

汉江流域有毒鱼类区系分布特征

王 俊¹, 孙智薇¹, 白舒丹², 王文博², 令建康³, 唐文家⁴

1. 西安理工大学, 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048

2. 咸阳师范学院生命科学系, 陕西 咸阳 712000

3. 青海师范大学地理科学学院, 青海 西宁 810008

4. 青海省环境监测中心, 青海 西宁 810000

摘要: 准确辨识有毒鱼类区系分布是研究有毒鱼类生态适应情况的前提。基于野外调查数据和历史资料, 对汉江有毒鱼类的区系组成、毒性类型、食性和空间分布进行了分析。结果表明, 汉江流域分布有58种有毒鱼类, 占鱼类总物种数的46.77%。58种有毒鱼类隶属于6目10科33属, 以鲤形目、鲇形目和鲈形目为主。汉江流域有毒鱼类毒性类型包括胆毒(31种)、刺毒(23种)、血清毒(2种)、卵毒(1种)和肝脏毒(1种); 食性主要以肉食性和无脊椎动物食性为主, 分别占有毒鱼类总物种数的37.93%和29.31%。在空间分布上, 上游河段有毒鱼类物种数显著多于中下游河段。其中, 大鳞黑线鲃(*Atrilinea macrolepis*)、齐口裂腹鱼(*Schizothorax prenanti*)、司氏鲃(*Liobagrus styani*), 以及拟鲃属的乌苏里拟鲃(*Pseudobagrus ussuriensis*)、细体拟鲃(*Pseudobagrus pratti*)、盩堂拟鲃(*Pseudobagrus ondon*)、凹尾拟鲃(*Pseudobagrus emarginatus*)等7种有毒鱼类仅分布于汉江上游河段, 圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*)和白缘鲃(*Liobagrus marginatus*)2种有毒鱼类仅分布在中游河段, 长江鲟(*Acipenser dabryanus*)仅分布在下游及河口江段。Jaccard相似性指数分析结果表明, 各江段有毒鱼类的物种组成相似性较高。ANOSIM(Analysis of Similarities)检验分析结果显示, $Global R = 0.99 (P < 0.01)$, 表明各江段有毒鱼类的毒性类型存在显著的空间差异。研究结果可为淡水有毒鱼类资源保护与利用及有毒动物生态适应演化研究提供基础数据。

关键词: 汉江流域; 有毒鱼类; 食性特征; 分布格局

中图分类号: X826 文献标志码: A 文章编号: 1002-6002(2025)01-0111-10

DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2025.01.12

Distribution Characteristics of Ichthyotoxic Fishes Fauna in the Hanjiang River Basin

WANG Jun¹, SUN Zhiwei¹, BAI Shudan², WANG Wenbo², LING Jiankang³, TANG Wenjia⁴

1. State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

2. Department of Life Sciences, Xianyang Normal University, Xianyang 712000, China

3. School of Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China

4. Qinghai Ecological Environment Monitoring Center, Xining 810000, China

Abstract: Accurate identification of ichthyotoxic fish zonal distribution is a prerequisite for studying the ecological adaptation of ichthyotoxic fish. This study analysed the composition of the ichthyotoxic fish fauna, toxicity types, food habits and spatial distribution of ichthyotoxic fish in the Hanjiang River Basin by combining historical information and field survey data. The results showed that 58 ichthyotoxic fish species from 33 genera, 10 families and 6 orders were found in the river basin, which accounted for 46.77% of the total species of fishes, with Cypriniformes, Siluriformes and Perciformes as the main orders. There were 5 ichthyotoxic fish toxicity types in the Hanjiang River Basin, including gall-bladder poisonous fishes (31 species), acanthotoxic fishes (23 species), ichthyohemotoxic fishes (2 species), ichthyootoxic fishes (1 species) and ichthyohepatotoxic fishes (1 species). In addition, the trophic guilds were mainly concentrated on carnivorous and invertebrate feeding guild, accounting for 37.93% and 29.31% of the poisonous fish species, respectively. In spatial distribution level, the number of poisonous fish species in the upper reaches was significantly higher than that in the middle and lower reaches. Seven species of ichthyotoxic fishes, including *Atrilinea macrolepis*, *Schizothorax prenanti*, *Liobagrus styani*, *Pseudobagrus ussuriensis*, *Pseudobagrus pratti*, *Pseudobagrus*

收稿日期: 2023-04-04; 修订日期: 2024-05-29

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2023-JC-YB-325, 2024JC-YBQN-0237); 中国博士后科学基金项目(2023MD744253)

第一作者简介: 王 俊(1988-), 男, 湖北武汉人, 博士, 讲师。

通讯作者: 唐文家

ondon and *Pseudobagrus emarginatus*, were distributed only in the upper reaches of the Hanjiang River Basin. *Coreius guichenoti* and *Liobagrus marginatus* were found only in the middle segment. *Acipenser dabryanus* was distributed only in the lower and estuaries reaches of the Hanjiang River Basin. The Jaccard's similarity index analysis showed that the distribution of ichthyotoxic fish fauna was very similar. And the ANOSIM (Analysis of Similarities) test showed that Global $R=0.99$ ($P<0.01$), indicating that there were significant spatial differences in the toxicity types of ichthyotoxic fish in each river section. This result could provide significant reference meanings for the exploitation and utilization of freshwater ichthyotoxic fishes and the study on ecological adaptation evolution of poisonous animals.

Keywords: Hanjiang River Basin; ichthyotoxic fishes; feeding traits; distribution pattern

生物毒素是生物在自然界长期生存竞争和不断适应环境过程中演化出的特殊复杂性状^[1],是一种十分重要的生命现象^[2]。其中,动物毒液系统一直是进化生态学的研究热点^[1-3],尤其是两栖爬行类和昆虫纲等自带毒液的生物^[4-7]。近年来,动物毒液系统相关研究在生物化学、基因组学、生理行为学和药理学等方面取得了突破性的进展^[8-12],然而在动物毒液系统适应性进化生态学机制方面的研究仍然较为匮乏。毒液系统作为生物特殊的关键适应性状,在生物种内及种间的生存、竞争、捕食和生殖等方面具有至关重要的作用^[2-3,13]。此外,揭示毒液系统的进化生态学特征(形态适应、行为特征、自然警示和生态位空间等),需要基于大尺度、多类群的有毒物种资源空间分布数据,以便建立有毒物种的种质资源清单。因此,阐明有毒动物区系分布特征对构建生物毒液系统资源库有着重要的理论和实践意义。

有毒鱼类(Ichthyotoxic Fishes)是指鱼体内某些器官或组织含有毒素,或其组织能够分泌毒素的鱼类^[14]。近期的相关研究表明,有毒鱼类的数量被严重低估,现今至少分布有2 000种有毒辐鳍鱼类和软骨鱼类^[15]。目前,有毒鱼类研究主要集中在海洋鱼类,研究内容相对广泛,如新药研发^[16]、毒性机理^[17]、生态适应^[1]、鱼类区系^[18]等。但是,对淡水有毒鱼类的认知非常匮乏。国内最早系统开展的淡水有毒鱼类研究是从伍汉霖等编著的《中国有毒鱼类和药用鱼类》^[19]开始的,其描述了鲤科有毒鱼类的物种特征,认为吞服鲤科有毒鱼类鱼胆存在潜在危险^[19-20]。此后,国内学者从淡水胆毒鱼类组成^[20]、有毒鱼类区系分布^[21]、刺毒鱼毒素^[22]、卵毒鱼毒素^[23]、有毒鱼类风险评估体系^[24]等方面作了零星研究。然而,在淡水有毒鱼类区系研究中,从流域有毒鱼类的分布和食性特征的视角阐明有毒鱼类区系的研究却鲜有文献记载。

汉江是长江流域最大的一级支流,发源于陕

西省宁强县,流经汉中、安康、十堰、襄阳、荆门等地,于武汉汇入长江。汉江干流全长1 577 km,总落差1 964 m,流域面积约15.9万km²。流域内河流密布,沟壑交织,大小河流及其支流呈叶脉状水网格局。目前,汉江流域共记载分布有124种鱼类,其中包括25种产漂流性卵鱼类[青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)、鳊(*Hypophthalmichthys nobilis*)、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Elopichthys bambusa*)、鳊(*Ochetobius elongatus*)、鳊(*Luciobrama macrocephalus*)等]和2种珍稀鱼类[秦岭细鳞鲑(*Brachymystax lenok*)、川陕哲罗鲑(*Hucho bleekeri*)]。汉江流域是长江流域鱼类生物多样性维持和保护的关键热点区域,同时也是引汉济渭工程、南水北调中线工程和鄂北水资源配置工程的重要水源地,其河流生态系统健康对流域经济社会发展至关重要。

目前,有关汉江鱼类的研究主要聚焦于鱼类群落^[25]、物种多样性^[26]、早期资源^[27]及产卵场分布^[28]等方面,有关汉江有毒鱼类区系分布特征的研究尚未见报道。因此,本文结合汉江流域鱼类历史分布数据和野外实地调查资料,分析了汉江流域有毒鱼类的空间分布特征,总结了有毒鱼类的食性特征,探讨了汉江流域有毒鱼类区系分布特征的可能性成因,以为淡水有毒鱼类资源开发利用及有毒动物生态适应演化研究提供一定的基础支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域

汉江干流流经陕、鄂两省,支流延展至甘、川、渝、豫4省(市)。流域内地势西高东低,西部为秦巴山地,中部为南襄盆地及周缘丘陵,东部为江汉平原。依据流域地势地貌特征,将汉江流域划分为3段(图1):上游河段为源头至丹江口区域,

流域面积为 95 200 km²,河道长 925 km;中游河段为丹江口至钟祥区域,流域面积为 46 800 km²,河

道长 270 km;下游河段为钟祥至汉口河段,流域面积为 17 000 km²,全长 382 km。

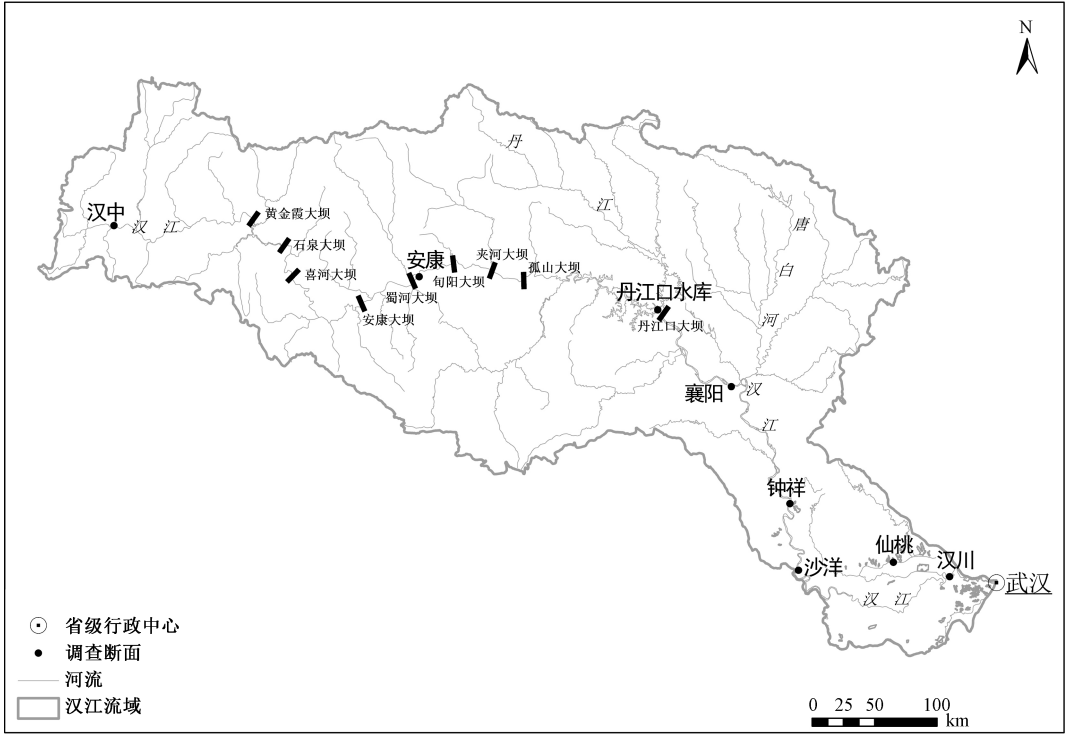


图 1 汉江流域水系及鱼类采样点分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the distribution of river system and fish sampling sites in the Hanjiang River Basin

1.2 数据来源

本研究用数据集来源于鱼类群落历史分布资料^[29-40]和野外调查资料,所有数据集均基于相关鱼类有/无分布。各时段的调查方法一致,均使用定置刺网、虾笼、流刺网等工具。本研究开展的野外调查分别为:①2011年4月和9月,对汉中、安康河段及其支流进行渔获物资源调查;②2012年6月和2016年5月,两次对丹江口水库和襄阳、钟祥、沙洋、仙桃、汉川等河段进行渔获物资源调查。调查方式是在每个河段使用3~5张定置刺网(长50 m,高1.5 m,网目5 cm)和1~3张流刺网(长100 m,高2 m,网目4 cm)捕捞鱼类,同时辅以小钩和虾笼等方式。各河段的调查时长为2~3 d。现场进行渔获物鉴定,测量鱼类体长和体重数据。对于未能鉴定识别的物种,使用福尔马林溶液(10%浓度)固定,带回实验室内进行物种复核鉴定。鱼类样本鉴定参考《秦岭鱼类志》^[31]和《陕西鱼类志》^[33]。

1.3 数据分析

1.3.1 汉江流域有毒鱼类的种类组成

鱼类毒性类型划分依据《中国有毒及药用鱼

类新志》^[41]和相关参考文献^[19-23]。有毒鱼类的分布按照物种分类阶元和河段进行整理分析。

1.3.2 汉江流域有毒鱼类的食性划分

有毒鱼类的毒性与食性存在一定关联,因此,参考同资源种团的概念^[42]统计分析汉江有毒鱼类的食性类型,划分依据主要参考相关文献和书籍^[31,33]。

1.3.3 汉江流域各江段有毒鱼类分布的相似性

基于各河段的有毒鱼类有/无分布数据构建矩阵,计算对应河段有毒鱼类分布的相似性。参考嘉陵江有毒鱼类相似性分析方法^[21],运用Jaccard相似性指数来量度各河段的有毒鱼类物种组成相似性。计算公式如下:

$$IS_j = \frac{a}{a + b + c} \quad (1)$$

式中: a 为两河段共有物种数, b 为第一江段物种数, c 为第二江段物种数。

1.3.4 汉江流域有毒鱼类空间分布的差异性检验

为检验不同河段的不同类型有毒鱼类在空间分布上是否存在差异,运用相似性分析(Analysis

of Similarity, ANOSIM)方法,对不同河段有毒鱼类群落的差异性进行检验。使用 PRIMER6.0 软件包进行显著性检验,利用 Excel 2013 进行数据统计和分析。显著性水平设置为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 有毒鱼类的种类组成

历史资料数据和野外调查结果表明,汉江流域共分布有毒鱼类 58 种,隶属于 6 目 10 科 33

属,占汉江鱼类总物种数的 46.77%。有毒鱼类分布于鲤形目 (Cypriniformes)、鲇形目 (Siluriformes)、鲈形目 (Perciformes)、鳊鲃目 (Anguilliformes)、鲟形目 (Acipenseriformes) 和合鳃目 (Synbranchiformes) 等 6 个目,占汉江鱼类总目数的 54.55%。其中:鲤形目有毒鱼类种类最多,有 32 种,占有毒鱼类物种数的 55.17%;其次是鲇形目,有 19 种,占有毒鱼类物种数的 32.76%。此外,鲈形目有 4 种,鳊鲃目、鲟形目和合鳃目各有 1 种(表 1)。

表 1 汉江流域有毒鱼类在各分类阶元的分布

Table 1 Distribution of ichthyotoxic fishes in the Hanjiang River Basin at different taxonomy level

有毒鱼类	拉丁学名	目	科	属	毒性类型
长江鲟	<i>Acipenser dabryanus</i>	鲟形目	鲟科	鲟属	肝脏毒性
日本鳊鲃	<i>Anguilla japonica</i>	鳊鲃目	鳊鲃科	鳊鲃属	血清毒性
青鱼	<i>Mylopharyngodon piceus</i>	鲤形目	鲤科	青鱼属	胆毒性
草鱼	<i>Ctenopharyngodon idella</i>	鲤形目	鲤科	草鱼属	胆毒性
赤眼鲮	<i>Squaliobarbus curriculus</i>	鲤形目	鲤科	赤眼鲮属	胆毒性
鳊	<i>Elopichthys bambusa</i>	鲤形目	鲤科	鳊属	胆毒性
鳊	<i>Ochetobius elongatus</i>	鲤形目	鲤科	鳊属	胆毒性
鳊	<i>Luciobrama macrocephalus</i>	鲤形目	鲤科	鳊属	胆毒性
圆吻鲮	<i>Distoechodon tumirostris</i>	鲤形目	鲤科	鲮属	胆毒性
细鳞鲮	<i>Plagiognathops microlepis</i>	鲤形目	鲤科	鲮属	胆毒性
银鲮	<i>Xenocypris macrolepis</i>	鲤形目	鲤科	鲮属	胆毒性
黄尾鲮	<i>Xenocypris davidi</i>	鲤形目	鲤科	鲮属	胆毒性
达氏鲃	<i>Culter dabryi</i>	鲤形目	鲤科	鲃属	胆毒性
红鳍原鲃	<i>Culter erythropterus</i>	鲤形目	鲤科	原鲃属	胆毒性
蒙古鲃	<i>Erythroculter mongolicus</i>	鲤形目	鲤科	红鲃属	胆毒性
翘嘴鲃	<i>Erythroculter ilishaeformis</i>	鲤形目	鲤科	红鲃属	胆毒性
拟尖头鲃	<i>Erythroculter oxycephaloides</i>	鲤形目	鲤科	红鲃属	胆毒性
尖头鲃	<i>Erythroculter oxycephaloides</i>	鲤形目	鲤科	红鲃属	胆毒性
团头鲂	<i>Megalobrama amblycephala</i>	鲤形目	鲤科	鲂属	胆毒性
三角鲂	<i>Megalobrama terminalis</i>	鲤形目	鲤科	鲂属	胆毒性
鳊	<i>Parabramis pekinensis</i>	鲤形目	鲤科	鳊属	胆毒性
大鳞黑线鲢	<i>Atrilinea macrolepis</i>	鲤形目	鲤科	黑线鲢属	胆毒性
贝氏鲢	<i>Hemiculter bleekeri</i>	鲤形目	鲤科	鲢属	胆毒性
鲢	<i>Hemiculter leucisculus</i>	鲤形目	鲤科	鲢属	胆毒性
吻鲃	<i>Rhinogobio typus</i>	鲤形目	鲤科	吻鲃属	胆毒性
圆筒吻鲃	<i>Rhinogobio cylindricus</i>	鲤形目	鲤科	吻鲃属	胆毒性
长鳍吻鲃	<i>Rhinogobio ventralis</i>	鲤形目	鲤科	吻鲃属	胆毒性
铜鱼	<i>Coreius heterodon</i>	鲤形目	鲤科	铜鱼属	胆毒性
圆口铜鱼	<i>Coreius guichenoti</i>	鲤形目	鲤科	铜鱼属	胆毒性
齐口裂腹鱼	<i>Schizothorax prenanti</i>	鲤形目	鲤科	裂腹鱼属	卵毒性
鲤	<i>Cyprinus carpio</i>	鲤形目	鲤科	鲤属	胆毒性
鲫	<i>Carassius auratus</i>	鲤形目	鲤科	鲫属	胆毒性
鳊	<i>Hypophthalmichthys nobilis</i>	鲤形目	鲤科	鳊属	胆毒性
鲢	<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	鲤形目	鲤科	鲢属	胆毒性
鲇	<i>Silurus asotus</i>	鲇形目	鲇科	鲇属	刺毒性
大口鲇	<i>Silurus meridionalis</i>	鲇形目	鲇科	鲇属	刺毒性
瓦氏黄颡鱼	<i>Pelteobagrus vachelli</i>	鲇形目	鲇科	黄颡鱼属	刺毒性
黄颡鱼	<i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	鲇形目	鲇科	黄颡鱼属	刺毒性
光泽黄颡鱼	<i>Pelteobagrus nitidus</i>	鲇形目	鲇科	黄颡鱼属	刺毒性
粗唇鲃	<i>Leiocassis crassilabris</i>	鲇形目	鲇科	鲃属	刺毒性
长吻鲃	<i>Leiocassis longirostris</i>	鲇形目	鲇科	鲃属	刺毒性

续表

有毒鱼类	拉丁学名	目	科	属	毒性类型
叉尾鲛	<i>Leiocassis tenuifurcatus</i>	鲑形目	鲑科	鲛属	刺毒性
乌苏里拟鲮	<i>Pseudobagrus ussuriensis</i>	鲑形目	鲑科	拟鲮属	刺毒性
细体拟鲮	<i>Pseudobagrus pratti</i>	鲑形目	鲑科	拟鲮属	刺毒性
盎堂拟鲮	<i>Pseudobagrus ondon</i>	鲑形目	鲑科	拟鲮属	刺毒性
凹尾拟鲮	<i>Pseudobagrus emarginatus</i>	鲑形目	鲑科	拟鲮属	刺毒性
圆尾拟鲮	<i>Pseudobagrus tenuis</i>	鲑形目	鲑科	拟鲮属	刺毒性
切尾拟鲮	<i>Pseudobagrus truncatus</i>	鲑形目	鲑科	拟鲮属	刺毒性
大鳍鲮	<i>Hemibagrus macropterus</i>	鲑形目	鲑科	鲮属	刺毒性
拟缘缺	<i>Liobagrus marginatoides</i>	鲑形目	钝头鲮科	缺属	刺毒性
白缘缺	<i>Liobagrus marginatus</i>	鲑形目	钝头鲮科	缺属	刺毒性
司氏缺	<i>Liobagrus styani</i>	鲑形目	钝头鲮科	缺属	刺毒性
中华纹胸鮡	<i>Glyptothorax sinensis</i>	鲑形目	鮡科	纹胸鮡属	刺毒性
黄鲮	<i>Monopterus albus</i>	合鳃目	合鳃科	黄鲮属	血清毒性
鳊	<i>Siniperca chuatsi</i>	鲈形目	鲈科	鳊属	刺毒性
大眼鳊	<i>Siniperca knerii</i>	鲈形目	鲈科	鳊属	刺毒性
斑鳊	<i>Siniperca scherzeri</i>	鲈形目	鲈科	鳊属	刺毒性
刺鲃	<i>Mastacembelus aculeatus</i>	鲈形目	刺鲃科	刺鲃属	刺毒性

在科级分类水平,汉江有毒鱼类分布于 10 个科:鲤科(Cyprinidae)、鲮科(Bagridae)、钝头鲮科(Amblycipitidae)、鲈科(Serranidae)、鲑科(Siluridae)、鮡科(Sisoridae)、鲟科(Acipenseridae)、鳗鲡科(Anguillidae)、合鳃科(Synbranchidae)和刺鲃科(Mastacembelidae)。有毒鱼类科数占汉江鱼类总科数的 38.46%。其中:鲤科有毒鱼类最多,有 32 种,占汉江有毒鱼类物种数的 55.17%;鲮科次之,有 13 种,占有毒鱼类物种数的 22.41%;钝头鲮科和鲈科各有 3 种有毒鱼类,均占汉江有毒鱼类物种数的 5.17%;鲑科包含 2 种有毒鱼类,占汉江有毒鱼类物种数的 3.45%;其余各科均含有 1 种有毒鱼类(表 1)。

在属级分类水平,汉江 58 种有毒鱼类隶属于 33 个属,占汉江鱼类总属数的 39.02%。其中:拟鲮属(*Pelteobagrus*)有毒鱼类物种数最多,有 6 种,占汉江有毒鱼类物种数的 10.34%;其次为红鲃属(*Erythroculter*)和鲃属(*Xenocypris*),均有 4 种,各占有毒鱼类物种数的 6.90%;吻鲃属(*Rhinogobio*)、鳊属(*Siniperca*)、黄颡鱼属(*Pelteobagrus*)和缺属(*Liobagrus*)各有 3 种有毒鱼类,各占汉江有毒鱼类物种数的 5.17%;鲃属(*Megalobrama*)、鲮属(*Hemiculter*)、铜鱼属(*Coreius*)和鲑属(*Silurus*)各包含 2 种有毒鱼类,均占汉江有毒鱼类物种数的 3.45%;其余各属均只含有 1 种有毒鱼类(表 1)。

2.2 有毒鱼类的毒素类型

汉江流域有毒鱼类包含 5 种毒素类型:胆毒、

刺毒、血清毒、肝脏毒和卵毒。以胆毒和刺毒鱼类为最多,分别占有毒鱼类物种数的 53.45% (31 种)和 39.66% (23 种);血清毒鱼类有 2 种,占比为 3.45%;肝脏毒性和卵毒性鱼类各有 1 种,占比均为 1.72% (图 2)。

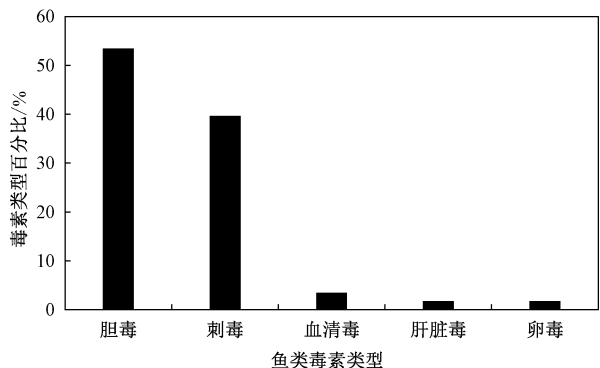


图 2 汉江流域有毒鱼类毒素种类分布
Fig. 2 Distribution of toxic fish toxins in the Hanjiang River Basin

2.3 有毒鱼类的食性特征

汉江流域有毒鱼类食性类型包含 8 种:鱼食性、无脊椎动物食性、杂食性、着生藻类食性、草食性、浮游动物食性、浮游植物食性和软体动物食性。其中:鱼食性有毒鱼类物种数最多,有 22 种,占有毒鱼类总物种数的 37.93%;其次为无脊椎动物食性,有 17 种,占比为 29.31%;再次是杂食性,有 7 种,占比为 12.07%;着生藻类食性有 5 种,占比为 8.62%;草食性有 4 种,占比为 6.90%;剩余为浮游动物食性、浮游植物食性和软体动物食性,各有 1 种(图 3)。

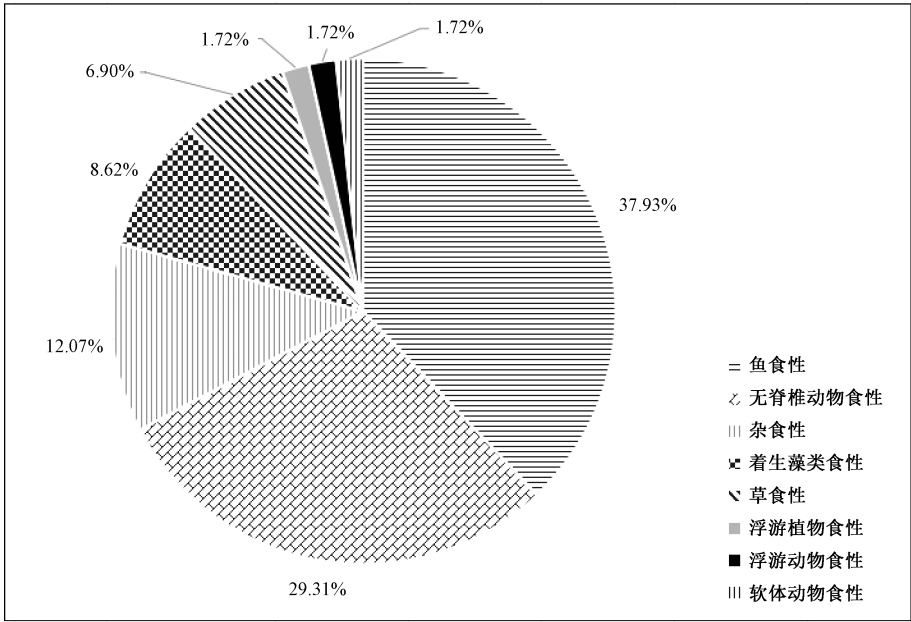


图3 汉江流域有毒鱼类食性类型划分

Fig. 3 Classification of trophic guild for the ichthyotoxic fishes in the Hanjiang River Basin

研究显示,胆毒鱼类在8种食性类型中均有分布;刺毒鱼类包含鱼食性、无脊椎动物食性和杂食性3种类型;血清毒鱼类仅包含1种食性类型,为鱼食性;卵毒和肝脏毒鱼类的食性类型分别为着生藻类食性和无脊椎动物食性(图4)。

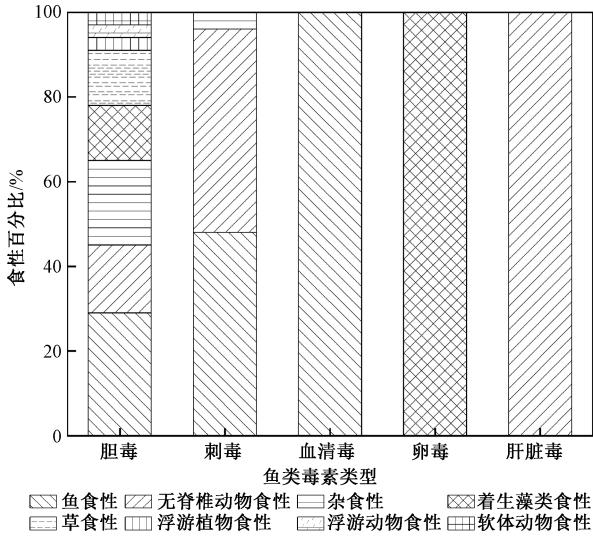


图4 汉江流域不同类型有毒鱼类的食性类型分布

Fig. 4 Distribution of trophic guild for each ichthyotoxic fish type in the Hanjiang River Basin

2.4 有毒鱼类的空间分布特征

统计结果显示,汉江流域上、中、下游分别有105、80、88种鱼类(表2)。其中:上游分布有有

毒鱼类54种,占该江段鱼类总物种数的51.43%;中游和下游分别有43和46种,各占所在江段鱼类总物种数的53.75%和52.27%。大鳞黑线鲢(*Atrilinea macrolepis*)、齐口裂腹鱼(*Schizothorax prenanti*)、司氏鲃(*Liobagrus styani*),以及拟鲢属的乌苏里拟鲃(*Pseudobagrus ussuriensis*)、细体拟鲃(*Pseudobagrus pratti*)、盎堂拟鲃(*Pseudobagrus ondon*)、凹尾拟鲃(*Pseudobagrus emarginatus*)等7种有毒鱼类仅分布于上游河段;圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*)和白缘鲃(*Liobagrus marginatus*)2种有毒鱼类仅分布于中游河段;长江鲟(*Acipenser dabryanus*)仅分布于下游及河口江段。

表2 汉江流域有毒鱼类在不同江段的分布
Table 2 Distribution of ichthyotoxic fishes in different sections in the Hanjiang River Basin

江段	鱼类总物种数/种	有毒鱼类物种数/种	有毒鱼类种类占比/%
上游	105	54	51.43
中游	80	43	53.75
下游	88	46	52.27

汉江流域各江段有毒鱼类中,上游和中游共有的有毒鱼类物种数为41种,中游和下游共有的有毒鱼类物种数为38种,上游和下游共有的有毒鱼类物种数为44种。Jaccard相似性指数分析结果表明:有毒鱼类在上游和中游江段的分布的相

似性指数为 84.54%,在上游和下游江段的分布的相似性指数为 88.00%,在中游和下游江段的分布的相似性指数为 85.39% (表 3)。ANOSIM 检验结果显示,Global $R = 0.99$ ($P < 0.01$),表明各江段有毒鱼类毒性类型存在显著差异。

表 3 汉江流域各江段共有有毒鱼类物种数及有毒鱼类在各江段间的分布相似性

Table 3 Number of shared ichthyotoxic fishes and similarity in percentage between different sections in the Hanjiang River Basin

江段	上游	中游	下游
上游		84.54	88.00
中游	41		85.39
下游	44	38	

注:对角线以下为共有物种数,单位为种;对角线以上为相似性指数,单位为%。

3 讨论

3.1 汉江流域有毒鱼类分类阶元分布特征

汉江流域共分布有毒鱼类 58 种,隶属于 6 目 10 科 33 属,有毒鱼类物种数量占鱼类总物种数的 46.77%,其中在目级水平的占比为 54.55%,在科级水平为 38.46%,在属级水平为 39.02%。在分类阶元上,从高阶到低阶分类单元,有毒鱼类占比表现为先降低后增加的趋势。此种现象与淡水鱼类区系组成的关联性较高^[21,31,33]。汉江鱼类属于典型的长江中游鱼类区系,鱼类分布以鲤形目和鲇形目为主。同时,汉江地处秦巴山区,是平鳍鳅科 (Balitoridae)、鮡科、钝头鮡科等南方鱼类的分布最北限。整体上,汉江流域有毒鱼类分布与其区系组成高度一致。此外,由于汉江流域鱼类区系在各河段的分布相似性较高,流域内有毒鱼类的物种组成的相似性也较高,以鲤科、鲇科 (或鮠科) 和鮡科为主。上述研究结果与中国淡水有毒鱼类的分类阶元分布高度吻合,即淡水有毒鱼类以鲤科鱼类为主^[31,33]。然而,与同属长江一级支流的嘉陵江相比,汉江有毒鱼类物种数多出 40 余种,其原因主要是本研究参考伍汉霖等^[19,41]的有毒鱼类划分方法,将亲缘发育关系较近、体型相似、生态位分化无差异的物种与已报道的近缘毒性鱼类划分为同一毒性类型。现今发现的 2 000 多种有毒鱼类中^[15],几乎有一半以上是通过物种亲缘关系、外部形态结构及内部毒性构造来判定的,所以本研究判定的有毒鱼类分类合理、可信。现有胆毒鱼类研究文献仅记

载了 12 种胆毒鱼类^[20],同属种鱼类往往只有一种或几种被确定为有毒鱼类,而与其生活习性和生态类型相似的其他同属种鱼类却通常未有研究。例如,翘嘴鲌 (*Erythroculter ilishaeformis*) 和蒙古鲌 (*Erythroculter mongolicus*) 属于有毒鱼类中的胆毒类型,而同属近源种的拟尖头鲌 (*Erythroculter oxycephaloides*)、尖头鲌 (*Erythroculter oxycephaloides*) 未有毒性研究报道,本研究则将其划分为胆毒鱼类。随着后续对有毒鱼类研究的深入,此类近缘物种同类型毒性研究将会进一步丰富有毒鱼类物种资源库。

3.2 汉江流域有毒鱼类空间分布特性

在空间分布上,汉江流域有毒鱼类物种数量呈现为上游河段最多,中下游相近且均低于上游河段。汉江流域有毒鱼类的分布特征与流域鱼类物种组成的空间分布特征类似,以鲤形目、鲇形目和鲈形目的物种数为最多,且在毒性类型上均是以胆毒和刺毒类型为主。此研究结果与嘉陵江流域有毒鱼类空间分布特征一致^[22]。结合《中国有毒及药用鱼类新志》^[41]和张富斌等^[21,24]对内陆河流嘉陵江有毒鱼类区系的研究可知,我国内陆淡水有毒鱼类区系以鲤形目的胆毒类和鲇形目的刺毒类为主要类型,这也与东亚淡水鱼类分布区系的总体特征 (以鲤形目和鲇形目为主) 相一致。在本研究中,相似性检验结果表明,汉江有毒鱼类毒性类型在各江段的分布有显著性差异 ($P < 0.05$)。以卵毒鱼类为例,目前公认其以裂腹鱼和光唇鱼两大类群鱼类区系为主^[33]。研究发现,汉江流域仅存 1 种卵毒鱼类,即齐口裂腹鱼,主要分布在汉江上游源头河段,是青藏高原隆起导致青藏高原鱼类向四周扩散的结果^[32]。从淡水鱼类空间分布来看,我国卵毒鱼类中的裂腹鱼类群主要分布在海拔 2 000 m 以上的高海拔、低氧、寒冷水域,尤其以青藏高原为典型区域。此外,肝脏毒性鱼类长江鲟仅分布于汉江流域下游及河口江段。由于人类活动及水坝工程的干扰,其现今野生种群数量岌岌可危。这种鱼类毒性类型在流域空间分布上的差异与特定区系鱼类的分布有着直接关联。另外,胆毒和刺毒鱼类在空间上的物种数量差异,造成了汉江流域有毒鱼类毒性类型在空间分布上存在显著差异。本文研究结果与嘉陵江有毒鱼类毒性类型空间分布研究结果^[21,24]相比,存在一定的不一致之处,其原因主要是本研究仅对流域有毒鱼类的有/无分布数据集作统计分

析,未对比各有毒鱼类在生物量和密度上的空间差异,而同一种鱼类在不同河段的生物量往往存在较大差别,仅统计分析物种有/无分布数据集可能会遗漏一些其他的重要信息。鉴于此,在后续研究中可以综合考虑有毒鱼类生物量、密度、生活史特征等相关数据,从而更为全面地分析有毒鱼类在流域内的空间分布特征。

3.3 汉江流域有毒鱼类分布特征成因

鱼类是位于河流生态系统食物链顶端的一个古老而特殊的群体^[26],鱼类毒素作为其在自然进化过程中形成的生存防御保护机制受到广泛关注。生存和适应是自然界所有生物都面临的最基本问题。为了更好地防御、捕食、竞争,获得更多的生长、繁殖和栖息领地,鱼类就必须适应流域环境,进化自身功能性状(包含毒液性状),从而获得种群延续的机会。此外,从动物区系的角度分析,汉江流域鱼类以第三纪早期残留的鲤科类群和江河平原类群为主,属于典型的江河平原鱼类区系,因此,在本研究中,鲤科和鲇科在胆毒和刺毒鱼类分布中占据优势。另外,有研究表明,遗传因素可能是有毒鱼类分布特征的一个内在诱因^[1,21]。比如,刺毒鱼类的毒棘、颌腺等隐藏在棘刺内部,其毒液管腺及毒素组分受到基因的调控。本研究中的钝头鲩科、鮡科、鲮科和刺鳅科就是很好的刺毒性类型例证。由于现今还缺乏有毒鱼类毒素类型、组分、作用机理及基因通路表达方面的相关研究,所以这些基于推测得出的结论还需后续的研究证实。

研究显示,有毒鱼类毒性的形成与其食性有关^[19,21,41]。营养级越高的有毒鱼类,其潜在的毒性往往越强。汉江有毒鱼类涵盖了5种食性类型,且在流域内的分布十分广泛,这与流域内的空间地貌特征、食物可获性及鱼类自身的生态适应性有关。从物种组成来看,汉江流域有毒鱼类的食性以鱼食性和无脊椎动物食性为主,这与流域鱼类物种组成的空间分布一致^[19,41]。鱼食性鱼类主要捕食小鱼虾等动物饵料,通过营养级串联面临较大的食物链毒性传递和富集,因而其结合自身特性形成毒性的可能性更大,尤其是在整个汉江流域均有分布的鲃属、鳊属及鲇属鱼类。有关食性与毒性类型作用机理的研究目前还十分匮乏,亟需在后续作进一步加强。此外,鱼类生理机能和功能性状(毒液系统)的演化也受到自身遗传因素的影响,而且此方面的例证在嘉陵江流域

胆毒鱼类研究中已经有所显现^[21],后续仍有待深入研究。

总之,鱼类毒素系统是鱼类在长期适应进化过程中形成的一种特殊功能性状,目的是使其自身能更好地生存、繁殖和延续种群。鱼类毒素系统的形成机制受到多重内外因素的影响,是一个复杂的科学难题。目前,随着对动物毒素开发利用的深入,鱼类毒素作为一类新兴生物资源,开发和应用空间巨大。

4 结论

准确辨识有毒鱼类区系分布特征是研究有毒鱼类生态适应性的前提。本研究选取汉江流域有毒鱼类为研究对象,系统分析了汉江流域有毒鱼类的区系组成、毒性类型、食性和空间分布特征。

1) 基于历史资料和野外调查数据,汉江流域共分布有58种有毒鱼类,隶属于6目10科33属,占汉江流域鱼类总物种数的46.77%。汉江流域有毒鱼类以鲤形目、鲇形目和鲈形目为主。

2) 汉江流域有毒鱼类主要包括胆毒(31种)、刺毒(23种)、血清毒(2种)、卵毒(1种)和肝脏毒(1种)等5种毒性类型。

3) 汉江流域有毒鱼类食性类型以肉食性和无脊椎动物食性为主,分别占有毒鱼类总物种数的37.93%和29.31%。

4) 汉江流域各河段有毒鱼类的物种组成相似性较高,各河段有毒鱼类的毒性类型存在显著的空间差异。

参考文献(References):

- [1] HARRIS R J, JENNER R A. Evolutionary Ecology of Fish Venom: Adaptations and Consequences of Evolving a Venom System[J]. *Toxins*, 2019, 11(2): 60.
- [2] CASEWELL N R, WÜSTER W, VONK F J, et al. Complex Cocktails: The Evolutionary Novelty of Venoms[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2013, 28(4): 219-229.
- [3] 罗雷, 靳林, 吕秋敏, 等. 毒液主导的动物生存适应[J]. *中国科学: 生命科学*, 2020, 50(8): 812-826.
LUO Lei, JIN Lin, LYU Qiumin, et al. Venom-Dominated Animal Survival Adaptation [J]. *Scientia Sinica: Vitae*, 2020, 50(8): 812-826.
- [4] HARRIS R J, ARBUCKLE K. Tempo and Mode of the

- Evolution of Venom and Poison in Tetrapods [J]. *Toxins*, 2016, 8(7): 193.
- [5] DUTERTRE S, JIN A H, KAAS Q, et al. Deep Venomics Reveals the Mechanism for Expanded Peptide Diversity in Cone Snail Venom[J]. *Molecular & Cellular Proteomics*, 2013, 12(2): 312-329.
- [6] DUTERTRE S, JIN A H, VETTER I, et al. Evolution of Separate Predation- and Defence-Evoked Venoms in Carnivorous Cone Snails [J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 1-9.
- [7] KING G F, HARDY M C. Spider-Venom Peptides; Structure, Pharmacology, and Potential for Control of Insect Pests [J]. *Annual Review of Entomology*, 2013, 58: 475-496.
- [8] KUHN-NENTWIG L, SCHALLER J, NENTWIG W. Biochemistry, Toxicology and Ecology of the Venom of the Spider *Cupiennius salei* (Ctenidae) [J]. *Toxicon*, 2004, 43(5): 543-553.
- [9] WALKER A A, ROBINSON S D, YEATES D K, et al. Entomo-Venomics: The Evolution, Biology and Biochemistry of Insect Venoms [J]. *Toxicon*, 2018, 154: 15-27.
- [10] DRUKEWITZ S H, VON REUMONT B R M. The Significance of Comparative Genomics in Modern Evolutionary Venomics [J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2019, 7: 163.
- [11] SCHENDEL V, RASH L D, JENNER R A, et al. The Diversity of Venom: The Importance of Behavior and Venom System Morphology in Understanding Its Ecology and Evolution [J]. *Toxins*, 2019, 11(11): 666.
- [12] OLIVEIRA A L, VIEGAS M F, DA SILVA S L, et al. The Chemistry of Snake Venom and Its Medicinal Potential [J]. *Nature Reviews Chemistry*, 2022, 6: 451-469.
- [13] YANG S, WANG Y, WANG L, et al. Target Switch of Centipede Toxins for Antagonistic Switch [J]. *Science Advances*, 2020, 6(32): eabb5734.
- [14] CHURCH J E, HODGSON W C. The Pharmacological Activity of Fish Venoms [J]. *Toxicon*, 2002, 40(8): 1 083-1 093.
- [15] SMITH W L, WHEELER W C. Venom Evolution Widespread in Fishes: A Phylogenetic Road Map for the Bioprospecting of Piscine Venoms [J]. *Journal of Heredity*, 2006, 97(3): 206-217.
- [16] LU W Y, LI H J, LI Q Y, et al. Application of Marine Natural Products in Drug Research [J]. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 2021, 35: 116058.
- [17] GORMAN L M, JUDGE S J, FEZAI M, et al. The Venoms of the Lesser (*Echiichthys vipera*) and Greater (*Trachinus draco*) Weever Fish—A Review [J]. *Toxicon*: X, 2020, 6: 100025.
- [18] BAYHAN B, KAYA M. An Updated Checklist of Poisonous Fishes of Turkish Aegean Sea [J]. *Journal of Coastal Life and Medicine*, 2015, 3(7): 579-581.
- [19] 伍汉霖, 金鑫波, 倪勇. 中国有毒鱼类和药用鱼类 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [20] 伍汉霖, 陈永豪, 庄棣华, 等. 中国胆毒鱼类的研究 [J]. *上海水产大学学报*, 2001, 10(2): 102-108.
- WU Hanlin, CHEN Yonghao, ZHUANG Dihua, et al. Study on the Gall-Bladder Poisonous Fishes in China [J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2001, 10(2): 102-108.
- [21] 张富斌, 王燕, 肖瑾, 等. 嘉陵江有毒鱼类的分布研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(12): 2 901-2 909.
- ZHANG Fubin, WANG Yan, XIAO Jin, et al. Study on Distribution of Ichthyotoxic Fish in the Jialing River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(12): 2 901-2 909.
- [22] 张龙霄, 刘珠果, 戴秋云. 刺毒鱼毒素研究进展 [J]. *生命的化学*, 2013, 33(5): 571-575.
- ZHANG Longxiao, LIU Zhuguo, DAI Qiuyun. Research Progress in Toxins of Acanthotoxic Fishes [J]. *Chemistry of Life*, 2013, 33(5): 571-575.
- [23] 汪焕, 江河, 胡玉婷, 等. 卵毒鱼毒素研究进展 [J]. *安徽农学通报*, 2021, 27(2): 75-76.
- WANG Huan, JIANG He, HU Yuting, et al. Research Progress in Toxins of Ichthyotoxic Fishes [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2021, 27(2): 75-76.
- [24] 张富斌, 王健, 杨坤, 等. 以嘉陵江为例构建并分析有毒鱼类风险评估体系 [J]. *水产学报*, 2021, 10(13): 1-14.
- ZHANG Fubin, WANG Jian, YANG Kun, et al. Construction and Analysis of Risk Assessment System for Ichthyotoxic Fishes—A Case Study of the Jialing River [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021, 10(13): 1-14.
- [25] YANG B, DOU M, XIA R, et al. Effects of Hydrological Alteration on Fish Population Structure and Habitat in River System: A Case Study in the Mid-Downstream of the Hanjiang River in China [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 23: e01090.
- [26] CHEN K, JIA Y, XIONG X, et al. Integration of Taxonomic Distinctness Indices into the Assessment of Headwater Streams with a High Altitude Gradient and

- Low Species Richness Along the Upper Han River, China[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 112:106106.
- [27] 万力,蔡玉鹏,唐会元,等. 汉江中下游产漂流性卵鱼类早期资源现状的初步研究[J]. *水生生态学杂志*, 2011, 32(4):53-57.
WAN Li, CAI Yupeng, TANG Huiyuan, et al. Preliminary Study on the Larval Resources of Fishes Spawning Drifting Eggs in the Middle and Lower Reaches of the Hanjiang River [J]. *Journal of Hydroecology*, 2011, 32(4):53-57.
- [28] 雷欢,陈锋,谢文星,等. 汉江中下游梯级枢纽联合生态调度对产漂流性卵鱼类自然繁殖的效应研究[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(4):1 219-1 233.
LEI Huan, CHEN Feng, XIE Wenxing, et al. Effects of the First Ecological Operation of Cascade Reservoirs in the Middle and Lower Reaches of Hanjiang River on the Natural Reproduction of Pelagic Fish [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(4):1 219-1 233.
- [29] 湖北省水生生物研究所鱼类研究室. 长江鱼类[M]. 北京:科学出版社, 1976.
- [30] 杨干荣. 湖北鱼类志[M]. 武汉:湖北科学技术出版社, 1987.
- [31] 陕西省动物研究所,中国科学院水生生物研究所,兰州大学生物系. 秦岭鱼类志[M]. 北京:科学出版社, 1987.
- [32] 许涛清,陈景星,张卫. 陕西省汉江鱼类区系研究[J]. *四川动物*, 1988, 7(4):16-20.
XU Taoqing, CHEN Jingxing, ZHANG Wei. Study of Han River in Shaanxi Province [J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 1988, 7(4):16-20.
- [33] 陕西省水产研究所,陕西师范大学生物系. 陕西鱼类志[M]. 西安:陕西科学技术出版社, 1992.
- [34] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 横断山区鱼类[M]. 北京:科学出版社, 1998.
- [35] 许涛清,范维端. 陕西省汉江鱼类及渔业问题[J]. *淡水渔业*, 1987(5):3-6.
XU Taoqing, FAN Weiduan. Fish and Fishery Problems in Hanjiang River Within Shaanxi Province [J]. *Freshwater Fisheries*, 1987(5):3-6.
- [36] 李修峰,黄道明,谢文星,等. 汉江中游鱼类资源现状[J]. *湖泊科学*, 2005, 17(4):366-372.
LI Xiufeng, HUANG Daoming, XIE Wenxing, et al. Status of Fisher Resources in the Middle Reaches of the Hanjiang River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2005, 17(4):366-372.
- [37] 于晓东,罗天宏,周红章. 长江流域鱼类物种多样性大尺度格局研究[J]. *生物多样性*, 2005, 13(6):473-495.
YU Xiaodong, LUO Tianhong, ZHOU Hongzhang. Large-Scale Patterns in Species Diversity of Fishes in the Yangtze River Basin [J]. *Biodiversity Science*, 2005, 13(6):473-495.
- [38] FU C, WU J, CHEN J, et al. Freshwater Fish Biodiversity in the Yangtze River Basin of China: Patterns, Threats and Conservation [J]. *Biodiversity & Conservation*, 2003, 12(8):1 649-1 685.
- [39] KANG B, DENG J, HUANG X, et al. Explaining Freshwater Fish Biogeography: History Versus Environment Versus Species Personality [J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2013, 23:523-536.
- [40] LIU X, QIN J, XU Y, et al. Biodiversity Decline of Fish Assemblages After the Impoundment of the Three Gorges Dam in the Yangtze River Basin, China [J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2019, 29:177-195.
- [41] 伍汉霖. 中国有毒及药用鱼类新志[M]. 北京:中国农业出版社, 2002.
- [42] 王雨竹,潘保柱,巩政,等. 黄河流域鱼类食性同资源种团的时空变化[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(3):821-828.
WANG Yuzhu, PAN Baozhu, GONG Zheng, et al. Spatiotemporal Variations of Fish Feeding Guilds in Yellow River Basin [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(3):821-828.