

DOI: 10.5846/stxb202104150977

刘春池, 牛建功, 张涛, 刘鸿, 蔡林钢, 王丽, 米乃瓦尔·木衣提. 我国伊犁河鱼类群落结构及外来鱼类适生性. 生态学报, 2022, 42(7): 2571-2581.
Liu C C, Niu J G, Zhang T, Liu H, Cai L G, Wang L, Minawar MUYIT. Fish community structure and habitat suitability of alien fishes in the Ili River, China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(7): 2571-2581.

我国伊犁河鱼类群落结构及外来鱼类适生性

刘春池¹, 牛建功^{2,3,*}, 张涛^{2,3}, 刘鸿^{2,3}, 蔡林钢^{2,3}, 王丽^{2,3}, 米乃瓦尔·木衣提^{2,3}

1 西北政法大学, 西安 710122

2 新疆维吾尔自治区水产科学研究所, 乌鲁木齐 830000

3 农业部西北地区渔业资源环境科学观测实验站, 乌鲁木齐 830000

摘要: 2012—2019年, 在我国伊犁河流域的6个断面开展了鱼类群落结构调查, 结果显示我国伊犁河流域现有鱼类共计29种, 大多属于鲤形目。鱼类群落组成与20世纪末期相比发生了变化, 银色裂腹鱼、短头鲃、银鲫、鲢、北方泥鳅在本研究中未出现, 尤其是银色裂腹鱼, 截至目前的鱼类资源调查中, 均无捕获记录。历史研究中未见的乌鳢与大口鲶在本研究中有捕获。外来鱼类的出现率和数量均有所增加。对鱼类群落结构特征进行分析, 显示伊犁河流域鱼类群落多样性较低, 下游干流和上游支流的鱼类群落结构差异较大。现阶段, 我国伊犁河流域主要的优势种外来鱼类有鲤、鲮和鲫。利用最大熵生态位模型(MaxEnt)对鲤、鲮和鲫的适生区域进行预测, 与鱼类资源调查获得的鱼类实际分布区对比, 显示鲤和鲮在我国伊犁河流域的分布范围与预测结果是吻合的, 而鲫在进入伊犁河流域之后开始向上游支流河段扩散。由于这几种外来鱼类在一开始引入的时候未采取管控措施, 又具有极强的适应能力, 且伊犁河流域的鱼类多样性较小, 因此极易形成规模并扩散。外来鱼类的入侵, 会对土著鱼类造成巨大的威胁。基于本论文研究结论, 应当将已发生生态位漂变的鲫其作为重点关注种类, 关注外来鱼类的生活史对策, 深入研究外来鱼类的入侵机制和诱因; 对上游支流河段的生境进行监测, 关注气候和水文变化, 尤其是土著鱼类产卵场、索饵场和越冬场的变化, 尽可能减小人类活动干扰; 对伊犁河流域的鱼类资源进行长期监测, 关注鱼类群落结构变化, 一旦发现异常及时采取措施; 增加对土著鱼类的增殖放流; 严格控制进出口贸易和增殖放流时夹带的外来鱼类。维护我国伊犁河流域的生态安全。

关键词: 伊犁河; 最大熵模型; 土著鱼类; 生态安全

Fish community structure and habitat suitability of alien fishes in the Ili River, China

LIU Chunchi¹, NIU Jiangong^{2,3,*}, ZHANG Tao^{2,3}, LIU Hong^{2,3}, CAI Lingang^{2,3}, WANG Li^{2,3}, Minawar MUYIT^{2,3}

1 Northwest University of political science and law, Xi'an 710122, China

2 Xinjiang Fishery Research Institute, Urumqi 830000, China

3 Scientific Observing and Experimental Station of Fishery Resources and Environment in Northwestern China, Ministry of Agriculture, Urumqi 830000, China

Abstract: A survey of fish community structure was conducted in six sections of the Ili River, China from 2012 to 2019. The results showed that there were 29 species of fish in the Ili River, most of which are belonging to Cyprinidea. Compared to the record at the end of the last century, the composition of fish species has changed. *Schizothorax argentatus* Kessler, *Barbus brachycephalus* Kessler, *Carassius auratus gibelio* (Bloch), *Hypophthalmichthys molitrix* (Cuvier et Valenciennes) and *Misgurnus bipartitus* (Sauvage et Dabry) did not appear in the present survey, especially *Schizothorax. argentatus* Kessler, there is no capture record in the fish resource investigation by far. *Channa argus* (Cantor) and *Silurus meridionalis*

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(31702348); 新疆维吾尔自治区自然科学基金(2019D01B44)

收稿日期: 2021-04-15; **采用日期:** 2021-11-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: njg20008@163.com

Chen, which were not captured in historical studies, were presented in this study. Totally, the occurrence and number of alien fishes have increased. According to the analysis of the fish community structure characteristics, there was low diversity in the Ili River, China. It was significantly different between the main stream and the tributary in fish community structure. At present, the main alien fishes are *Cyprinus carpio* Linnaeus, *Hemiculter leucisculus* (Basilewsky) and *Carassium auratus* (Linnaeus) in the Ili River, China. Using Maximum entropy modelling (MaxEnt) to predict the potential distribution of *C. carpio*, *H. leucisculus* and *C. auratus* in the Ili River, and compared with the fish occurrence, it revealed that the potential distribution was consistent with the actual distribution in *C. carpio* and *H. leucisculus*. But *C. auratus* has spread to the tributary compared with the potential distribution. The alien fish have strong adaptability, furthermore, the absence of controlling and prevention at the beginning of their introduction, made the size of their population and habitat were growing larger in the Ili River, which has low fish diversity. The invasion of the alien fishes will introduce a great threat to endemic fishes. To restrain the spread of alien fish, and maintain the ecological security of the Ili River, China, the life history and invasive mechanism of the alien fish should be paid a great attention, especially for *C. auratus* that has undergone niche drift. The climate and hydrological of the habitat at the upstream tributaries, especially for native fish spawning, feeding and wintering, should be monitored. The long-term monitoring of fish resources and the changes of fish community structure in the Ili River is needed. The artificial propagation and releasing of native fish should be taken. Meanwhile, it is necessary to exercise strict control over the alien fish entrainment with import and export trade or artificial releasing.

Key Words: the Ili River; Maximum Entropy modelling; native fish; ecological security

伊犁河是我国与哈萨克斯坦共和国之间的国际河流,属于中亚内流河,位于新疆西部,发源于天山西北部坡山脉,在我国境内全长 442km,平均年径流量约为 $158.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。上游的特克斯河、喀什河以及巩乃斯河是其三大支流,其中特克斯河是主源,它自西向东穿过昭苏-特克斯盆地,沿途接纳阔克苏河、大吉尔尕郎河和小吉尔尕郎河水后转向北,与巩乃斯河汇合,始称伊犁河。转向西流后在雅马渡与喀什河汇合,经三道河河段出境,最终汇入巴尔喀什湖。我国境内的伊犁河流域地势由东向西倾斜,处于被南北天山山脉包围的喇叭状区域,仅向大西洋、地中海及巴尔喀什湖敞开。这一地理位置使得伊犁河河谷雨量较多,气候温和,水量充足,物产丰富^[1]。

伊犁河原有鱼类区系较为简单,整个伊犁河水系的土著鱼类只有 13 种^[1],多为冷水性鱼类。20 世纪初,原苏联渔业工作者为了提高渔产量,向伊犁河下游巴尔喀什湖及卡甫恰盖水库引入了大量欧洲水系的经济鱼类,其中大多已经扩散到我国境内^[1]。20 世纪 60 年代,伊犁地区发展渔业,引种家鱼时一些野杂鱼苗流入伊犁河流域^[2-3]。Mamilov 等人对伊犁河下游哈萨克斯坦共和国境内的巴尔喀什湖长达 10 年的监测显示,由于人为活动而带入的外来种种数已经远超过土著种^[4]。

伊犁河流域鱼类资源的调查和研究起步于 20 世纪 60 年代后期,李思忠等人的调查表明,伊犁河土著鱼类 10 种,移植种类有 5 种^[5]。任慕莲等对伊犁河流域鱼类资源及渔业进行了系统的调查研究,表明我国伊犁河鱼类共计 32 种,其中土著鱼类 10 种^[1]。到了 21 世纪初,一系列研究表明,由于人为活动的影响,伊犁河鱼类群落结构发生了改变,其中外来鱼类移植、过度捕捞、水利水电枢纽工程建设和水体污染是引起伊犁河鱼类群落结构改变的重要原因^[6-8]。

本研究拟对我国伊犁河流域鱼类群落结构现状进行调查,查明现阶段伊犁河流域主要外来鱼类,利用生态位模型对这些外来鱼类在伊犁河流域的适生区域进行估算,探讨外来鱼类对土著鱼类的影响,为土著鱼类资源保护提供对策。

1 研究方法

1.1 鱼类资源调查

根据伊犁河流域的地理位置,选取 6 个采样断面(图 1)。断面 S1 位于巩乃斯河中游的新源县河段,该河

段平均河宽为 20m,河道蜿蜒曲折,底质以泥沙为主;断面 S2,位于特克斯河中上游昭苏河段,该河段平均河宽为 80m,河道平直,弯道较少,河道底质卵石较多;断面 S3,位于特克斯河下游与巩乃斯河汇合处,该河段平均河宽为 180m,河道开阔,弯道较少,河道底质卵石较多;断面 S4,位于喀什河中下游尼勒克河段,该河段平均河宽为 46m,河道蜿蜒曲折,河道底质为泥沙卵石。断面 S5,位于伊犁河干流雅玛渡河段,该河段平均河宽为 135m,河道开阔,两岸为城镇居民区,河道底质以泥沙为主,喀什河在该河段汇入,喀什河河水透明度高,干流水浑浊,汇入口河水有一道明显的清浊分界线。断面 S6,位于国境线附近的三道河河段,平均河宽为 135m,河道平直,河道内生有水生植物芦苇,河道泥沙较大。

鱼类资源调查采取流动调查和定点采样相结合的方式。由于伊犁河上游支流河段地势险峻,人迹罕至,因此采取自主捕捞、雇用渔民捕捞的方式进行流动调查。捕捞渔具包括刺网、地笼和抬网等。走访河流沿岸水产市场和餐馆,补充部分日常采样中无法采集到的种类。对采集到的所有鱼类标本当场进行种类鉴定,逐尾测量全长、体长和体重等生物学指标,并记录渔具种类、渔具规格、捕捞时间和捕捞地点等基本信息。对于当场鉴定到种类的鱼类标本,测量完相关生物学指标之后,放归到原采集地;对于当场无法鉴定种类的鱼类标本,以 10%福尔马林溶液固定,带回实验室鉴定。定点采样调查主要采取固定地点对商业渔获物进行统计的方式。统计方法以船次为抽样单位,统计所有船次的整船渔获物。逐尾测量全长、体长和体重等指标。并记录渔具种类、渔具规格、捕捞时间和捕捞地点等基本信息。对于当场无法鉴定种类的鱼类标本,以 10%福尔马林溶液固定,带回实验室鉴定。

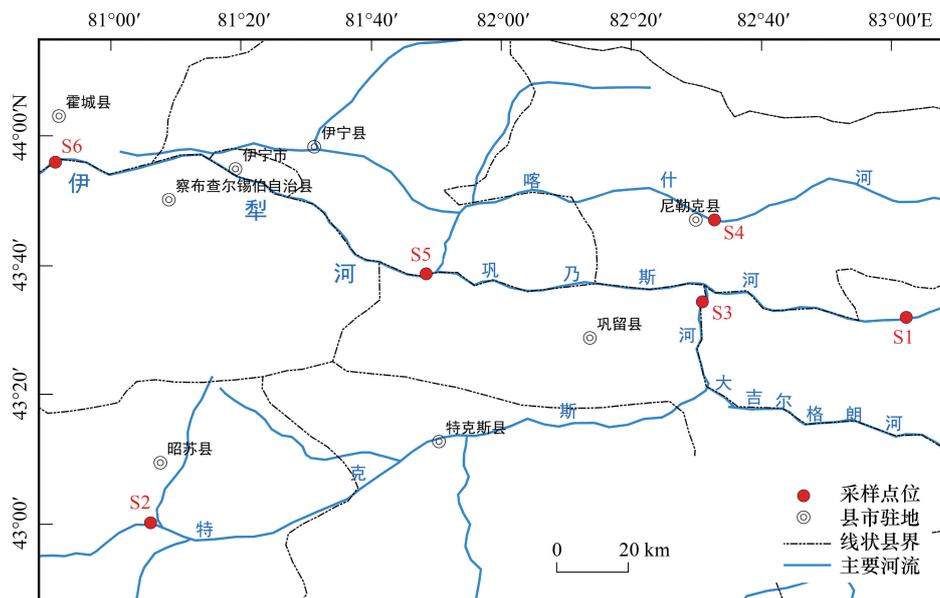


图1 伊犁河(中国境内)鱼类资源调查采样断面示意图

Fig.1 The sampling sites in Ili River, China

1.2 资料搜集

外来鱼类原产地资料数据获取:查阅文献、专著、书籍。

物种分布信息数据的获取:①从文献记录中收集物种分布信息。②从物种分布信息数据库查询, Fishbase、GBIF、HerpNET、OBIS、REMIB 以及 SINGER 等。③野外调查记录数据。

环境变量数据的获取:选取广泛应用于淡水生态系统研究的环境变量。数据可以在 WorldClim 网站 (<http://www.worldclim.org>) 查询。

1.3 数据分析

采用以下多样性特征进行研究:

(1) 相对重要性指数 (IRI):

$$\text{IRI} = (n_i/N + w_i/W) \times f_i;$$

$$\text{IRI}\% = (\text{IRI} / \sum \text{IRI}) 100\%$$

本研究选取 IRI% 大于 10 的种类为各采样点优势种^[3-6]。

(2) Shannon-Wiener 多样性指数:

$$H' = - \sum (n_i/N) \ln(n_i/N)$$

(3) Simpson 多样性指数:

$$D = 1 - \sum (n_i/N)^2$$

(4) Bray-Curtis 相似性指数:

$$C_n = \frac{2 N_j}{N_a + N_b}$$

式中, n_i 为第 i 种的个体数, w_i 为第 i 种的总重量, N 为所有渔获种类的总个体数, W 为所有渔获种类的总重量, f_i 为第 i 种出现的站数占总调查站数的百分比 (即出现频率)。 N_a 和 N_b 分别为生境 a 和生境 b 鱼类群落中各自的总个体数, N_j 为生境 a 和生境 b 鱼类群落共有种中个体数量较小者之和。

(5) 生态位模型分析

本研究应用最大熵模型 (Maximum Entropy, MaxEnt) 对外来鱼类在伊犁河流域的适宜分布区域进行预测。最大熵模型依据物种分布数据和环境因子计算约束条件, 认为在此约束条件下熵最大时物种出现的概率分布与其实际分布最接近^[9-11]。MaxEnt 模型具有操作简单、预测精度高、运算速度快等特点, 因此广泛应用于外来生物入侵以及物种分布区预测、濒危动植物保护、传染疾病的而风险预测等方面的研究^[12-18]。

本研究的数据的分析和处理使用 Excel 2010、PRIMER 5.0 软件包 (Plymouth Marine Laboratory, UK)、Past 软件以及 ArcGIS 软件完成。

2 结果

2.1 伊犁河鱼类种类组成

2012—2019 年在伊犁河流域开展鱼类资源调查, 总共采集到 2654 尾鱼类数据, 共计 1345.4kg, 分属 29 种, 其中鲤形目鱼类共计 18 种, 鲈形目 6 种, 鲇形目 2 种, 鲟形目、鲑形目和鳊形目各 1 种 (表 1)。

2.2 鱼类群落结构特征

对伊犁河流域各个断面的群落多样性进行统计, 结果显示, 伊犁河流域鱼类整体多样性为 2.21, 丰富度为 3.55, 均匀度为 0.66。对各个断面的多样性指数进行比较, 结果如图 2 所示, S5 断面的多样性、丰富度和均匀度是 6 个断面中最高的。S4 断面的均匀度和多样性最低, S1 断面的丰富度最低。

利用 Bray-Curtis 相似性指数将伊犁河流域 6 个断面的鱼类群落进行聚类, 在相似性 50% 的基础上, 伊犁河流域鱼类群落可以分为三大类, 上游支流的 4 个采样断面聚为一类, S5 断面与 S6 断面各自为一类 (图 3)。伊犁河流域干流和支流的鱼类群落结构差异较大, 利用非参数检验对各个采样断面的鱼类组成进行分析, 结果显示各采样断面鱼类种类和组成之无显著性差异 ($P > 0.05$)。

2.3 优势种

取 IRI% > 10% 的种类为优势种, 各个采样断面的优势种类见表 2, S1 断面的优势种是黑背高原鳅、新疆高原鳅和新疆裸重唇鱼, S2 断面的优势种主要有伊犁裂腹鱼、斯氏高原鳅、新疆高原鳅和新疆裸重唇鱼; S3 和 S4 断面的优势种相同, 主要是斯氏高原鳅、新疆裸重唇鱼和新疆高原鳅; S5 断面的优势种主要是伊犁裂腹鱼、新疆裸重唇鱼和新疆高原鳅; S6 断面的优势种主要是鲤和鲮。

表 1 伊犁河流域鱼类名录
Table 1 Fish species in Ili River, China

分类 Taxon	采样点 Sampling sites					
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
一、鲟形目 ACIPENSERIFORMES						
鲟科 Acipenseridae						
鲟属 <i>Acipenser</i> Linnaeus						
(1) 裸腹鲟 <i>Acipenser nudiiventris</i> Lovetzky						+
二、鲑形目 SALMONIFORMES.						
鲑科 Salmonidae						
大马哈鱼属 <i>Oncorhynchus</i> Linnaeus						
(2) 虹鳟 <i>Oncorhynchus mykiss</i> Walbaum			+			
三、鲤形目 CYPRINIFORMES						
鲤科 Cyprinidae						
欧鳊属 <i>Abramis</i> Cuvier						
(3) 欧鳊 <i>Abramis brama</i> Berg						+
草鱼属 <i>Ctenopharyngodon</i> Steindachner						
(4) 草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i> (Cuvier et Valenciennes)						+
鲢属 <i>Phoxinus</i> Agassiz						
(5) 短尾鲢 <i>Phoxinus brachyurus</i> Berg		+	+			
雅罗鱼属 <i>Leuciscus</i> Cuvier						
(6) 贝加尔雅罗鱼 <i>Leuciscus baicalensis</i> (Dybowski)					+	
赤梢鱼属 <i>Aspius</i> Agassiz						
(7) 赤梢鱼 <i>Aspius aspius</i> (Linnaeus)					+	+
鲮属 <i>Hemiculter</i> Bleeker						
(8) 鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i> (Basilewsky)						+
鲮属 <i>Rhodeus</i> Agassiz						
(9) 中华鲮 <i>Rhodeus sinensis</i> Gunther					+	+
麦穗鱼属 <i>Pseudorasbora</i> Bleeker						
(10) 麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i> (Temminck et Schlegel)			+	+	+	+
棒花鱼属 <i>Abbottina</i> Jordan et Fowler						
(11) 棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i> (Basilewsky)					+	+
裂腹鱼属 <i>Schizothorax</i> Heckel						
(12) 伊犁裂腹鱼 <i>Schizothorax pseudaksaiensis</i> Herzenstein	+	+	+	+	+	+
重唇鱼属 <i>Diptychus</i> Steindachner						
(13) 斑重唇鱼 <i>Diptychus maculatus</i> Steindachner	+	+		+		
裸重唇鱼属 <i>Gymnodiptychus</i> Herzenstein						
(14) 新疆裸重唇鱼 <i>Gymnodiptychus dybowskii</i> (Kessler)	+	+	+	+	+	
鲤属 <i>Cyprinus</i> Linnaeus						
(15) 鲤 <i>Cyprinus carpio</i> Linnaeus					+	+
鲫属 <i>Carassius</i> Jarocki						
(16) 鲫 <i>Carassius auratus</i> (Linnaeus)	+	+	+	+	+	+
鳅科 Cobitidae						
须鳅属 <i>Barbatula</i> Linck						
(17) 穗唇须鳅 <i>Barbatula labiata</i> (Kessler)	+	+	+	+		
高原鳅属 <i>Triphophysa</i> Rendahl						

续表

分类 Taxon	采样点 Sampling sites					
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
(18) 新疆高原鳅 <i>Triplophysa strauchii</i> (Kessler)	+	+	+	+	+	
(19) 斯氏高原鳅 <i>T. stoliczkae</i> (Steindachner)	+	+	+	+		
(20) 黑背高原鳅 <i>T. dorsalis</i> (Kessler)	+	+	+			
四、鲇形目 SILURIFORMES						
鲇科 Siluridae						
鲇属 <i>Silurus</i> Linnaeus						
(21) 大口鲇 <i>Silurus meridionalis</i> Chen					+	+
(22) 欧鲇 <i>S. glanis</i> Linnaeus						+
五、鲈形目 CYPRINODONTIFORMES						
鲈科 Cyprinodontidae						
青鲈属 <i>Oryzias</i> Jordan et Snyder						
(23) 青鲈 <i>Oryzias latipes</i> Temminck et Schlegel						+
六、鲈形目 PERCIFORMES						
鲈科 Percidae						
鲈属 <i>Perca</i> Linnaeus						
(24) 伊犁鲈 <i>Perca schrenki</i> Kessler		+	+			
梭鲈属 <i>Lucioperca</i> Cuvier et Valenciennes						
(25) 梭鲈 <i>Lucioperca lucioperca</i> (Linnaeus)						+
塘鳢科 Eleotridae						
黄魮鱼属 <i>Hypseleotris</i> Gill						
(26) 黄魮鱼 <i>Hypseleotris swinhonis</i> (Gunther)		+		+		+
虾虎鱼科 Gobiidae						
栉鰕虎鱼属 <i>Ctenogobius</i> Gill						
(27) 褐氏栉鰕虎鱼 <i>Ctenogobius brunneus</i> (Temminck et Schlegel)				+		
(28) 波氏栉鰕虎鱼 <i>C. cliffordpopei</i> (Nichols)						+
鳢科 Channidae						
鳢属 <i>Channa</i> (Scopoli, 1777)						
(29) 乌鳢 <i>Channa argus</i> (Cantor)						+
合计 Total	8	11	11	10	11	18

S: 采样断面 Site

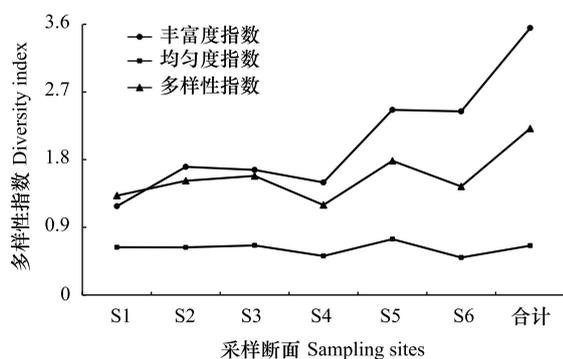


图2 伊犁河流域鱼类群落多样性指数

Fig.2 Diversity index of fish community in Ili River, China

S: 采样断面 Site

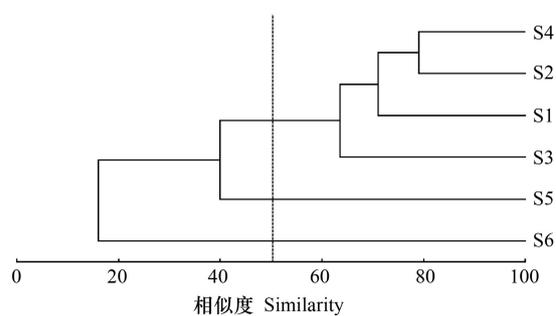


图3 伊犁河流域鱼类群落聚类

Fig.3 The cluster of fish community in Ili River, China

表 2 伊犁河流域各个采样断面鱼类优势种
Table 2 The dominant Fish of each sampling site in Ili River

种类 Species	采样断面 Sampling sites					
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
黑背高原鳅 <i>T. dorsalis</i> (Kessler)	17.87					
斯氏高原鳅 <i>T. stoliczkae</i> (Steindachner)		22.73	10.29	34.15		
伊犁裂腹鱼 <i>S. pseudaksaiensis</i> Herzenstein		13.35			44.83	
新疆裸重唇鱼 <i>G. dybowskii</i> (Kessler)	39.47	34.94	23.53	46.19	17.24	
新疆高原鳅 <i>T. strauchii</i> (Kessler)	36.00	25.00	46.08	16.22	10.34	
鲮 <i>H. leucisculus</i> (Basilewsky)						61.76
鲤 <i>C. carpio</i> Linnaeus						12.90

2.4 外来鱼类的适生性研究

根据优势种分析,鲤和鲮两种外来鱼类是伊犁河下游河段的优势种。除此之外,鲫虽然不是优势种,但是其分布范围几乎覆盖了本研究的 6 个采样断面,考虑到鲫的入侵性以及危害,本研究对鲤、鲮和鲫在伊犁河流域的适生性进行分析。选取海拔高度和 19 个生物气候变量(表 3),包括反映年际变化的变量(年均温、年降水量等),季度变化的变量(温度的季节性变化,降水量的季节性变化等)和极端环境变量(最冷季平均温、最冷季平均降水量等)为环境指标,利用最大熵模型对 3 种外来鱼类的适生性区域进行计算^[19]。

利用受试者工作特征曲线(ROC, Receiver Operating characteristic Curve)来评价模型预测的精度。ROC 曲线以假阳性率为横坐标,真阳性率为纵坐标所形成的曲线,当 ROC 模型评价预测结果时,ROC 曲线下面积越大,即 AUC(Area Under Curve)值越大,表示物种分布越偏离随机分布,环境变量与模型的相关性越大,模型预测效果越好。由于 AUC 值不受阈值影响,因此评价结果比较客观。

表 3 生物气候变量
Table 3 Environmental variables

代码 Variable code	因子 Variable type
Alt	海拔 Elevation of the site
Bio1	年平均气温 Annual mean temperature
Bio2	昼夜温差月均值 Mean diurnal range: mean of monthly (max temp-min temp)
Bio3	等温性 Isothermality: (Bio2/ Bio7)×100
Bio4	温度季节变化 Temperature seasonality (standard deviation×100)
Bio5	最暖月最高温度 Maximum temperature of warmest month
Bio6	最冷月最低温度 Minimum temperature of coldest month
Bio7	温度全年波动范围 Temperature annual range (Bio5—Bio6)
Bio8	最湿润季节平均温度 Mean temperature of wettest quarter
Bio9	最干旱季节平均温度 Mean temperature of driest quarter
Bio10	最暖季节平均温度 Mean temperature of warmest quarter
Bio11	最冷季节平均温度 Mean temperature of coldest quarter
Bio12	年降水量 Annual precipitation
Bio13	最湿润月降雨量 Precipitation of wettest month
Bio14	最干燥月降雨量 Precipitation of driest month
Bio15	各季节降雨量 Precipitation seasonality (coefficient of variation)
Bio16	最湿润季节降雨量 Precipitation of wettest quarter
Bio17	最干燥季节降雨量 Precipitation of driest quarter
Bio18	最暖季节平均温度 Precipitation of warmest quarter
Bio19	最冷季节平均温度 Precipitation of coldest quarter

利用生态位模型对鲤在伊犁河流域的适生性区域进行计算,结果显示(图4)红色区域,其适生性最高,可以达到0.8以上。橙色区域可以达到0.6以上,黄色区域具有一定的适生性,在其余地方,其适生性较差。本研究在实际调查中获取的鲤的分布数据显示,鲤出现在雅玛渡河段和三道河河段,这与生态位模型获得的鲤的适生区域是吻合的。从图4可以看出,黄色、橙色和红色区域主要集中在雅玛渡及下游河段。

利用生态位模型对鲮在伊犁河流域的适生区域进行计算,结果显示在伊犁河下游河段(图4),鲮的适生性在0.4—0.8之间,其余地区适生性较小。

根据生态位模型计算所得的鲫在伊犁河流域的适生性区域集中在伊犁河下游河段(图4),适生性在0.38—0.68之间。鲫在伊犁河流域具有一定的适应性,但适生性较低。

利用ROC曲线对鲤的分布预测进行评价,结果显示鲤曲线位于图形上方,AUC值略大于0.5;对鲮的预测评价结果AUC值为0.819,对鲫的预测结果评价显示AUC值为0.896,这表明本模型在用于鲮和鲫在伊犁河流域适生区的预判中具有很高的可信度(图5)。

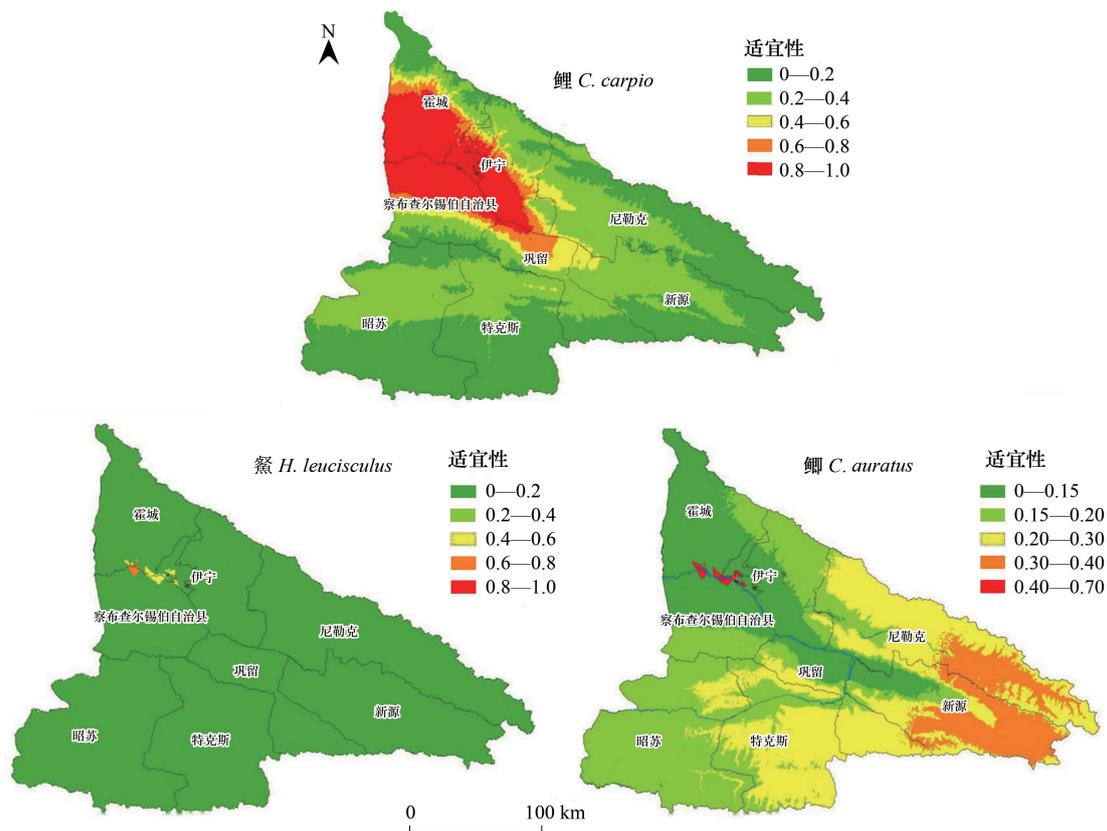


图4 鲤、鲮与鲫在伊犁河流域的适生区域

Fig.4 The results of the potential habitat prediction of *C. carpio*, *H. leucisculus* and *C. auratus* in Ili River, China

在生态因子中,对鲤的分布影响最大的是最暖季平均气温(Bio10),其次是最干月降水量(Bio14),这表明,最高气温和最小降水量对鲤的分布具有重要的影响。对鲮的分布贡献率最大的生态因子是年平均气温(Bio1),其次是最干季平均气温(Bio9)和最冷季平均降水(Bio19),紧接着是最湿润季节平均气温(Bio8),这表明气温和枯水期的降雨量是决定鲮分布的重要环境因子。影响鲫分布的最主要因子是最潮湿月份的降水(Bio),其次是最干旱月份的降水(Bio13),另外还有平均日差(Bio2),这表明,降水量和温差是影响鲫分布的重要因素。

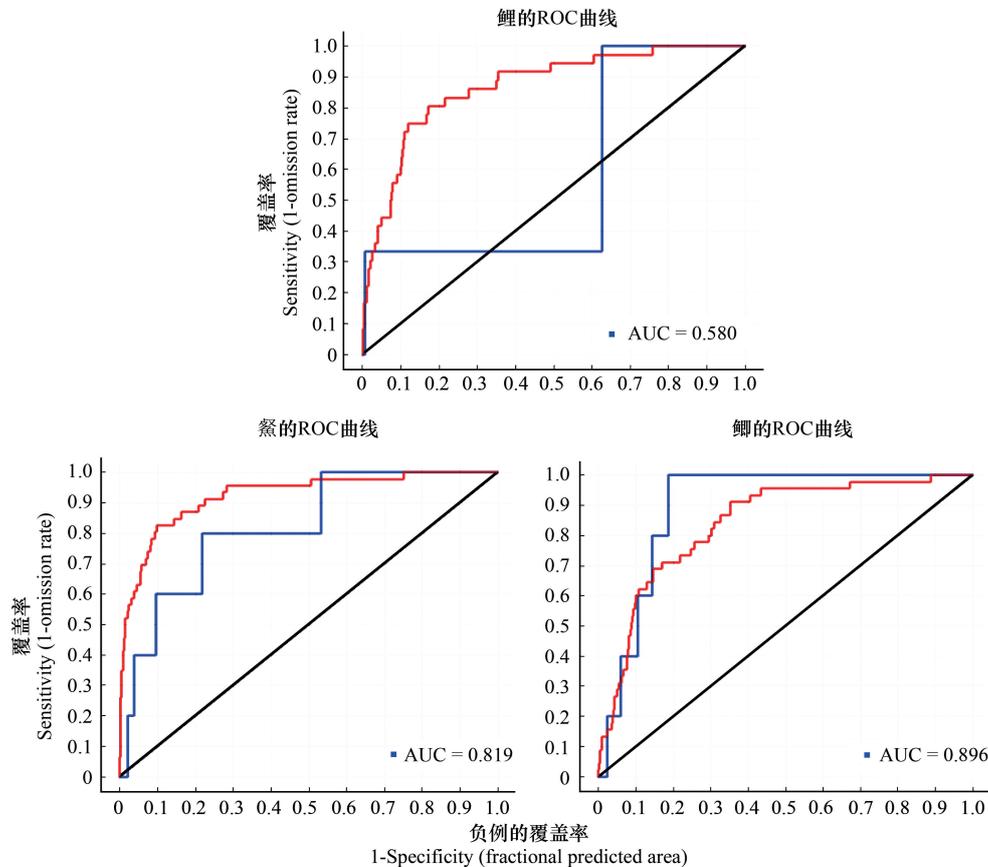


图5 鲤、鲮与鲫的 ROC 曲线

Fig.5 ROC of prediction results for *C. carpio*, *H. leucisculus* and *C. auratus* in Ili River

ROC: 受试者工作特征曲线

3 讨论

3.1 伊犁河流域鱼类群落结构现状

多样性是衡量丰富度和均匀性的综合指标^[20]。喀什河在雅马渡河段汇入伊犁河,又处于城镇居民区,环境因素比较复杂,该断面的鱼类不但有上游支流的溪流冷水性鱼类,还有平原湖泊型鱼类,各种生态类型的鱼类数量分布均匀,因而多样性、均匀度和丰富度都较高。喀什河尼勒克河段河道蜿蜒曲折,地处支流,鱼类主要以溪流冷水性鱼类为主,优势种鱼类占到总优适度的95%以上,因此其均匀度和多样性较小。伊犁河上游支流地处山区,水质清澈,底质以卵石为主,主要鱼类如高原鳅类,新疆裸重唇鱼,斑重唇鱼等的生态类型较相似,均是冷水溪流性鱼类。下游三道河河段水流量较大,地势平坦,水质混浊,人为活动频繁,鱼类组成的主要特点是以广适性的平原鱼类如鲮、鲤等为主,这是与上游河段相似性较低的主要原因。雅马渡河段是二者之间的过渡地带,鱼类组成兼有冷水溪流性鱼类和广适性的平原鱼类。

此次伊犁河鱼类调查与历史记载相比有改变。历史记载中,伊犁河流域共有鱼类32种^[1],本研究中调查到鱼类29种,种类数减少的同时,鱼类组成也发生了变化。历史研究中的银色裂腹鱼、短头鲃、银鲫、鲢、北方泥鳅在本研究中未出现。历史研究中未见的乌鳢与大口鲇在本研究中有捕获,这两种鱼类均分布在下游地区,可能是养殖鱼类逃逸进入伊犁河。土著鱼类新疆高原鳅、斯氏高原鳅以及黑背高原鳅在历史上的分布曾经贯穿于我国伊犁河流域,土著鱼类伊犁鲈主要分布在下游地区,在本研究中显示,这4种土著鱼类的分布范围有向上游迁移的趋势,其中伊犁鲈在下游未捕获,这与其历史记载的分布范围相差较大。这些土著鱼类喜

生活于海拔高、水温低、流速高、溶氧丰富的流水环境。外来鱼类的生境抢占,人为活动引起的水质变化,捕捞等因素,都是土著鱼类分布区域变化的主要原因。

3.2 伊犁河流域主要外来鱼类的适生性

外来鱼类的引入途径主要有水产养殖、观赏渔业、休闲垂钓以及渔业捕捞运输等,其中水产养殖引入的比例占到 50% 以上^[21-22]。目前伊犁河流域的优势种外来鱼类主要有鲤和鲮,这两种鱼类都属于杂食性鱼类,对水体的适应能力极强^[23,24],在我国伊犁河流域主要分布于干流中下游地区。其中鲤一度作为做经济鱼类增殖放流。鲫是一种入侵能力较强的鱼类^[10,24-25],在上个世纪末期,我国境内伊犁河流域鲫的分布主在干流三道河河段以上、特克斯河中下游河段以及巩乃斯河下游河段,本研究中鲫在伊犁河的 6 个采样断面都有出现,甚至出现在历史从未记载的喀什河流域。鲫的自然分布区遍及我国各大水系,适应性极强,产卵季节长^[25-26],这些都是它能够快速生存并建立种群的主要原因,本研究中鲫出现在适生性较低的区域,也从侧面说明了其很强的适应性。

外来物种经历引入-建群-扩散-成为有害种的过程,相邻两阶段间成功率约为 10%,从上一阶段进入下一阶段并最终完成所有阶段成功入侵的概率是很低的^[27],但是人为有目的的引入,会增加这一概率^[28]。鲤、鲮和鲫能够扩散,是反复多次引种且忽视管理的结果。另外生物多样性较高的地区,一般不容易受到外来物种入侵^[28],伊犁河流域鱼类多样性较小,且上游支流河段多样性小于干流河段多样性,因此外来鱼类入侵的可能性较高。

3.3 伊犁河流域土著鱼类资源保护对策

鱼类经历引入-建群-扩散-成为有害种这一过程每个环节所需要的时间和诱因都是不确定的^[25]。在这一过程中的任一环节,环境和人为的诱因都可能使进程加速。鲤、鲮和鲫这几种鱼类在伊犁河流域已经有数十年甚至上百年的定居历史,它们的分布与温度和降水量直接相关。因此在未来,引起气候变化的任一诱因都有可能触发这些鱼类的大面积扩散。伊犁河流域鱼类区系简单,河水流量较小,尤其上游支流河段海拔较高、生境脆弱,河水补给主要依靠冰山融雪,生境一旦遭到破坏很难恢复,较低的多样性使得伊犁河流域成为较易被外来物种入侵生境。人为干扰也是外来鱼类能够成功入侵的重要原因之一。由于过度捕捞,伊犁河流域的土著鱼类减少,造成生态位空缺,外来鱼类被带入之后,抢占这些空缺的生态位,一旦适应之后就会对土著鱼类的生态空间产生压缩,造成土著鱼类生境萎缩,数量减小甚至灭绝。

外来鱼类入侵之后,对土著鱼类的主要影响首先表现在竞争和排斥方面。土著鱼类新疆裸重唇鱼与鲤的营养级结构相似^[29],鲤的引入对新疆裸重唇鱼来说无疑是一个威胁,除了在食物上的竞争外,还有对产卵场地,生存空间的侵占。新疆裸重唇鱼、斑重唇鱼等土著鱼类对于产卵繁殖的条件要求比较高,产卵生境受到侵占,会直接影响到种群补充,引起种群萎缩^[30]。研究表明,在引入鲤、鲫等鱼类之后,银色裂腹鱼的生境受到挤压,再加上过度捕捞,其种群数量急剧减小直至濒临灭绝^[7]。外来鱼类对土著鱼类的影响还表现在捕食方面^[31]。土著鱼类的受精卵被鲮掠食,将减小其种群补充,导致种群数量下降。另外,鲫的入侵,会带来细菌、寄生虫等病原体,感染土著鱼类^[32-33]。除此之外,外来鱼类入侵,还可能会造成基因污染,在土著种的基因中通过杂交掺进了外来鱼类的基因,继而增殖、扩散,这种基因污染一旦发生是无法清除的^[31],外来物种也通过杂交获取本土物种的基因,从而更加容易成功入侵^[34]。

因此,在外来鱼类管理方面,应关注外来鱼类的生活史对策,进一步研究外来鱼类的入侵机制和诱因,考虑到鲫的入侵能力和实际扩散能力,应将其作为重点关注种类;对上游支流河段的生境进行监测,关注气候和水文变化,尤其是土著鱼类产卵场、索饵场和越冬场的变化,尽可能减小人类活动干扰;对伊犁河流域的鱼类资源进行长期监测,关注鱼类群落结构变化,一旦发现异常及时采取措施;增加对土著鱼类的增殖放流;严格控制进出口贸易和增殖放流时夹带的外来鱼类。以上这些措施对有效地维护伊犁河流域的生态安全具有十分重要的意义。

参考文献 (References):

- [1] 任慕莲, 郭焱, 张清礼, 张人铭, 李红, 阿达克, 蔡林刚, 永卫东, 任波, 高宏. 伊犁河鱼类资源及渔业. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1998: 82-86.
- [2] 李红, 张人铭, 蔡林刚, 郭焱. 伊犁河经济鱼类的开发与保护. 干旱区研究, 1999, 16(4): 14-18.
- [3] 郭焱, 张人铭, 蔡林刚. 新疆鱼类志. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2012: 100-101.
- [4] Mamilov N S, Balabieva G K, Koishybaeva G S. Distribution of alien fish species in small waterbodies of the Balkhash basin. *Russian Journal of Biological Invasions*, 2010, 1(3): 181-186.
- [5] 李思忠, 戴定远, 张世义, 马桂珍, 何振威, 高顺典. 新疆北部鱼类的调查研究. *动物学报*, 1966, 18(1): 41-56.
- [6] 李尽梅. 伊犁河流域鱼类资源衰退的原因与对策. *中国水产*, 2006, (3): 74-75.
- [7] 郭焱, 蔡林刚, 张人铭, 阿达克. 伊犁河(中国境内)土著鱼类的分布与演化. 干旱区研究, 1999, 16(2): 31-35.
- [8] 蔡林刚, 牛建功, 刘春池, 邹明, 谢鹏, 阿达克·白克, 刘建, 李红. 新疆伊犁河不同河段鱼类的物种多样性和优势种. *水生生物学报*, 2017, 41(4): 819-826.
- [9] Jaynes E T. Information theory and statistical mechanics. *Physical Review*, 1957, 106(4): 620-630.
- [10] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [11] 罗翀, 徐卫华, 周志翔, 欧阳志云, 张路. 基于生态位模型的秦岭山系林麝生境预测. *生态学报*, 2011, 31(5): 1221-1229.
- [12] 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 肖启明, 戴良英. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用. *生物多样性*, 2007, 15(4): 365-372.
- [13] 张颖, 李君, 林蔚, 强胜. 基于最大熵生态位元模型的入侵杂草春飞蓬在中国潜在分布区的预测. *应用生态学报*, 2011, 22(11): 2970-2976.
- [14] 张丹华, 胡远满, 刘焱. 基于 Maxent 生态位模型的互花米草在我国沿海的潜在分布. *应用生态学报*, 2019, 30(7): 2329-2337.
- [15] 崔绍朋, 罗晓, 李春旺, 胡慧建, 蒋志刚. 基于 MaxEnt 模型预测白唇鹿的潜在分布区. *生物多样性*, 2018, 26(2): 171-176.
- [16] 贾翔, 马芳芳, 周旺明, 周莉, 于大炮, 秦静, 代力民. 气候变化对阔叶红松林潜在地理分布区的影响. *生态学报*, 2017, 37(2): 464-473.
- [17] 马倩倩, 刘彤, 董合干, 赵文轩, 王寒月, 王瑞丽. 采用多尺度数据源预测豚草在新疆的潜在分布. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(9): 188-193.
- [18] 余慧燕, 孙长奎, 霍翔, 胡建利, 祁贤, 许可, 黄昊頔, 鲍倡俊. 基于生态位模型的人感染 H7N9 禽流感病毒潜在风险区预测分析. *现代预防医学*, 2019, 46(2): 206-210, 229-229.
- [19] Yu D, Chen M, Zhou Z C, Eric R, Tang Q Y, Liu H Z. Global climate change will severely decrease potential distribution of the East Asian coldwater fish *Rhynchocypris oxycephalus* (Actinopterygii, Cyprinidae). *Hydrobiologia*, 2013, 700(1): 23-32.
- [20] 孙儒泳. 普通生态学. 北京: 高等教育出版社, 1993: 135-137.
- [21] 酃珊, 陈家宽, 王小明. 淡水鱼类入侵种的分布、入侵途径、机制与后果. *生物多样性*, 2016, 24(6): 672-685.
- [22] Gozlan R E, Britton J R, Cowx I, Copp G H. Current knowledge on non-native freshwater fish introductions. *Journal of Fish Biology*, 2010, 76(4): 751-786.
- [23] 乐佩琦. 中国动物志-下卷-硬骨鱼纲, 鲤形目. 北京: 科学出版社, 2000: 410-413.
- [24] 陈宜瑜. 中国动物志-中卷-硬骨鱼纲, 鲤形目. 北京: 科学出版社, 1998: 164-166.
- [25] Humphrey J D, Ashburner L D. Spread of the bacterial fish pathogen *Aeromonas salmonicida* after importation of infected goldfish, *Carassius auratus*, into Australia. *Australian Veterinary Journal*, 1993, 70(12): 453-454.
- [26] 张熙鹭, 隋晓云, 吕植, 陈毅峰. 基于 Maxent 的两种入侵性鱼类(麦穗鱼和鲫)的全球适生区预测. *生物多样性*, 2014, 22(2): 182-188.
- [27] Williamson M, Fitter A. The varying success of invaders. *Ecology*, 1996, 77(6): 1661-1666.
- [28] 潘勇, 曹文宣, 徐立蒲, 殷守仁, 白璐. 鱼类入侵的过程、机制及研究方法. *应用生态学报*, 2007, 18(3): 687-692.
- [29] 牛玉娟, 任道全, 陈生熬, 蔡林刚, 牛建功, 谢从新. 伊犁河三支流新疆裸重唇鱼的生长特性研究. *水生态学杂志*, 2015, 36(6): 59-65.
- [30] 蔡林刚, 牛建功, 李红, 刘建. 巩乃斯河新疆裸重唇鱼和斑重唇鱼产卵场微环境研究. *干旱区研究*, 2013, 30(1): 144-148.
- [31] Kolar C S, Lodge D M. Ecological predictions and risk assessment for alien fishes in North America. *Science*, 2002, 298(5596): 1233-1236.
- [32] Gozlan R E, St-Hilaire S, Feist S W, Martin P, Kent M L. Disease threat to European fish. *Nature*, 2005, 435(7045): 1046.
- [33] 高宇, 刘鉴毅, 张婷婷, 冯广朋, 张涛, 杨刚, 庄平. 水产养殖逃逸对长江外来种入侵影响: 以鲟鱼为例. *生态学杂志*, 2017, 36(6): 1739-1745.
- [34] 万宣伍, 刘映红, 罗林明, 封传红, 王胜, 马利. 基于分子生物学方法的外来入侵物种入侵历史重构. *生态学报*, 2015, 35(4): 1296-1309.