this study clustered with *D. crucifer* in Czech Republic (100/100) (Fig. 3). **[Conclusion]** The results were combined and the insect was identified as *D. crucifer* Wagener, 1857, a new record species of *Dactylogyrus* in China.

Key words: Irtysh River; *Rutilus rutilus lacustris*; Dactylogyridae; New record species

湖拟鲤 (*Rutilus rutilus lacustris*) 隶属于鲤形目鲤科雅罗鱼亚科拟鲤属, 因其虹膜呈橘红色, 俗称“小红眼”, 是新疆土著经济鱼类之一。目前已知湖拟鲤主要分布于欧洲, 亚洲东部见于俄罗斯西伯利亚鄂毕河至勒拿河以及我国新疆额尔齐斯河和博斯腾湖等地 (郭焱 2012)。额尔齐斯河是中国唯一一条自东向西流向北冰洋的国际河流, 源起于中国新疆富蕴县阿尔泰山, 与喀拉额尔齐斯河、布尔津河、哈巴河等支流一起向西北奔流出中国 (任慕莲等 2002)。该河流域地理、气候复杂, 水系组成繁多, 孕育了一批特殊的冷水鱼类。近年来文献记载湖拟鲤鳃部寄生多种单殖吸虫, 其中指环虫感染较多 (赵江山等 2011, 郝翠兰等 2013, 王新等 2014)。指环虫 (*Dactylogyrus*) 隶属于单殖吸虫纲 (Monogenea) 指环虫目 (Dactylogyridea) 指环虫科 (Dactylogyridea), 该类群物种丰富, 数量庞大, 多以鲤科鱼类为宿主, 主要寄生于鱼类鳃部, 具有一定宿主特异性 (Gibson et al 1996)。指环虫大量寄生时常引起鱼鳃肿胀, 致使宿主鱼呼吸困难, 严重

感染时会造成宿主鱼大批死亡 (吴宝华等 2000)。

2021 年 7 月本科研团队在额尔齐斯河哈巴河河段进行野外调查时, 在湖拟鲤鳃部发现一种指环虫, 其形态与国内已公布寄生该鱼指环虫形态差异较大, 如双髻指环虫 (*Dactylogyrus sphyrna*)、维氏指环虫 (*D. vistulae*)、湖拟鲤指环虫 (*D. rutili*) 和多小枝指环虫 (*D. ramulosus*) 等。本文通过形态特征和分子数据比对, 对该虫进行详细鉴定和描述。希望研究结果丰富我国指环虫物种记录并为后续研究提供基础数据。

随着分子技术的发展, 采用分子生物学方法进行物种鉴定 (白俊萍 2013, 郭苗 2019), 揭示遗传演化 (张娟 2011, 范丽仙 2018) 及物种亲缘关系 (丁雪娟等 2005, 翟凯旋等 2021) 的研究逐步增多。形态学与分子生物学方法相结合, 为单殖吸虫鉴定分类提供更加可靠的依据。本研究选取 28S rDNA 基因片段作为构建系统发育的分子标记, 用于检获虫体的分子发育分析。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2021年7月在额尔齐斯河流域哈巴河河段捕获165尾湖拟鲤,处死后,在24 h内取其新鲜鳃部放置于解剖镜下观察并收集虫体。将虫体置于生理盐水冲洗干净后分别固定保存于75%和95%酒精中,用于后续实验。

1.2 样品鉴定与测量

取保存于75%酒精中的完整虫体,经复水后,置于干净载玻片上,滴加4%聚乙烯醇-乳酸酚染液,制作染色封片(伍惠生 1980)。在Nikon E2000光学显微镜下观察样品虫体形态,利用EZ-MET软件拍照并测量样品虫体形态数据并记录其特征性结构,即虫体的后吸器和交接器中的几丁质结构。样品虫体特征性结构与文献中相关虫种相比较(Gussev 1985, 吴宝华等 2000),进行形态学鉴定。所制虫体标本保存于新疆农业大学动物医学学院寄生虫学教研室。

1.3 DNA提取及扩增

取保存于95%酒精中的虫体样品后,放置于TE buffer (pH 8.0)溶液过夜处理,以去除虫体残留酒精。选用常规基因组DNA纯化试剂盒[北京全式金生物技术(TransGen Biotech)股份有限公司]并依据说明书提取虫体总DNA。使用上游引物C1(5'-ACC CGC TGA ATT TAA GCA T-3')和下游引物D2(5'-TGG TCC GTG TTT CAA GAC-3')扩增核糖体28S rDNA基因片段(Hassouna et al. 1984)。PCR反应体系为25 μ l: 2 $\times$ EasyTaq PCR Super Mix 12.5 μ l, 上下游引物各1 μ l (1 μ mol/L), DNA模板2 μ l (10 mg/L), dd H₂O 8.5 μ l。PCR反应条件为: 94 $^{\circ}$ C预变性5 min; 94 $^{\circ}$ C变性1 min, 56 $^{\circ}$ C退火1 min, 72 $^{\circ}$ C延伸1 min, 35次循环; 75 $^{\circ}$ C延伸5 min, 终止于4 $^{\circ}$ C。PCR产物经1%琼脂糖凝胶电泳检测后,将带有清晰目标条带的PCR产物送于生工生物工程(上海)股份有限公司测序。测序结果经BLAST和DNAMAN进行比对,所得序列上传至

GenBank。

1.4 分子系统发育分析

选取鲤科41种与湖拟鲤关系较近鱼类鳃部寄生的指环虫,以古氏虫属的*Gussevia asota*为外类群,与本研究物种进行系统发育分析,用于分子系统发育分析的物种信息见附录1。使用Clustal W (Larkin et al. 2007)和MAFFT (Katoh et al. 2002)对序列进行比对。在MEGA 7.0.20 (Kumar et al. 2016)软件计算序列中碱基含量及变异情况,选用K2P模型(kimura-2-parameter model)计算各物种间遗传距离。利用贝叶斯法(Bayesian inference, BI)和最大似然法(maximum likelihood, ML)构建系统发育树,使用ModelFinder进行最小化信息量准则(Akaike information criterion, AIC)检验,选择最优模型分别为JC和GTR。通过PhyloSuite v1.2.2(Zhang et al. 2020)中MrBayes v3.2.6构建贝叶斯树,位点间变异模型为gamma (rates = gamma),运行1 000 000代蒙特卡罗模拟(markov chain monte carlo, MCMC),每1 000代取样1次,各分支的置信度以后验概率(posterior probability)来表示。使用PhyloSuite v1.2.2中IQ tree v1.6.8构建最大似然树,用自展值(bootstrap)进行检验,10 000次重复取样。输出结果在Figtree v1.4.3展示和Adobe Illustrator 2020中美化修饰。

2 形态鉴定

形态描述和测量数据基于7个虫体形态标本(图1, 2, 附录2)。成虫形态: 小型虫体,外形似叶片状左右对称,体长(0.347 ± 0.047) mm,体宽(0.086 ± 0.028) mm。虫体头器具有3对头腺,两对眼点。交接器位于虫体中上部,由交接管和支持器构成。交接管起始部分沿管轴突出呈“8”字形膨大,形似“十字花”。交接管总体呈中空管状,弯曲形似“6”状。随后管径大小均匀,最大宽度为(0.002 ± 0.000) mm。支持器与交接管基部相连,其基部膨大呈条状,向上扭转,并附着一个钩状物。未见

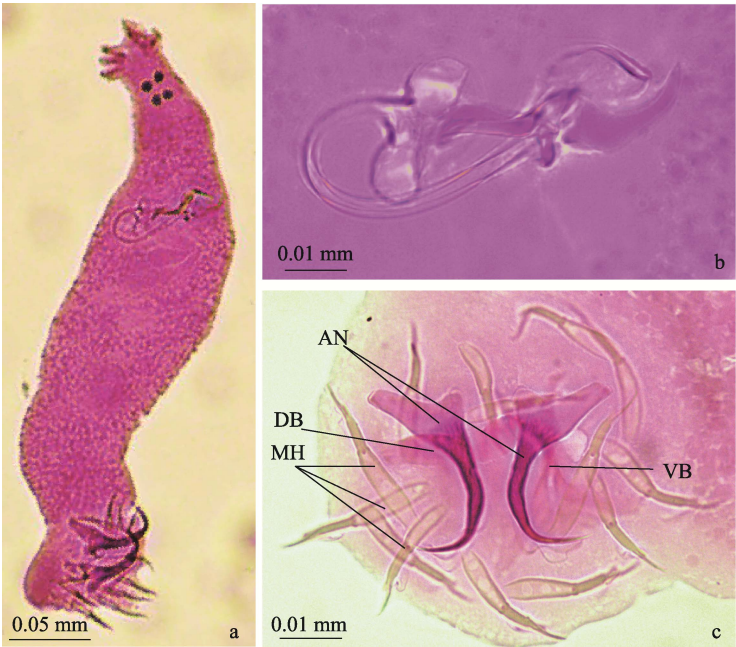


图 1 十字花指环虫的显微照片 (单位: mm)

Fig. 1 Morphological light micrographs of *Dactylogyrus crucifer* (Unit: mm)

a. 虫整体; b. 交接器几丁质结构; c. 后吸器几丁质结构。AN. 中央大钩; DB. 背联结片; MH. 边缘小钩; VB. 腹联结片
a. Whole worm; b. Copulatory organ; c. Opisthaptor. AN. Anchor; DB. Dorsal bar; MH. Marginal hook; VB. Ventral bar

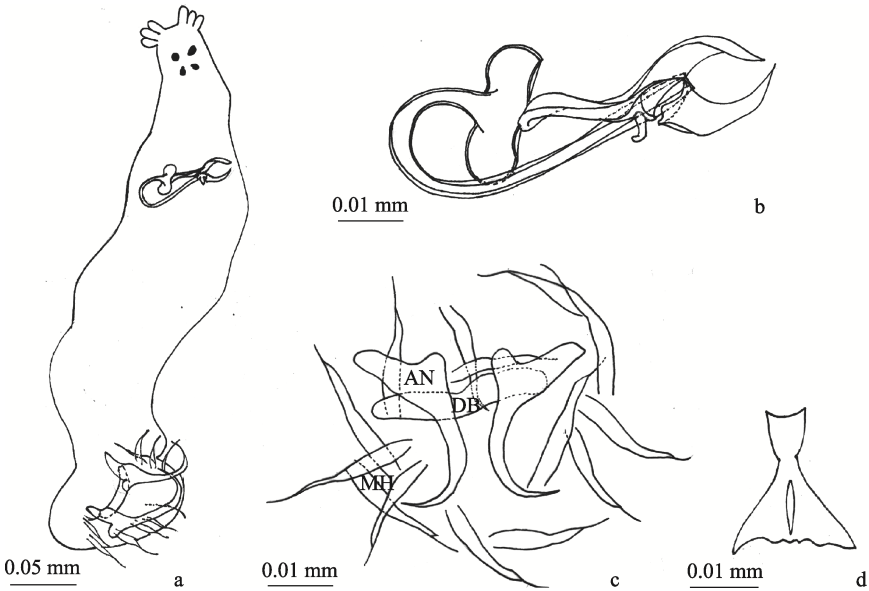


图 2 十字花指环虫的外形及重要结构

Fig. 2 Morphology of *Dactylogyrus crucifer* and its characteristic structures

a. 整虫; b. 交接器几丁质结构; c. 后吸器几丁质结构; d. 腹联结片。AN. 中央大钩; DB. 背联结片; MH. 边缘小钩
a. Whole worm; b. Copulatory organ; c. Opisthaptor; d. Ventral bar. AN. Anchor; DB. Dorsal bar; MH. Marginal hook

阴道。后吸器在虫体末端，由一对中央大钩、七对边缘小钩、一个背联结片和一个腹联结片组成。中央大钩全长（ 0.038 ± 0.001 ）mm，其基部粗壮较短，长（ 0.031 ± 0.001 ）mm，而钩尖细长，长（ 0.011 ± 0.001 ）mm，内突长（ 0.014 ± 0.002 ）mm，外突长（ 0.006 ± 0.001 ）mm；背联结片呈“一”字型，两端微膨大钝圆，中部弯曲，长（ 0.020 ± 0.019 ）mm，宽（ 0.003 ± 0.003 ）mm；腹联结片上窄下宽，中部缩小，中下部有孔洞，下部边缘呈波浪状，最大长度（ 0.025 ± 0.004 ）mm，最大宽度（ 0.028 ± 0.007 ）mm。

基于形态数据，本研究虫体与已报道寄生湖拟鲤的指环虫进行比较（附录 2）。本研究物种与 Gussev 等（1985）记录的十字花指环虫的交接器和后吸器形态基本一致，初步鉴定为十字花指环虫。本研究采集的十字花指环虫分别与维氏指环虫、双髻指环虫、极小指环虫（*D. rarissimus*）、湖拟鲤指环虫和 *D. caballeroi* 进行比较。十字花指环虫在 5 种指环虫中体型中偏小，其中维氏指环虫体型最大，其次是双髻指环虫、*D. caballeroi* 和拟鲤指环虫，极小指环虫体型最小（Gussev 1985，吴宝华等 2000，赵江山等 2011，郝翠兰 2014）。十字花指环虫与 *D. caballeroi* 的后吸器形态最为接近，但二者交接器明显不同，前者的交接管弯曲呈“6”字形且基部膨大形似“8”字形，而后的交接

管折叠后形成直管且基部膨大。与其余 4 种指环虫相比，十字花指环虫的交接器和后吸器存在明显不同。

3 分子鉴定

扩增获得的指环虫 28S rDNA 片段总长度 843 bp（GenBank 登录号为 ON455686），A、T、G、C 碱基的平均含量为 21.95%、27.88%、28.94%和 21.23%，A + T 含量低于 G + C 含量。基于 8 条亲缘关系相近的指环虫序列进行多重比对、校正，序列最终长度为 793 bp，其中保守位点 711 个，变异位点 81 个，简约信息位点 31 个，以及 50 个自裔位点。扩增本研究虫体 28S rDNA 序列，经 BLAST 和 DNAMAN v9.0.1.116 比对后，与捷克拟鲤（*Rutilus rutilus*）寄生的十字花指环虫（GenBank 登录号：KY629374）同源性达 100%。

基于 K2P 模型计算遗传距离矩阵显示，本研究获得的指环虫 28S rDNA 序列与已公布的十字花指环虫的遗传距离为 0.000（表 1），与其余指环虫的遗传距离为 0.003 ~ 0.232。本研究采集虫与同属宿主的 5 种指环虫种间遗传距离为 0.003 ~ 0.045，其中本研究采集虫与 *D. caballeroi*（0.003）和 *D. rarissimus*（0.010）遗传距离较近，与双髻指环虫（0.040）和维氏指环虫（0.045）遗传距离较远，与拟鲤指环虫的

表 1 寄生于鲤科鱼类指环虫 28S rDNA 部分序列基于 K2P 模型的遗传距离矩阵
Table 1 The genetic distance matrix based on the K2P model of the partial sequences of 28S rDNA of the parasitic genus *Dactylogyrus* from Cyprinidae

GenBank 虫种 Species	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 本研究物种 <i>D. crucifer</i> (This study)										
2 KY629374 十字花指环虫 <i>D. crucifer</i>	0.000									
3 MG793018 <i>D. caballeroi</i>	0.003	0.003								
4 MG793015 极小指环虫 <i>D.rarissimus</i>	0.010	0.010	0.013							
5 MG793016 湖拟鲤指环虫 <i>D. rutili</i>	0.027	0.027	0.030	0.028						
6 MG793013 双髻指环虫 <i>D. sphyrna</i>	0.040	0.040	0.043	0.037	0.040					
7 MG792956 大翼指环虫 <i>D. alatus</i>	0.040	0.040	0.043	0.043	0.043	0.024				
8 MG792953 赞特氏指环虫 <i>D. zandti</i>	0.042	0.042	0.045	0.046	0.039	0.053	0.048			
9 MG792960 维氏指环虫 <i>D. vistulae</i>	0.045	0.045	0.048	0.049	0.054	0.037	0.046	0.060		
10 KY629355 摩洛哥指环虫 <i>D. marocanus</i>	0.232	0.232	0.234	0.237	0.229	0.220	0.224	0.236	0.230	

遗传距离为 0.027。

以古氏虫属的 *Gussevia asota* 为外类群，基于 28S rDNA 序列利用贝叶斯法和最大似然法构建系统发育树，树型拓扑结构一致。本研究采集虫体与已公布的十字花指环虫（KY629374）聚在一起，并有高支持率（100/100）。十字花指环虫与寄生阿尔巴尼亚 *Rutilus ohridanus* 的 *D. caballeroi* 聚为姐妹支，然后二者再与捷克拟鲤的 *D. rarissimus* 聚为第一支（图 3）。寄生于拟鲤属的双髻指环虫、寄生于 *Alburnoides* 属的维氏指环虫和寄生于 *Alburnus* 属的大翼指环虫（*D. alatus*）聚为第二支。寄生于拟鲤属的 *D. rutili* 与寄生在远源宿主亮鲈属的 *D. andalousiensis*、*D. atlasensis*、*D. scorpius*、*D. varius* 和 *D. fimbriphallus* 聚为第三支。

结合形态和分子数据，本研究将寄生于额尔齐斯湖拟鲤的指环虫鉴定为十字花指环虫。目前该虫种仅在俄罗斯和欧洲等地有报道（Gussev 1985, Šimková et al. 2004, Benovics et al. 2018），在额尔齐斯河中的发现是我国首次报道，故将该虫确定为我国指环虫一分布新记录种。

4 讨论

目前，全球范围内报道的寄生于湖拟鲤的指环虫共计 11 种（吴宝华等 2000, Benovics et al. 2018, Šimková et al. 2022），分别是十字花指环虫、双髻指环虫、维氏指环虫、湖拟鲤指环虫、多小枝指环虫、相似指环虫（*D. similis*）、*D. caballeroi*、*D. fallax*、*D. nanus*、*D. rarissimus* 和 *D. rutili*。上述指环虫对宿主的专一性有所不同。湖拟鲤指环虫和 *D. nanus* 是湖拟鲤专性寄生虫，仅分别发现于新疆阿勒泰渔场和捷克莫拉瓦河（Morava River）（吴宝华等 2000, Benovics et al. 2018, Šimková et al. 2022）。在俄罗斯的勒拿河（Lena River）发现十字花指环虫、*D. caballeroi* 和拟鲤指环虫偏好寄生于拟鲤属鱼类鳃部（Gussev 1985），与在德国的斯

瓦特卡河（Svratka River）、希腊渔场和捷克的莫拉瓦河的调查结果一致（Benovics et al. 2018）。之后发现，十字花指环虫不仅寄生于拟鲤属鱼类，还寄生在圆腹雅罗鱼（*Leuciscus idus*）和赤眼鳟（*Scardinius erythrophthalmus*）（Šimková et al. 2022），但 Benovics 等（2018）的研究表明，十字花指环虫偏好寄生拟鲤属鱼类，寄生其他鲤科鱼类的情况属于偶然感染的结果。其余指环虫除寄生拟鲤属鱼类外，还寄生于雅罗鱼亚科其他鱼类，如双髻指环虫寄生于新疆的圆腹雅罗鱼和德国斯瓦特卡河的文鳊（*Vimba vimba*）（吴宝华等 2000, Šimková et al. 2022）；多小枝指环虫寄生于黑龙江的东北雅罗鱼（*Leuciscus waleckii*）和新疆的圆腹雅罗鱼（吴宝华等 2000）；*D. fallax* 寄生于德国斯瓦特卡河的大鼻软口鱼（*Chondrostoma nasus*）和文鳊（Benovics et al. 2018）。维氏指环虫和 *D. rarissimus* 的宿主还涉及拟白鱼属（*Alburnoides* spp.）、*Squalius* spp 和 *Telestes* spp 等多个雅罗鱼亚科鱼类（Gussev 1985, 吴宝华等 2000, Benovics et al. 2018, Šimková et al. 2022）。

本研究发现的指环虫与俄罗斯勒拿河湖拟鲤寄生的十字花指环虫（Gussev 1985）形态结构基本一致，二者均具有“一”字型背联结片、蝶形腹联结片、呈复杂的“十字花”形的交接管基部和末端呈蟹钳状的支持器等特征。但本研究虫体大小和中央大钩全长小于文献记载（Gussev 1985），这种差异可能受实验者制片及测量操作等主观因素影响，也可能与收集样品数量多少、选择采集地点和季节的不同等客观因素有关。因此通过形态特征可初步鉴定本研究采集的指环虫为十字花指环虫。同时，分子结果支持形态鉴定结果。

形态和分子数据共同表明，本研究在额尔齐斯河湖拟鲤上发现的指环虫为十字花指环虫，为我国一分布新记录种。本次分布新记录种十字花指环虫的发现不仅丰富了对我国鲤科鱼类上寄生指环虫物种丰富度的认知，还补充了十字花指环虫形态及分子方面的记录。

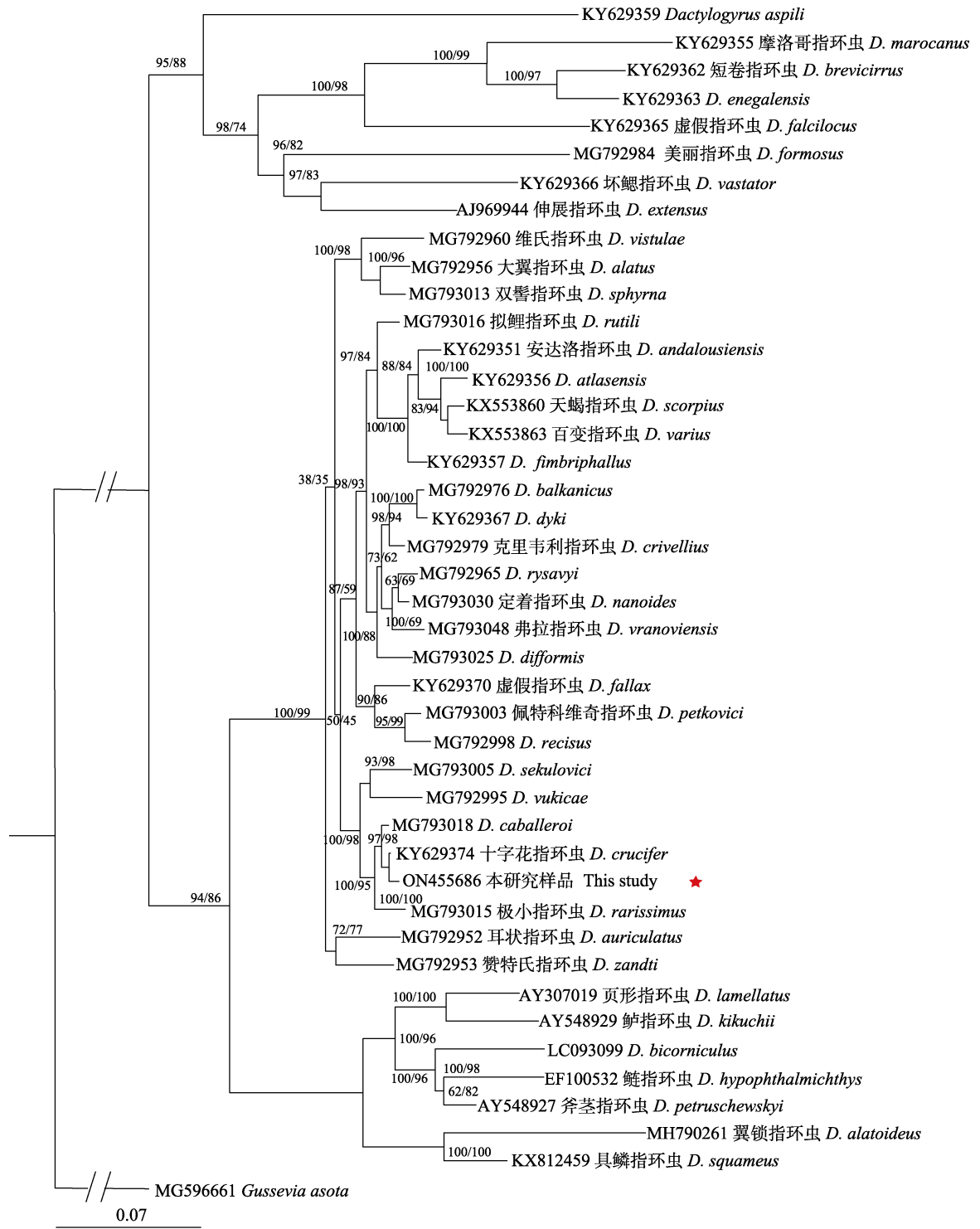


图 3 基于 28S rDNA 序列构建的贝叶斯和最大似然系统发育树

Fig. 3 Bayesian inference (BI) and maximum likelihood (ML) phylogenetic trees based on 28S rDNA sequences

节点数值表示后验概率/自展值；标尺表示序列间遗传变异性；星号表示本研究物种。

Values indicate posterior probabilities/bootstrap values. Scale indicates differences between sequences. Asterisk indicates species in this study.

参 考 文 献

- Benovics M, Desdevises Y, Vukic J, et al. 2018. The phylogenetic relationships and species richness of host-specific *Dactylogyrus* parasites shaped by the biogeography of Balkan cyprinids. *Scientific Reports*, 8(1): 1–18.
- Gibson D I, Tajana A T, Pavel I G. 1996. A catalogue of the nominal species of the monogenean genus *Dactylogyrus* Diesing, 1850 and their host genera. *Systematic Parasitology*, 35: 3–48.
- Hassouna N, Michot B, Bachellerie J P. 1984. The complete nucleotide sequence of Mouse 28S rRNA gene. Implications for the process of size increase of the large subunit rRNA in higher eukaryotes. *Nucleic Acids Research*, 12(8): 3563–3066.
- Katoh K, Kazuharu M, Kuma K I, et al. 2002. MAFFT: A novel method for rapid multiple sequence alignment based on fast Fourier transform. *Nucleic Acids Research*, 30(14): 3059–3066.
- Kumar S, Stecher G, Tamura K. 2016. MEGA7: Molecular evolutionary genetics analysis Version 7.0 for bigger datasets. *Molecular Biology and Evolution*, 33(7): 1870–1874.
- Larkin M A, Blackshields G, Brown N P, et al. 2007. Clustal W and Clustal X version 2.0. *Bioinformatics*, 23(21): 2947–2948.
- Šimková A, Morand S, Jobet E, et al. 2004. Molecular phylogeny of congeneric monogenean parasites (*Dactylogyrus*): A case of intrahost speciation. *Evolution*, 58(5): 1001–1018.
- Šimková A, Rehulkova E, Choudhury A, et al. 2022. Host-specific parasites reveal the history and biogeographical contacts of their hosts: The monogenea of Nearctic cyprinoid fishes. *Biology-Basel*, 11(2): 1–20.
- Gussev A V. 1985. Key to the Parasites of Freshwater Fish Fauna of the USSR. Leningrad: Science Publishing Company, 1–425.
- Zhang D, Gao F L, Jakovic I, et al. 2020. PhyloSuite: An integrated and scalable desktop platform for streamlined molecular sequence data management and evolutionary phylogenetics studies. *Molecular Ecology Resources*, 20(1): 348–355.
- 白俊萍. 2013. 澜沧江 9 种鱼类单殖吸虫的形态分类鉴定及基于 ITS-2 序列双身虫科的系统发育研究. 昆明: 云南师范大学硕士学位论文, 1–32.
- 翟凯旋, 习丙文, 陈凯, 等. 2021. 胭脂鱼寄生单殖吸虫形态特征及其系统发育分析. *中国水产科学*, 28(3): 364–370.
- 丁雪娟, 廖翔华, 李安兴, 等. 2005. 单殖吸虫分子系统学研究进展. *寄生虫与医学昆虫学报* 12(2): 112–118.
- 范丽仙. 2018. 云南鱼类单殖吸虫的分类及分子系统学研究. 昆明: 云南师范大学博士学位论文, 1–159.
- 郭苗. 2019. 金沙江德泽段撒氏虫属 (*Thaparocleidus*) 和指环虫属 (*Dactylogyrus*) 单殖吸虫的鉴定及系统发育研究. 昆明: 云南师范大学硕士学位论文, 52–83.
- 郭焱. 2012. 新疆鱼类志. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2–218.
- 郝翠兰. 2014. 额尔齐斯河雅罗鱼亚科鱼类指环虫种群生态学及分子系统学研究. 乌鲁木齐: 新疆农业大学硕士学位论文, 50–79.
- 郝翠兰, 岳城, 殷建国, 等. 2013. 额尔齐斯河湖拟鲤寄生指环虫的种群动态研究. *动物医学进展*, 34(11): 69–72.
- 任慕莲, 郭焱, 张人铭, 等. 2002. 中国额尔齐斯河鱼类资源及渔业. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社.
- 王新, 焦丽, 贾舒安, 等. 2014. 中国双身虫一新纪录. *干旱区研究*, 31(6): 1121–1124.
- 吴宝华, 郎所, 王伟俊, 等. 2000. 中国动物志: 扁形动物门 单殖吸虫纲. 北京: 科学出版社, 1–423.
- 伍惠生. 1980. 聚乙烯醇封固鱼类寄生虫和小型节肢动物的方法. *动物学杂志*, 15(1): 54–55.
- 张娟. 2011. 单殖吸虫线粒体基因组进化生物学研究. 广州: 中山大学博士学位论文, 49–91.
- 赵江山, 姚卫建, 焦丽, 等. 2011. 额尔齐斯河鱼类单殖吸虫研究 III. 指环虫属一新记录. *水生生态学杂志*, 32(2): 140–142.

附录 1 用于构建系统发育树的指环虫信息及其 28S rDNA 序列 GenBank 登录号

Appendix 1 Information on 28S rDNA sequences of *Dactylogyrus* used to construct the phylogenetic tree

虫名 Species	GenBank 登录号 GenBank accession numbers	宿主 Host	地区 Locality
<i>Dactylogyrus aspili</i>	KY629359	<i>Enteromius macrops</i>	塞内加尔 Senegal
摩洛哥指环虫 <i>D. marocanus</i>	KY629355	<i>Carasobarbus fritschii</i>	摩洛哥 Morocco
短卷指环虫 <i>D. brevicirrus</i>	KY629362	道兰氏野鲮 <i>Labeo parvus</i>	塞内加尔 Senegal
<i>D. senegalensis</i>	KY629363	塞内加尔野鲮 <i>L. senegalensis</i>	
虚假指环虫 <i>D. falcilocus</i>	KY629365	库比野鲮 <i>L. coubie</i>	
美丽指环虫 <i>D. formosus</i>	MG792984	银鲫 <i>Carassius gibelio</i>	克罗地亚 Croatia
坏鳃指环虫 <i>D. vastator</i>	KY629366	银鲫 <i>C. gibelio</i>	捷克 Czech Republic
伸展指环虫 <i>D. extensus</i>	AJ969944	—	
维氏指环虫 <i>D. vistulae</i>	MG792960	<i>Alburnoides ohridanus</i>	阿尔巴尼亚 Albania
大翼指环虫 <i>D. alatus</i>	MG792956	尼氏欧白鱼 <i>Alburnus neretvae</i>	波斯尼亚和黑塞哥维那 Bosnia and Herzegovina
双髻指环虫 <i>D. sphyrna</i>	MG793013	泽生拟鲤 <i>Rutilus basak</i>	
拟鲤指环虫 <i>D. rutili</i>	MG793016	湖拟鲤 <i>R. lacustris</i>	希腊 Greece
安达洛指环虫 <i>D. andalousiensis</i>	KY629351	斯克莱氏鲃 <i>Luciobarbus sclateri</i>	葡萄牙 Portugal
<i>D. atlasensis</i>	KY629356	<i>L. pallaryi</i>	摩洛哥 Morocco
天蝎指环虫 <i>D. scorpius</i>	KX553860	<i>L. rifensis</i>	
百变指环虫 <i>D. varius</i>	KX553863	<i>L. maghrebenensis</i>	
<i>D. fimbriphallus</i>	KY629357	<i>L. massaensis</i>	
<i>D. balkanicus</i>	MG792976	凡鲃 <i>Barbus plebejus</i>	克罗地亚 Croatia
<i>D. dyki</i>	KY629367	<i>B. barbus</i>	捷克 Czech Republic
克里韦利指环虫 <i>D. crivellius</i>	MG792979	<i>B. rebeli</i>	阿尔巴尼亚 Albania
<i>D. rysavyi</i>	MG792965	<i>Alburnoides thessalicus</i>	希腊 Greece
定着指环虫 <i>D. nanoides</i>	MG793030	圆鳍雅罗鱼 <i>Squalius cephalus</i>	波斯尼亚和黑塞哥维那 Bosnia and Herzegovina
弗拉指环虫 <i>D. vranoviensis</i>	MG793048	鲈欧雅鱼 <i>S. squalus</i>	
<i>D. difformis</i>	MG793025	美红眼鱼 <i>Scardinius plotizza</i>	
虚假指环虫 <i>D. fallax</i>	KY629370	文鳊 <i>Vimba vimba</i>	捷克 Czech Republic
佩特科维奇指环虫 <i>D. petkovici</i>	MG793003	肥唇鱼 <i>Pachychilon pictum</i>	希腊 Greece
<i>D. recisus</i>	MG792998	马其顿肥唇鱼 <i>P. macedonicum</i>	
<i>D. sekulovici</i>	MG793005	肥唇鱼 <i>P. pictum</i>	
<i>D. vukicae</i>	MG792995	砂鱼 <i>Delminichthys adspersus</i>	波斯尼亚和黑塞哥维那 Bosnia and Herzegovina
<i>D. caballeroi</i>	MG793018	<i>Rutilus ohridanus</i>	阿尔巴尼亚 Albania
十字花指环虫 <i>D. crucifer</i>	KY629374	拟鲤 <i>R. rutilus</i>	捷克 Czech Republic
本研究物种 This study	ON455686	湖拟鲤 <i>R. rutilus lacustris</i>	中国 China
极小指环虫 <i>D. rarissimus</i>	MG793015	湖拟鲤 <i>R. lacustris</i>	希腊 Greece
耳状指环虫 <i>D. auriculatus</i>	MG792952	欧鳊 <i>Abramis brama</i>	捷克 Czech Republic
赞特氏指环虫 <i>D. zandti</i>	MG792953		
页形指环虫 <i>D. lamellatus</i>	AY307019	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	中国 China
鲈指环虫 <i>D. kikuchii</i>	AY548929	七星鲈 <i>Lateolabrax japonicus</i>	
<i>D. bicorniculus</i>	LC093099	鲮鱼 <i>Rhodeus atremius atremius</i>	日本 Japan
鲢指环虫 <i>D. hypophthalmichthys</i>	EF100532	—	—
斧茎指环虫 <i>D. petruschewskyi</i>	AY548927	团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	中国 China
翼锁指环虫 <i>D. alatoideus</i>	MH790261	多鳞白鱼 <i>Anabarilius polylepis</i>	
具鳞指环虫 <i>D. squameus</i>	KX812459	—	
<i>Gussevia asota</i>	MG596661	图丽鱼 <i>Astronotus ocellatus</i>	

“—” 表示没有数据。“—” means no data.

附录 2 本研究十字花指环虫和其他寄生于湖拟鲤的指环虫形态数据比较
Appendix 2 Comparison of morphological data of *Dactylogyrus crucifer* in this study and other *Dactylogyrus* spp parasitized in *Rutilus rutilus lacustris* reported

形态数据 Morphological data (mm)	十字花指环虫 <i>D. crucifer</i> (本研究 This study)	十字花指环虫 <i>D. crucifer</i> (Gussev 1985)	双髻指环虫 <i>D. sphyrna</i> (吴宝华等 2000)	维氏指环虫 <i>D. vistulae</i> (赵江山等 2011)	<i>D. caballeroi</i> (Gusse 1985)	极小指环虫 <i>D. rarissimus</i> (Gussev 1985)	湖拟鲤指环虫 <i>D. rutilus</i> (Gussev 1985)
体长 Body length	0.347 ± 0.047	0.750	0.900 - 0.098	1.102 - 1.256	0.750	0.250	0.400
体宽 Maximum width	0.086 ± 0.028	0.170	0.163 - 0.188	0.243 - 0.284	1.200	0.100	0.008
中央大钩 Anchor	0.038 ± 0.001	0.040 - 0.054	0.063 - 0.065	0.044 - 0.048	0.044 - 0.050	0.025 - 0.032	0.025 - 0.036
基部长 Shaft	0.031 ± 0.001	0.030 - 0.039	0.030 - 0.032	0.024 - 0.028	0.036 - 0.040	0.022 - 0.025	0.023 - 0.031
内突长 Inner root	0.014 ± 0.002	0.013 - 0.019	0.045 - 0.047	0.032 - 0.036	0.014 - 0.017	0.009 - 0.010	0.006 - 0.008
外突长 Outer root	0.006 ± 0.001	0.003 - 0.007	0.017	0.008 - 0.012	0.004 - 0.006	0.003 - 0.005	0.003 - 0.005
钩尖长 Point	0.011 ± 0.001	0.013 - 0.019	0.013 - 0.014	0.012 - 0.016	0.015 - 0.019	0.010 - 0.011	0.005 - 0.007
边缘小钩 Marginal hook	0.032 ± 0.005	0.023 - 0.040	0.023 - 0.026	—	0.022 - 0.037	0.015 - 0.028	0.016 - 0.028
背联结片形状 Dorsal bar	“—” 字型，中部稍弯，两端钝圆 “—” shape; slightly curved in the middle; ends obtusely rounded	“—” 字型，中部稍弯，两端钝圆 “—” shape; slightly curved in the middle; ends obtusely rounded	“—” 字型，中部向后侧突出 “—” shape; protruding from the centre to the rear	“V” 字型，中间弯折，两端钝圆 “—” shape; bent in the middle; ends obtusely rounded	“—” 字型，中部稍弯，两端钝圆 “—” shape; slightly curved in the middle; ends obtusely rounded	“—” 字型，中部向后侧突出 “—” shape; protruding from the centre to the rear	“—” 字型，中部向后侧突出 “—” shape; protruding from the centre to the rear
背联结大小 Dorsal bar size	(0.020 ± 0.019) × (0.003 ± 0.003)	(0.023 - 0.039) × (0.004 - 0.006)	(0.004 - 0.030) × 0.032	(0.032 - 0.040) × 0.008	(0.005 - 0.007) × (0.028 - 0.033)	(0.002 - 0.003) × (0.017 - 0.021)	(0.002 - 0.004) × (0.016 - 0.021)

续附录 2

形态数据 Morphological data (mm)	十字花指环虫 <i>D. crucifer</i> (本研究 This study)	十字花指环虫 <i>D. crucifer</i> (Gussev 1985)	双髻指环虫 <i>D. sphyrna</i> (吴宝华等 2000)	维氏指环虫 <i>D. vistulae</i> (赵江山等 2011)	<i>D. caballeri</i> (Gusse 1985)	极小指环虫 <i>D. rarissimus</i> (Gussev 1985)	湖拟鲤指环虫 <i>D. rutilus</i> (Gussev 1985)
腹联结片形状 Ventral bar	蝶形 Butterfly shape	蝶形 Butterfly shape	无 None	无 None	蝶形 Butterfly shape	倒“T”形 Inverted “T” shape	“十”字形 “十” shape
腹联结片大小 Ventral bar size	$(0.025 \pm 0.004) \times$ (0.028 ± 0.007)	$(0.020 - 0.029) \times$ $(0.021 - 0.037)$	—	—	$(0.024 - 0.031) \times$ $(0.021 - 0.033)$	$(0.010 - 0.014) \times$ $(0.011 - 0.020)$	$(0.010 - 0.019) \times$ $(0.016 - 0.022)$
交接器长 Copulatory organ length	0.054 ± 0.004	0.045 - 0.060	0.090 - 0.098	0.046 - 0.072	0.078 - 0.084	0.016 - 0.020	0.023 - 0.032
交接管 Copulatory Tube	起始部膨大形似“8”， 随后管径呈“6” 字形延伸 Beginning dilated like an “8”; tube diameter then extends in the shape of a “6”	起始部膨大形似“8”， 随后管径呈“6” 字形延伸 Beginning dilated like an “8”; tube diameter then extends in the shape of a “6”	弯曲的管状，基部膨 大呈圆形 Curved tubular; base dilated and rounded	圆状，基部膨大， 管部迅速弯折向前， 管体纤细 Rounded; base dilated; tube rapidly curved forward; tube slender	圆状，基部膨大， 管部迅速弯折向前， 管体纤细 Rounded; base dilated; tube rapidly curved forward; tube slender	起始部膨大，管径 90° 部弯曲，似豆芽状 Beginning dilated; tube curved at 90°; bean sprout-like	起始部膨大似“喇叭”， 管径回旋向上 180° Bulging at the beginning like a “trumpet”; tube diameter swept back up 180°
支持器 Accessory piece	末端形似蟹钳 Ends shaped like crab pincers	末端形似蟹钳 Ends shaped like crab pincers	末端呈两个 镰刀型分叉 Ends in two sickle-shaped forks	柳叶形，略弯折 Willow-shaped; slightly curved	柳叶形，略弯折 Willow-shaped; slightly curved	两端尖，中部呈 90° 弯曲，似花萼状 Pointed at both ends; curved at 90° at middle; resembling a calyx	块状，基部和末端 膨大，且末端与 交接管紧贴 Tuberous; base and ends inflated; and ends tightly adherent to intersecting tubes

“—” 表示没有数据。“—” means no data.