



•研究报告•

# 南水北调中线工程对海河流域鱼类入侵风险分析

李雪健<sup>1,2</sup>, 唐文乔<sup>1\*</sup>, 赵亚辉<sup>2\*</sup>

1. 上海海洋大学海洋动物系统分类与进化上海高校重点实验室, 上海 201306; 2. 中国科学院动物研究所动物进化与系统学重点实验室, 北京 100101

**摘要:** 海河流域是南水北调中线工程的受水区之一, 为评估中线工程引发海河流域鱼类入侵的风险, 本研究统计了南水北调引水区和受水区海河流域鱼类物种多样性差异, 采用水生生物入侵能力筛查系统(aquatic species invasiveness screening kit, AS-ISK)和外来鱼类入侵风险评估体系筛选引水区有入侵风险的鱼类物种, 并用MaxEnt模型预测有入侵风险的鱼类物种在海河流域的潜在适生区。结果表明, 丁鲶(*Tinca tinca*)、陈氏新银鱼(*Neosalanx tangkahkeii*)和大口鲶(*Silurus meridionalis*)是具有高入侵风险的鱼类, 另有3种鱼类具有中入侵风险, 均需重点监控; 而具入侵风险鱼类的适生区预测结果表明, 海河流域南部的徒骇马颊河水系、海河水系的漳卫南运河以及环渤海地区的河流是极易发生鱼类入侵的水域。因此在海河流域高入侵风险水域应开展持续性的水生生物监测, 针对具有高入侵风险的鱼类应进行早期筛查, 此外在水资源利用和分配上应加强管理, 从源头上杜绝鱼类入侵的发生, 还应尽快开展针对东线工程的鱼类资源调查和入侵风险评估工作。

**关键词:** 海河流域; 引水区; 南水北调中线工程; 鱼类入侵; AS-ISK

李雪健, 唐文乔, 赵亚辉 (2021) 南水北调中线工程对海河流域鱼类入侵风险分析. 生物多样性, 29, 1336–1347. doi: 10.17520/biods.2021130.

Li XJ, Tang WQ, Zhao YH (2021) Risk analysis of fish invasion in Haihe River Basin caused by the central route of the South-to-North Water Diversion Project. Biodiversity Science, 29, 1336–1347. doi: 10.17520/biods.2021130.

## Risk analysis of fish invasion in Haihe River Basin caused by the central route of the South-to-North Water Diversion Project

Xuejian Li<sup>1,2</sup>, Wenqiao Tang<sup>1\*</sup>, Yahui Zhao<sup>2\*</sup>

1 Shanghai Universities Key Laboratory of Marine Animal Taxonomy and Evolution, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306

2 Key Laboratory of Zoological Systematics and Evolution, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

### ABSTRACT

**Aims:** The Haihe River Basin is one of the seven main river basins in China. It also receives water from the central route of the South-to-North Water Diversion Project. Due to the combined effect of human activity and climate change, river degradation became the primary problem of Haihe River Basin over several decades. The South-to-North Water Diversion Project can improve the environment in this river basin, but it can also bring the risk of fish invasion. Therefore, this research was conducted to assess the risk of fish invasion in Haihe River Basin caused by this project.

**Methods:** Based on a field investigation and an analysis of the relevant research, differences in the fish species between the water diversion area and the water receiving area (Haihe River Basin) of South-to-North Water Diversion Project were evaluated. A risk assessment system for invasion of alien fishes and an aquatic species invasiveness screening kit V2.3 were used to assess the invasion risk of fish species which are not naturally distributed in Haihe River Basin. MaxEnt model was used to predict the potential distribution of fish species with invasion risk in Haihe River Basin.

**Results:** The scoring results of the risk assessment system and the aquatic species invasiveness screening kit showed that *Tinca tinca*, *Neosalanx tangkahkeii* and *Silurus meridionalis* have a high invasion risk, and that *Odontobutis sinensis*, *Pelteobagrus nitidus* and *Siniperca kneri* have a medium invasion risk. According to the prediction of potential geographic distribution areas conducted by MaxEnt, the Tuhaimajiahe River system, Zhangwei south Canal, and coastal rivers around the Bohai Sea are prone to fish invasion.

收稿日期: 2021-04-09; 接受日期: 2021-07-14

基金项目: 生态环境部生物多样性调查评估项目(2019HJ2096001006)、中国生物多样性监测与研究网络-内陆水体鱼类多样性监测专项网和国家科技基础资源调查专项(2019FY101800)

\* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: wqtang@shou.edu.cn; zhaoyh@ioz.ac.cn

**Conclusions:** Aquatic organisms in the water-receiving area of Haihe River Basin should be continuously monitored, especially in areas most prone to fish invasion, for fish species with high invasion risk. A specific early screening system should be established. In addition, the fish resource investigation and invasion risk assessment for the Eastern Route Project should be carried out as soon as possible.

**Key words:** Haihe River Basin; water diversion area; central route of the South-to-North Water Diversion Project; fish invasion; AS-ISK

鱼类入侵是指鱼类受人为因素的影响到达历史上没有种群分布的水域系统, 进行自然繁殖, 最终维持种群稳定且带来负面影响的生态过程(潘勇等, 2007; 酈珊等, 2016)。鱼类入侵会对当地水域的生态环境、水生生物多样性等造成严重的危害: (1) 入侵鱼类通过捕食和种间竞争等方式, 改变水域原有食物网的结构和功能, 抢占和挤压水域内具有相同或相似生态位土著鱼类的食物及生存空间, 影响近缘种的遗传稳定性, 造成土著鱼类物种多样性下降、资源濒危(陈银瑞等, 1998; 魏辅文等, 2014); (2) 入侵鱼类的大量繁殖会改变水环境内水生植物、底栖、浮游生物的种类和数量, 进而导致水域内温度、溶氧量等理化性质改变, 破坏水域土著生物的栖息地环境, 引发更多物种入侵(Pimentel et al, 2000; 胡隐昌等, 2006); (3) 入侵鱼类还可能携带病原体, 传播疾病, 给水生生物乃至人类的生命安全带来影响(张巧和郝建锋, 2011; 酈珊等, 2016)。因水利工程建设而引发鱼类入侵的发生, 在历史上已有过相关报道, 如加拿大1829年修建的韦兰运河引发七鳃鳗(*Lampetra japonicum*)从安大略湖往伊利湖入侵, 继而又蔓延至其他湖区(Ashworth, 1986), 苏伊士运河修建后引发大量红海水生生物对地中海海域的入侵, 其中包括多种鱼类如黑缘单鳍鱼(*Pempheris vanicolensis*)、点带棘鳞鱼(*Sargocentron rubrum*)等(Mooney & Cleland, 2001), 美国亚利桑那州运河的修建也被认为是罗非鱼(*Oreochromis mossambicus*)入侵亚利桑那州内陆水体的主要途径(潘勇等, 2006); 我国的雅砻江二滩水电站、长江三峡水利枢纽工程在建成后, 也在库区内发现了麦穗鱼(*Pseudorasbora parva*)、食蚊鱼(*Gambusia affinis*)等外来鱼类(张登成和郑娇莉, 2019)。

南水北调是我国为解决水资源南北分配不均, 缓解北方地区水资源短缺的战略性工程, 分为东、中、西三条线路(汪易森和杨元月, 2005)。其中中线工程是从位于长江水系最大支流汉江中上游的丹

江口水库取水, 输水干渠总长1,277 km, 自南向北分别跨越长江、淮河、黄河和海河四大流域, 地跨河南、河北、北京和天津四省市, 最终自流至北京市团城湖(郑和震等, 2016; 安晓明, 2019)。中线工程自2014年12月12日正式通水, 截至2020年12月12日, 6年累计调水348亿 $\text{m}^3$ (王慧, 2020)。海河流域是南水北调中线工程的受水区。广义的海河流域包括海河、滦河和徒骇马颊河水系。其中海河水系由漳卫南运河、子牙河、大清河、永定河、潮白河、北运河、蓟运河7条河流组成(徐和龙, 2019)。从行政区划上, 海河流域包括北京市、天津市、河北省的绝大部分, 以及山东省、陕西省、河南省、辽宁省和内蒙古自治区的一部分, 流域总面积32.06万 $\text{km}^2$ , 约占全国陆域总面积的3.3% (熊玉琳和赵娜, 2020)。

南水北调中线工程在跨流域调水过程中, 总干渠和天津干渠等穿越大小河流约700条(熊雁晖等, 2010), 虽然交叉口全部采取立交方式穿越, 但仍可能通过调节水库、河道洪水漫溢等方式发生河水串流(尹炜等, 2020), 进而引发鱼类入侵。海河流域是我国极度缺水地区, 水资源总量少, 人均水资源占有量仅为全国平均水平的13%, 开发利用程度极高, 河道大量断流, 湖泊湿地萎缩, 水生生态结构不稳定, 水生生物多样性低(汪林等, 2009; 王乙震等, 2017), 相对简单的生境更容易发生生物入侵(Elton, 1958; 沈珍瑶等, 2016), 外来鱼类一旦成功入侵, 便很难将其从水生环境中彻底清除, 因而必须做好早期预防工作(Kolar & Lodge, 2001)。基于以上原因, 本研究结合历史资料和野外调查数据, 统计南水北调引水区汉江中上游流域和海河流域鱼类物种多样性差异, 利用外来鱼类入侵风险评估体系筛选有入侵风险的鱼类物种, 并用MaxEnt模型预测有入侵风险的鱼类物种在海河流域的潜在适生区, 以期海河流域的鱼类入侵防治和鱼类多样性以及水生生态环境的保护提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 鱼类多样性数据

南水北调中线工程引水区与海河流域的位置关系如图1所示。海河流域鱼类物种多样性数据基于本团队近年的多次野外调查积累, 野外工作覆盖海河流域绝大部分区域, 此外还通过《北京及其邻近地区的鱼类》(张春光和赵亚辉, 2013)、《河北动物志: 鱼类》(王所安等, 2001)、《天津鱼类志》(李明德, 2011)等专著和研究报告进行补充; 引水区鱼类多样性数据基于作者2018年对丹江口水库及其上游汉江干流和部分支流进行的鱼类调查和采集。鱼类的鉴定和分类工作依《中国动物志》鱼类已出版各卷册(陈宜瑜, 1998; 褚新洛等, 1999; 乐佩琦, 2000); 鱼类有效名称及分类系统均依照《中国生物物种名录(第二卷): 动物, 脊椎动物(V), 鱼类》(张春光等, 2020)。

### 1.2 鱼类入侵风险评估

根据引水区和海河流域的鱼类物种多样性差异选择鱼类物种进行入侵风险评估。鱼类入侵风险评估基于2种方法进行, 分别是鱼类入侵风险评估体系(窦寅等, 2011)和水生物种入侵力评价软件包(aquatic species invasiveness screening kit V2.3, AS-ISK) (Copp et al, 2016)。

鱼类入侵风险评估体系基于鱼类入侵和控制

的发生过程, 设立5个一级指标、12个二级指标和44个三级指标, 每个三级指标对应不同分值。根据三级指标分值可计算鱼类入侵风险总分值, 计算公式如下:

$$W = \sum_{i=1}^5 a_i \sum_{j=1}^m a_{ij} \sum_{k=1}^n a_{ijk} P_{ijk} \quad (1)$$

公式中,  $W$ 代表外来鱼类入侵风险评估总分值;  $i$ 代表一级指标的权重分值;  $ij$ 代表二级指标的权重分值;  $ijk$ 代表三级指标的权重分值;  $P_{ijk}$ 代表三级指标的评估值;  $n$ 代表第 $i$ 个一级指标下的第 $j$ 个二级指标下的三级指标个数;  $m$ 代表第 $i$ 个一级指标下的二级指标个数。

根据鱼类入侵风险总分值, 可判断相应鱼类物种的入侵风险级别, 入侵风险共分为三级: 较低入侵风险(0–0.700), 中入侵风险(0.700–1.000), 高入侵风险(1.000–2.000)。

AS-ISK由2个评估模块共计55个问题组成, 其中基本风险评估模块(basic risk assessment, BRA)包括49个问题, 涉及被评估物种的生物学信息、生物地理信息以及生态学信息等方面; 气候变化评估模块(climate change assessment, CCA)包括6个问题, 主要内容为预测评估区域未来气候变化对被评估生物和基本风险评估模块评估结果的潜在影响。此外, AS-ISK要求对每个问题的回答结果进行置信度评估, 分为4个置信级别(confidence level, CL): 低 = 1, 中 = 2, 高 = 3, 非常高 = 4 (Interesova et al, 2020; Ruykys et al, 2021)。

AS-ISK入侵风险评估结果包括基本风险得分(BRA, 得分范围: –20至68)和综合得分(BRA + CCA, 得分范围: –32至80), 分值小于1表示无入侵风险, 分值大于1表示具有入侵风险。使用受试者操作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线分析得到的曲线下面积(area under curve, AUC)评估结果的准确性, 使用约登指数(Youden's index)确定阈值以区分具有入侵风险结果中的中风险物种与高风险物种。根据每个回答的置信度级别计算置信因子, 计算公式如下:

$$CF = \sum_{i=1}^{55} (CL_{Qi}) / (4 \times 55) \quad (2)$$

公式中,  $CF$ 代表置信因子(confidence factor),  $CL$ 代

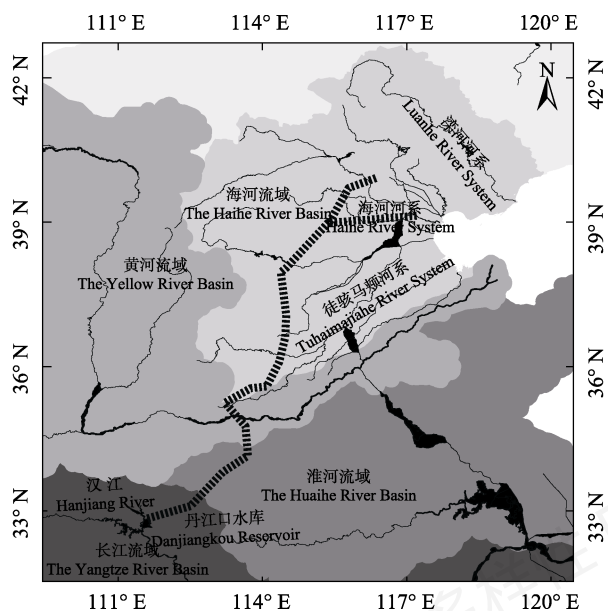


图1 南水北调中线工程示意图

Fig. 1 Map of the central route of the South-to-North Water Diversion Project



表置信级别,  $CL_{Qi}$ 代表第*i*个问题的置信度级别。

### 1.3 鱼类潜在适生区预测

根据鱼类入侵风险评估得到的结果, 选择中入侵风险和高入侵风险的鱼类进行海河流域潜在适生区预测。鱼类潜在适生区预测使用MaxEnt模型, 此软件基于“最大熵理论”编写, 可通过物种自然分布信息和分布区及目标区的环境变量数据预测物种在目标区的潜在适生区(Phillips et al, 2006), MaxEnt目前已广泛用于鱼类及其他生物的入侵强度分析和适生区预测中并取得了不错的效果(孙文涛和刘雅婷, 2010)。

鱼类物种分布的经纬度数据来自野外采集、中国科学院动物研究所鱼类标本馆以及查询世界鱼类数据库(FishBase, <https://www.fishbase.de>)、生物物种名录(Catalogue of Life, <http://www.sp2000.org.cn>)等方法获得, 为保证预测的准确度, 每个物种均收集不低于100条分布信息。

本研究采用的环境变量数据来自于全球气候数据网(WorldClim, <http://www.worldclim.org>)提供的50年(1950–2000)生物气候数据集, 该数据集包含19种环境气候变量(附录1), 分辨率为30"。本研究采用的地理地图来自于国家基础地理信息中心提供的1:400万全国基本地理数据集。

鱼类物种的分布信息与环境变量数据一起输入MaxEnt, 其中鱼类分布信息随机选取80%的点作为训练数据(training data)用于建立模型, 20%的点作为测试数据(test data)以验证模型, 其他参数设置为模型默认值。最后使用ArcGIS 10.2软件将预测结果与地理底图叠加, 得到鱼类潜在适生区预测图。

## 2 结果

### 2.1 南水北调中线工程引水区鱼类多样性

南水北调中线工程引水区丹江口水库及其上游汉江流域干流和部分支流(以下简称引水区)的鱼类多样性调查结果如附录2所示, 根据调查结果, 引水区当前分布鱼类合计103种, 隶属于8目20科10亚科, 其中鲤形目物种数最多, 共有63种, 占引水区鱼类物种总数的61%; 鲇形目次之, 共有17种; 鲈形目有10种; 颌针鱼目4种; 胡瓜鱼目3种; 鲑形目、合鳃鱼目各有2种; 刺鱼目只有1种。科级组成方面, 鲤科鱼类物种数最多, 共有53种; 其次是鳅科11种, 花鳅科6种。

### 2.2 鱼类入侵风险评估

根据引水区鱼类多样性的调查结果, 与海河流域的鱼类物种多样性进行差异性比较, 使用鱼类入侵风险评估体系对差异鱼类物种进行评估。引水区与海河流域鱼类物种差异性比较结果如附录2所示, 在引水区存在而在海河流域无自然分布的物种有18种。

根据海河流域的水环境信息以及相关鱼类的生物学研究等对在引水区存在而在海河流域无自然分布的18种鱼类进行入侵风险评估。基于鱼类入侵风险评估体系, 以丁鲶(*Tinca tinca*)为例, 44个三级指标的评分结果如表1所示。

根据三级指标分值计算鱼类入侵风险总分值并根据计算结果确定风险级别。如表2所示, 高入侵风险(1.000–2.000)鱼类3种, 分别是丁鲶(1.156)、陈氏新银鱼(*Neosalanx tangkahkeii*, 1.127)、大口鲈(*Silurus meridionalis*, 1.074); 中入侵风险(0.700–1.000)的3种, 分别是中华沙塘鳢(*Odontobutis sinensis*, 0.961)、光泽黄颡鱼(*Pelteobagrus nitidus*, 0.929)、大眼鲈(*Siniperca kneri*, 0.926); 其余12种鱼类入侵风险较低(0–0.700)。

基于水生生物入侵能力筛查系统(AS-ISK)的评估结果如表3所示。ROC曲线分析得到的基本风险得分(BRA)曲线下面积为0.570–1.000 (95%置信区间), 综合得分(BRA + CCA)曲线下面积为0.791–1.000 (95%置信区间), 以上AUC值均大于0.5, 表明AS-ISK辨别力较好, 能够在被评估区域准确区分非入侵种和入侵种。约登指数显示阈值分别为29.75 (BRA)和35.5 (BRA + CCA), 即表示BRA得分在1–29.75为中等风险, 29.75–68为高风险, BRA + CCA得分在1–35.5为中等风险, 35.5–80为高风险。根据阈值, 大口鲈、中华沙塘鳢、丁鲶、陈氏新银鱼是具有高入侵风险的鱼类, 光泽黄颡鱼具中等入侵风险, 其余13种鱼类无入侵风险或入侵风险低。

### 2.3 具入侵风险鱼类的潜在适生区预测

根据鱼类入侵风险评估的结果, 基于MaxEnt模型对具入侵风险的鱼类在海河流域的潜在适生区进行预测, 预测结果如图2所示, 丁鲶、大口鲈、陈氏新银鱼和中华沙塘鳢的潜在适生区范围较大, 其中丁鲶的潜在适生区基本覆盖整个海河流域, 大口鲈、陈氏新银鱼和中华沙塘鳢的潜在适生区集

表1 丁鲷的三级指标分值

Table 1 The score of the third level index of *Tinca tinca*

指标名称 Name of the third level index	分值 Score	指标名称 Name of the third level index	分值 Score
是否存在入侵史 Invasion history: happened or not	2	个体或繁殖体在运输环境的存活率 Survival rate in transportation environment of Individual or propagule	2
对入侵地区本地种的影响 Impact on native species of intrusion area	1	迁徙范围 Migration range	0
对入侵地区生态环境的影响 Impact on the environment of intrusion area	1	水域可流通性 Water circulatability	1
对入侵地区经济贸易的影响 Impact on the economy of intrusion area	0	水域受自然干扰次数 Circumstance of disturbance in water area	1
人工养殖规模 Scale of captive breeding	1	被目的性引种与传播的程度 Circumstance of introduction and dissemination	2
人工养殖分布 Distribution of captive breeding	1	评估区渔业水产业发展的程度 Circumstance of fishery of evaluation area	1
自然生态系统中的分布 Distribution in natural ecosystems	1	其他人为活动强度 Circumstance of other human activities	1
对水温的适应情况 Adaptation to water temperature	2	繁殖干扰 Reproductive interference	0
对水化因子的适应情况 Adaptation to hydration factors	2	捕食危害 Predation hazard	1
对水文条件的适应情况 Adaptation to hydrological conditions	1	竞争压力 Pressure of competition	1
存在天然饵料资源的情况 Circumstance of natural bait: exist or not	2	是否为病原体的媒介动物 Vectors of pathogens: yes or no	0
存在有效天敌的情况 Circumstance of natural enemies: exist or not	2	对自然景观的影响 Impact on landscape	0
存在竞争压力的情况 Circumstance of competitive pressure: exist or not	2	对水环境质量的影响 Impact on water environment	0
遗传多样性高低 Circumstance of genetic diversity	1	是否为人畜病原体的媒介动物 Vector animal for human and animal: yes or no	1
生长速度 Growth rate	2	个体及其分泌物对人畜的危害 Harm of individuals and their secretions	0
初次性成熟年龄 Age of initial sexual maturation	1	对经济活动的影响 Impact on the economy	1
繁殖次数 Breeding times	2	引入渠道的规范性 Normalization of the process of introduction	0
年繁殖量 Annual reproduction	2	使用程序的规范性 Normalization of procedures	0
繁殖方式 Reproduction methods	0	公众对该外来鱼入侵的防范意识 Prevention consciousness of fish invasion	2
育幼行为 Child-rearing behavior	0	现有控制技术 Existing control technology	2
个体形态特征可分辨程度 Degree of discrimination of individual characteristic	1	控制所需成本 Cost required	1
繁殖体形态特征 Morphological characteristics of propagules	2	控制造成的负面效应 Negative effects caused by control	1

表2 基于外来鱼类入侵风险评估体系的评估结果

Table 2 The results of risk assessment system for invasion of alien fishes

物种 Species	评估结果 Results	风险级别 Risk level	物种 Species	评估结果 Results	风险级别 Risk level
丁鲷 <i>Tinca tinca</i>	1.156	高入侵风险 High invasion risk	宜昌鳊鲂 <i>Gobiobotia filifer</i>	0.558	低入侵风险 Low invasion risk
陈氏新银鱼 <i>Neosalanx tangkahkeii</i>	1.127		中华纹胸鮡 <i>Glyptothorax sinensis</i>	0.543	
大口鲶 <i>Silurus meridionalis</i>	1.074		嘉陵颌须鮡 <i>Gnathopogon herzensteini</i>	0.515	
中华沙塘鳢 <i>Odontobutis sinensis</i>	0.961	中入侵风险 Medium invasion risk	细纹颌须鮡 <i>Gnathopogon taeniellus</i>	0.509	
光泽黄颡鱼 <i>Pelteobagrus nitidus</i>	0.929		白缘鲶 <i>Liobagrus marginatus</i>	0.451	
大眼鲈 <i>Siniperca kneri</i>	0.926		拟缘鲶 <i>Liobagrus marginatoides</i>	0.432	
切尾拟鲿 <i>Pseudobagrus truncatus</i>	0.686	低入侵风险 Low invasion risk	川陕哲罗鲑 <i>Hucho bleekeri</i>	0.394	
吻鲈 <i>Rhinogobio typus</i>	0.684		司氏鲶 <i>Liobagrus styani</i>	0.325	
短须颌须鮡 <i>Gnathopogon imberbis</i>	0.667		秦岭细鳞鲑 <i>Brachymystax tsinlingensis</i>	0.212	

表3 基于水生生物入侵能力筛查系统(AS-ISK)的评估结果

Table 3 The results of aquatic species invasiveness screening kit V2.3 (AS-ISK)

物种 Species	评估结果 Results				置信度 Confidence		
	BRA	Level	BRA + CCA	Level	BRA	CCA	BRA + CCA
大口鲶 <i>Silurus meridionalis</i>	48	高 High	60	高 High	0.99	0.84	0.99
中华沙塘鳢 <i>Odontobutis sinensis</i>	37	高 High	43	高 High	0.99	0.88	0.98
丁鲶 <i>Tinca tinca</i>	33	高 High	45	高 High	0.99	0.96	0.99
陈氏新银鱼 <i>Neosalanx tangkahkeii</i>	31.5	高 High	43.5	高 High	0.95	0.83	0.94
光泽黄颡鱼 <i>Pelteobagrus nitidus</i>	28	中 Medium	32	中 Medium	0.99	0.72	0.88
拟缘鲮 <i>Liobagrus marginatoides</i>	1	低 Low	-3	低 Low	0.92	0.71	0.90
司氏鲮 <i>Liobagrus styani</i>	1	低 Low	-7	低 Low	0.93	0.83	0.92
宜昌鳅鲎 <i>Gobiobotia filifer</i>	0	低 Low	-6	低 Low	0.91	0.92	0.91
细纹颌须鲈 <i>Gnathopogon taeniellus</i>	-0.5	低 Low	-0.5	低 Low	0.91	0.75	0.89
秦岭细鳞鲃 <i>Brachymystax tsinlingensis</i>	-1	低 Low	-13	低 Low	0.95	0.91	0.95
切尾拟鲃 <i>Pseudobagrus truncatus</i>	-2.5	低 Low	-6.5	低 Low	0.84	0.75	0.83
吻鲈 <i>Rhinogobio typus</i>	-3.5	低 Low	-7.5	低 Low	0.90	0.75	0.89
中华纹胸鲃 <i>Glyptothorax sinensis</i>	-4	低 Low	-4	低 Low	0.91	0.79	0.90
川陕哲罗鲑 <i>Hucho bleekeri</i>	-5	低 Low	-17	低 Low	0.96	0.92	0.97
大眼鲈 <i>Siniperca kneri</i>	-8	低 Low	-6	低 Low	0.99	0.75	0.96
短须颌须鲈 <i>Gnathopogon imberbis</i>	-9	低 Low	-11	低 Low	0.95	0.83	0.94
嘉陵颌须鲈 <i>Gnathopogon herzensteini</i>	-9	低 Low	-17	低 Low	0.88	0.75	0.86
白缘鲮 <i>Liobagrus marginatus</i>	-10	低 Low	-12	低 Low	0.89	0.75	0.87

BRA: 基本风险评估模块; CCA: 气候变化评估模块。BRA, Basic risk assessment; CCA, Climate change assessment.

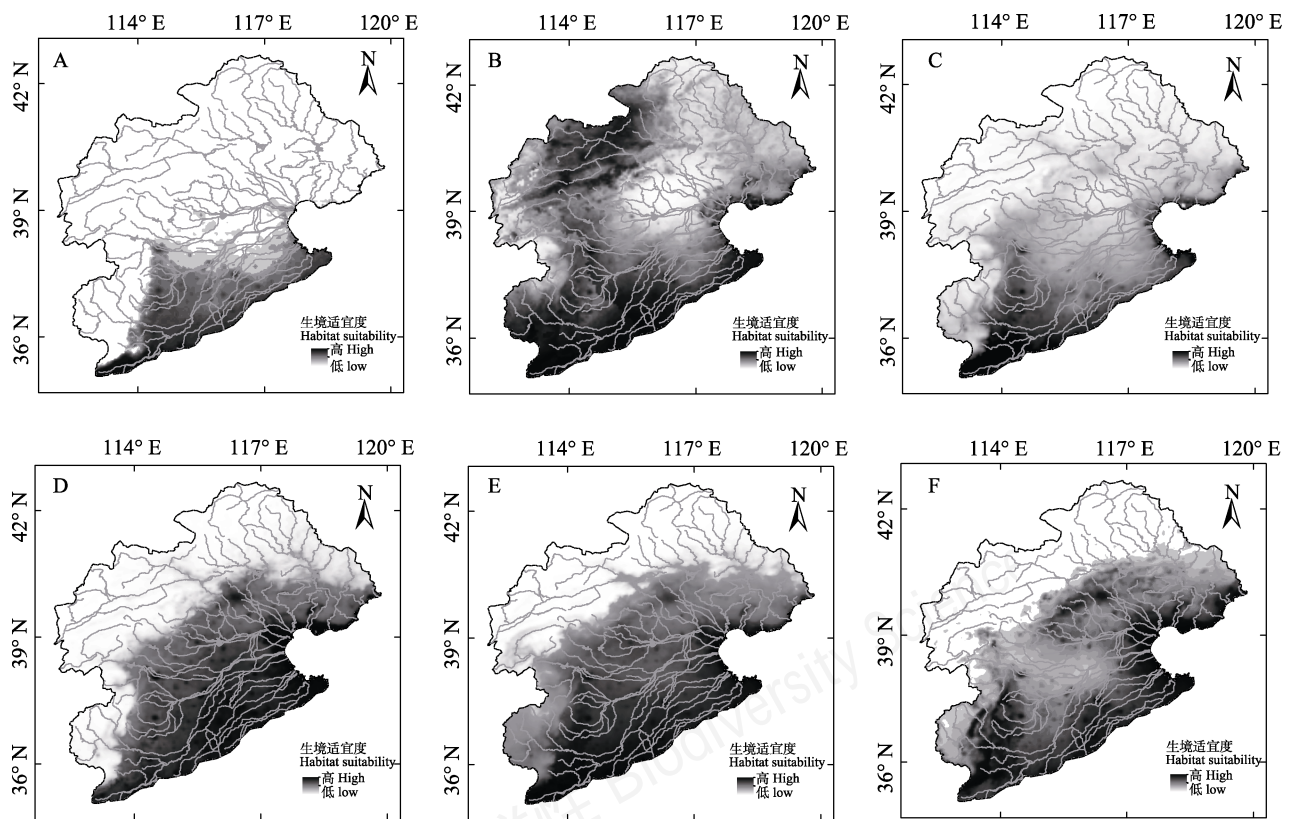


图2 具入侵风险鱼类在海河流域潜在适生区预测结果。A: 大眼鲈; B: 丁鲶; C: 光泽黄颡鱼; D: 中华沙塘鳢; E: 陈氏新银鱼; F: 大口鲶。

Fig. 2 The results of the potential habitat prediction of fish with invasion risk in Haihe River Basin. A, *Siniperca kneri*; B, *Tinca tinca*; C, *Pelteobagrus nitidus*; D, *Odontobutis sinensis*; E, *Neosalanx tangkahkeii*; F, *Silurus meridionalis*.



中在海河流域的南部和东南部,在海河流域的生境适宜程度最高。光泽黄颡鱼和大眼鳊的潜在适生区面积相对较小,集中在海河流域的南部和西南部地区。

从河流方面来看,海河水系南系的漳卫南运河,徒骇马颊河水系的徒骇河和马颊河是发生鱼类入侵风险最高的河流,是绝大多数具入侵风险鱼类的生境适宜程度最高的地区;此外,海河水系环渤海地区的河流也是具有较高入侵风险的地区。海河流域东北部的滦河水系发生鱼类入侵的风险相对较低。

### 3 讨论

外来鱼类入侵风险评估体系与AS-ISK的评估结果均显示丁鲃、陈氏新银鱼和大口鲇是具有高入侵风险的鱼类。丁鲃原产于我国新疆的额尔齐斯河流域(冯新忠等, 2008),已引入陕西、湖北、江西、浙江、广东等地推广养殖(张洁光, 2017),作者在引水区鱼类多样性调查时已在自然水体中发现其分布,这表明其在引水区可能已经成功入侵。根据MaxEnt模型的丁鲃适生区预测,其在海河流域的适生区范围最大,除去海河流域南部的徒骇马颊河水系之外,在海河水系永定河上游的生境适合度也较高。丁鲃具有食性广、耐低温低氧、生长繁殖速度快、对环境的适应能力较强的特点(于潇等, 2020),若其成功入侵可能会通过种间竞争的方式挤压土著鱼类的生存空间、抢夺食物来源,从而降低海河流域的鱼类多样性。丁鲃寿命可达20年,2龄后即可繁殖,繁殖期在5–10月,且可多次产卵,盐度耐受可达12‰(Kottelat & Freyhof, 2007),因此在河口区亦要监测该物种的入侵状况,根据中线工程特点,重点防范鱼卵和仔稚鱼的输入;在引水区,应加强对其相关育苗场、养殖场的管理,严防养殖过程中的逃逸问题。

陈氏新银鱼和大口鲇均是具有入侵历史的鱼类,其入侵方式主要是在人为引进和后续养殖过程中逃逸至天然水体(陈银瑞等, 1998; 王迪等, 2009)。陈氏新银鱼主要分布在长江中下游及其支流,其作为重要的经济鱼类被广泛引种后,目前已在云南省和贵州省的部分河流湖泊形成入侵种群,对当地的生态和环境造成了一定影响(熊飞等, 2008; 代应贵, 2017)。陈氏新银鱼适宜生存在湖泊水库等较

大水面生境(张洁, 2008),因此在其潜在分布区内的岳城水库、东昌湖等应严加防范。大口鲇原产于长江中上游流域,同样受养殖引入的影响,目前其在云南省部分地区和广西十万大山地区的天然水体中广泛存在(赵亚辉和张春光, 2001; 赵亚辉等, 2002)。由于大口鲇喜栖居于江河中,特别是未来水资源供给充沛后,其入侵防范的重点主要在江河生境,如卫河、徒骇河等。

海河流域南部的徒骇马颊河水系和海河水系的漳卫南运河以及环渤海地区的河流是极易发生鱼类入侵的水域,这可能与该地区相对较高的气温有关。温度是影响鱼类分布的重要因素之一(殷名称, 1995),以大眼鳊预测结果的各环境气候变量的贡献率为例(图3),温度相关的变量最干季平均温度(bio9)、最暖季平均温度(bio10)和最冷月最低温(bio6)对于大眼鳊在海河流域的分布起到最大的影响作用,其贡献率合计为84.3%。而与降水相关的环境变量如最暖季降水量(bio18)、最湿月降水量(bio13)等对预测结果的影响较小。大眼鳊的适生区预测结果与海河流域气温从东南向西北逐渐降低的总趋势相一致(袁再健等, 2009)。此外在当前全球气候变暖的背景下,海河流域年平均气温也呈现逐年上升的趋势(郝春洋等, 2010; 王永财等, 2014),因此不能排除具入侵风险鱼类的适生范围继续扩大的可能性。

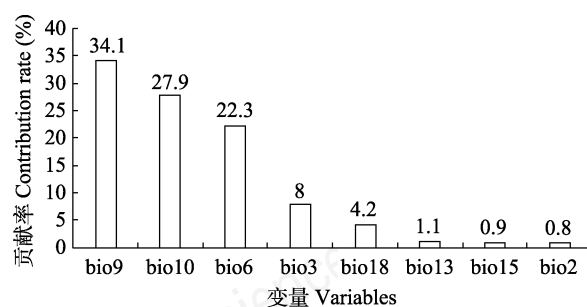


图3 大眼鳊适生区预测结果的环境变量的贡献率。bio9: 最干季平均温度; bio10: 最暖季平均温度; bio6: 最冷月最低温; bio3: 等温性; bio18: 最暖季降水量; bio13: 最湿月降水量; bio15: 降水量变异系数; bio2: 昼夜温差月均值。

Fig. 3 Contribution rate of environmental variables about the potential habitat prediction of *Siniperca kneri*. bio9, Mean temperature of the driest quarter; bio10, Mean temperature of the warmest quarter; bio6, Min temperature of the coldest month; bio3, Isothermality; bio18, Precipitation of the warmest quarter; bio13, Precipitation of wettest month; bio15, Precipitation seasonality; bio2, Mean diurnal range.

除了对土著鱼类和水生生态环境的直接危害外, 还应注意入侵的鱼类物种对入侵地近缘种鱼类的危害, 如大口鲶和鲇(*Silurus asotus*)、光泽黄颡鱼与黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*), 其中鲇和黄颡鱼均为在海河流域广泛分布的鱼类。入侵鱼类对入侵地近缘种的影响主要体现在以下两个方面: 部分入侵鱼类通过与本地土著鱼类的杂交影响土著鱼类种群遗传稳定性和独立性, 引发土著鱼类的种群资源量下降、性状多样性降低等(杨小林和王德良, 2007; 王迪等, 2008), 如欧洲的入侵鱼类鲫(*Carassius auratus*)与本地欧洲鲫(*C. carassius*)杂交, 导致欧洲鲫种群数量下降(Smartt, 2007), 分布于我国云南高原湖泊的国家Ⅱ级重点保护鱼类大头鲤(*Cyprinus pellegrini*)与外来鲤(*C. carpio*)的渐渗杂交在星云湖广泛发生, 相关研究表明, 星云湖纯种大头鲤已经灭绝(杨君兴等, 2013)。其次, 部分近缘生物间虽不能杂交产生后代, 但由于它们在求偶行为及雌雄相互作用中存在许多相同或相似之处, 入侵种可能对土著种的交配产生干扰, 使得土著种的交配频率下降, 种群数量降低, 进而广泛入侵并取代近缘种, 这一生物入侵行为机制被称为“非对称交配互作”(Liu et al, 2007; 刘树生, 2008)。

对入侵生物潜在适生区的预测是早期预警和防治生物入侵的重要方法之一(Austin, 2002), MaxEnt模型在生物入侵研究领域已经有了广泛的应用, 如张熙骛等(2014)使用MaxEnt模型预测了麦穗鱼和鲫的全球适生区, 但是应用该模型预测的物种多是已经被证实具有高入侵风险或已经在部分区域成功入侵的物种, 如罗非鱼、食蚊鱼等(潘勇等, 2006; 成新跃和徐汝梅, 2007)。在南水北调这样的跨流域调水工程中, 受调水影响可能从引水区到达海河流域的鱼类物种数量较多, 但并非所有的外来鱼类都会形成入侵, 因而有必要进行入侵风险评估, 筛选出具有入侵风险的鱼类物种。本研究采用了两种入侵风险计算的方法对鱼类的入侵风险进行量化后, 再利用MaxEnt模型预测具有入侵风险的鱼类物种的潜在适生区, 可以简化评估过程, 同时MaxEnt模型的预测结果也可以对鱼类入侵风险评估的准确性起到验证作用。从本研究的结果来看, 在海河流域具高入侵风险的鱼类如丁鲶、大口鲶、陈氏新银鱼等潜在适生区范围较大, 而入侵风险相对较低的鱼类如大眼鲈、光泽黄颡鱼等, 其潜在适

生区范围也比较狭窄。




本研究采用了分别由国内、国外学者发布的两种入侵风险评估方法, 其中AS-ISK方法自2016年发布以来应用相当广泛, 评估了俄罗斯、越南、英国、巴尔干半岛等多个国家和地区的多种水生生物, 而相较之下我国学者发布的鱼类入侵风险评估体系(以下简称评估体系)应用极少, 但仅从评价结果来说, 两种方法具有较高的一致性, 这与其相似程度较高的评价内容有关, 两种评价方法均比较全面地覆盖了鱼类的生物学特征、评估区域的环境特征等方面, 均能准确地量化单个鱼类物种的入侵能力。但在评估过程中, 与AS-ISK方法相比, 评估体系也存在一些不足之处: 首先, 从方法设计的角度看, AS-ISK是一个完整的工具包, 评价者仅需回答完成各个问题即可得到评估结果, 而评估体系则需要评估者根据公式完成计算过程, 而且AS-ISK附带置信度得分, 能够更加真实地反映评估结果的准确性; 其次, 评估体系的部分评价指标缺乏明确的评价标准, 如个体形态特征可分辨程度(易分辨、较难分辨、极难分辨), 迁徙范围(一定范围、长距离迁徙), 评估区渔业水产业发展的程度(较低、一般、较高)等, 对评价结果的准确性可能会产生一定的影响。因此, 建议进一步完善评估体系的工作流程, 量化具体的评价标准, 如采用具体距离确定迁移范围的大小, 根据当地渔业水产业的总产值占比确定渔业发展程度的高低, 而难以量化的评价指标予以删除, 如个体形态特征可分辨程度, 以简化评估过程并尽量消除主观评价对结果的影响。另外, 本研究进行适生区预测的MaxEnt模型仅仅依据物种分布信息进行预测, 并不涉及物种的生活史特征、种间关系以及区域的水文环境特征等影响因素, 这对预测结果的准确性会有一定的影响(周海涛等, 2016), 并且来自同一流域的鱼类因其相近的分布范围往往能得到相似的预测结果。

生态补水是南水北调中线工程水资源利用的重要形式(楼晨笛等, 2019), 中线工程从2017年起, 已4次利用汛期洪水资源通过沿线退水闸向河南省、河北省的30余条河流的部分河道开展生态补水, 截至2018年11月生态补水总量累计达15.48亿 $m^3$ (刘远书等, 2019)。生态补水在改善河流环境的同时也增加了鱼类入侵的可能性, 根据本研究的主要结果以及海河流域的水环境现状, 为防范跨流域调水引



发鱼类入侵, 首先, 应在受水区特别是高入侵风险水域开展持续性的水生生物监测, 建立水生生物本底数据库; 其次, 针对具有高入侵风险的鱼类可通过其特定的生物学特征使用环境DNA等技术手段进行早期筛查, 如Imamura等(2020)提出利用环境DNA技术可以在早期入侵阶段检测到虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)等鱼类, George等(2021)也基于环境DNA技术开展了入侵鱼类圆口新虾虎鱼(*Neogobius melanostomus*)的入侵范围调查工作; 最后, 在调水及补水过程中可结合鱼类的生物学特征利用物理方法阻拦鱼类通过水渠进入受水区, 如Ruebush等(2012)实验了声波气泡频闪光障(sound-bubble-strobe light barrier)技术以用于阻止鲤科鱼类在五大湖地区的进一步入侵和扩散, 并取得了较好效果。此外, 南水北调东线一期工程已通水(窦雪松, 2019), 东线二期工程、东线北延应急供水工程等也在稳步建设中(王慧, 2020), 为了防止鱼类入侵, 保护东线工程受水区的水生生态环境, 应尽快开展针对东线工程的鱼类资源调查和入侵风险评估工作。

## ORCID

李雪健  <https://orcid.org/0000-0003-0655-5982>  
唐文乔  <https://orcid.org/0000-0001-5992-5022>  
赵亚辉  <https://orcid.org/0000-0002-4615-596X>

## 参考文献

- An XM (2019) Open development path of Middle Route Project of South-to-North Water Diversion. *Journal of Economics of Water Resources*, 37(5), 48–53, 72, 79. (in Chinese with English abstract) [安晓明 (2019) 南水北调中线工程开放发展路径研究. *水利经济*, 37(5), 48–53, 72, 79.]
- Ashworth W (1986) *The Great Lake: An Environmental History*. Wayne State University Press, Detroit.
- Austin MP (2002) Spatial prediction of species distribution: An interface between ecological theory and statistical modelling. *Ecological Modelling*, 157, 101–118.
- Chen YR, Yang JX, Li ZY (1998) The diversity and present status of fishes in Yunnan Province. *Chinese Biodiversity*, 6, 272–277. (in Chinese with English abstract) [陈银瑞, 杨君兴, 李再云 (1998) 云南鱼类多样性和面临的危机. *生物多样性*, 6, 272–277.]
- Chen YY (1998) *Fauna Sinica · Osteichthyes · Cypriniformes*. II. Science Press, Beijing. (in Chinese) [陈宜瑜 (1998) 中国动物志·硬骨鱼纲·鲤形目(中卷). 科学出版社, 北京.]
- Cheng XY, Xu RM (2007) Current status of invasion of exotic animals in China. *Bulletin of Biology*, 42(9), 1–4, 64. (in Chinese) [成新跃, 徐汝梅 (2007) 中国外来动物入侵概况. *生物学通报*, 42(9), 1–4, 64.]
- Chu XL, Zheng BS, Dai DY (1999) *Fauna Sinica · Osteichthyes · Siliuriformes*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [褚新洛, 郑葆珊, 戴定远 (1999) 中国动物志·硬骨鱼纲·鲇形目. 科学出版社, 北京.]
- Copp GH, Vilizzi L, Tidbury H, Stebbing P, Tarkan AS, Miossec L, Goulletquer P (2016) Development of a generic decision-support tool for identifying potentially invasive aquatic taxa: AS-ISK. *Management of Biological Invasions*, 7, 343–350.
- Dai YG (2017) Studies on fish fauna of Mengjiang River, Guizhou. *Chinese Journal of Zoology*, 52, 253–262. (in Chinese with English abstract) [代应贵 (2017) 贵州蒙江鱼类区系组成及特征分析. *动物学杂志*, 52, 253–262.]
- Dou XS (2019) Impact and countermeasures of East Route of the South-to-North Water Diversion Project on Navigation of the Grand Canal. *Transportation Enterprise Management*, 34(6), 97–98. (in Chinese) [窦雪松 (2019) 南水北调东线工程对京杭运河航道通航的影响及对策. *交通企业管理*, 34(6), 97–98.]
- Dou Y, Wu J, Huang C (2011) Risk assessment system and method for invasion of alien fishes. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 27, 12–16. (in Chinese with English abstract) [窦寅, 吴军, 黄成 (2011) 外来鱼类入侵风险评估体系及方法. *生态与农村环境学报*, 27, 12–16.]
- Elton CS (1958) *The Ecology of Invasions by Animals and Plants*. Chapman and Hall, London.
- Feng XZ, Gou P, Su J, Fan ZM, Wang YX (2008) Nutrition compositions analysis of wild *Tinca tinca* L of Ereqsi River, Xinjiang. *Science and Technology of Food Industry*, (6), 276–279. (in Chinese with English abstract) [冯新忠, 苟萍, 苏俊, 范镇明, 王咏星 (2008) 额尔齐斯河野生丁鲋营养成分分析. *食品工业科技*, (6), 276–279.]
- George SD, Baldigo BP, Rees CB, Bartron ML, Winterhalter D (2021) Eastward expansion of Round goby in New York: Assessment of detection methods and current range. *Transactions of the American Fisheries Society*, 150, 258–273.
- Hao CF, Jia YW, Gong JG, Peng H (2010) Analysis on characteristics and rules of climate change of Haihe River Basin in recent 50 years. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 8, 39–43, 51. (in Chinese with English abstract) [郝春洋, 贾仰文, 龚家国, 彭辉 (2010) 海河流域近50年气候变化特征及规律分析. *中国水利水电科学研究院学报*, 8, 39–43, 51.]
- Hu YC, Li Y, Luo JR, Tan XC (2006) Risk assessment system for alien aquatic animals. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 34(10), 113–115. (in Chinese with English abstract) [胡隐昌, 李勇, 罗建仁, 谭细畅 (2006) 水生动物外来物种入侵风险评估系统的建立. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 34(10), 113–115.]

- Imamura A, Hayami K, Sakata MK, Minamoto T (2020) Environmental DNA revealed the fish community of Hokkaido Island, Japan, after invasion by rainbow trout. *Biodiversity Data Journal*, 8, e56876.
- Interesova E, Vilizzi L, Copp GH (2020) Risk screening of the potential invasiveness of non-native freshwater fishes in the River Ob basin (West Siberian Plain, Russia). *Regional Environmental Change*, 20, 64.
- Kolar CS, Lodge DM (2001) Progress in invasion biology: Predicting invaders. *Trends in Ecology and Evolution*, 16, 199–204.
- Kottelat M, Freyhof J (2007) *Handbook of European Freshwater Fishes*. Maurice Kottelat, Berlin.
- Li MD (2011) *The Fishes of Tianjin*. Tianjin Science and Technology Press, Tianjin. (in Chinese) [李明德 (2011) 天津鱼类志. 天津科学技术出版社, 天津.]
- Li S, Chen JK, Wang XM (2016) Global distribution, entry routes, mechanisms and consequences of invasive freshwater fish. *Biodiversity Science*, 24, 672–685. (in Chinese with English abstract) [酆珊, 陈家宽, 王小明 (2016) 淡水鱼类入侵种的分布、入侵途径、机制与后果. 生物多样性, 24, 672–685.]
- Liu SS (2008) Asymmetric mating interactions drive widespread invasion and displacement in a whitefly. *China Basic Science*, 10(2), 20–21. (in Chinese) [刘树生 (2008) 非对称交配互动驱动B型烟粉虱的广泛入侵及对土著烟粉虱的取代. 中国基础科学, 10(2), 20–21.]
- Liu SS, Barro PJD, Xu J, Luan JB, Zang LS, Ruan YM, Wan FH (2007) Asymmetric mating interactions drive widespread invasion and displacement in a whitefly. *Science*, 318, 1769–1772.
- Liu YS, Feng XB, Yang N (2019) Primary thought about ecological water replenishment of the Middle Route Project of South-to-North Water Diversion. *Water Resources Development Research*, 19(11), 5–7. (in Chinese) [刘远书, 冯晓波, 杨柠 (2019) 对南水北调中线干线工程生态补水的初步思考. 水利发展研究, 19(11), 5–7.]
- Lou CD, Fang X, Wang D (2019) Analysis on influences of the first phase of the South-to-North Water Transfer Project on the ecological environment. *Shaanxi Water Resources*, (9), 83–86. (in Chinese with English abstract) [楼晨笛, 方晓, 王东 (2019) 南水北调中线一期工程对生态环境的影响分析. 陕西水利, (9), 83–86.]
- Mooney HA, Cleland EE (2001) The evolutionary impact of invasive species. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 98, 5446–5451.
- Pan Y, Cao WX, Xu LP, Yin SR (2006) History and approach of invasion from domestic and abroad fishes. *Journal of Dalian Fisheries University*, 21, 72–78. (in Chinese with English abstract) [潘勇, 曹文宣, 徐立蒲, 殷守仁 (2006) 国内外鱼类入侵的历史及途径. 大连水产学院学报, 21, 72–78.]
- Pan Y, Cao WX, Xu LP, Yin SR, Bai L (2007) Process, mechanism, and research method of fish invasion. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 18, 687–692. (in Chinese with English abstract) [潘勇, 曹文宣, 徐立蒲, 殷守仁, 白璐 (2007) 鱼类入侵的过程、机制及研究方法. 应用生态学报, 18, 687–692.]
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231–259.
- Pimentel D, Lach L, Zuniga R, Morrison D (2000) Environmental and economic costs of nonindigenous species in the United States. *BioScience*, 50, 53–65.
- Ruebush BC, Sass GG, Chick JH, Stafford JD (2012) *In-situ* tests of sound-bubble-strobe light barrier technologies to prevent range expansions of Asian carp. *Aquatic Invasions*, 7, 37–48.
- Ruykys L, Ta KAT, Bui TD, Vilizzi L, Copp GH (2021) Risk screening of the potential invasiveness of non-native aquatic species in Vietnam. *Biological Invasions*, 23, 2047–2060.
- Shen ZY, Xiao YC, Ma Y, Chen L (2016) Ecological risk assessment of exotic plant invasion. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 52, 189–195. (in Chinese with English abstract) [沈珍瑶, 肖月晨, 马晔, 陈磊 (2016) 外来植物入侵生态风险评价. 北京师范大学学报(自然科学版), 52, 189–195.]
- Smartt J (2007) A possible genetic basis for species replacement: Preliminary results of interspecific hybridisation between native crucian carp *Carassius carassius* (L.) and introduced goldfish *Carassius auratus* (L.). *Aquatic Invasions*, 2, 59–62.
- Sun WT, Liu YT (2010) Research progress of risk analysis of biological invasion. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 26(7), 233–236. (in Chinese with English abstract) [孙文涛, 刘雅婷 (2010) 生物入侵风险分析的研究进展. 中国农学通报, 26(7), 233–236.]
- Wang D, Wu J, Dou Y, Huang C (2008) Investigation of exotic cultured fishes in Jiangsu Province and primary evaluation of their invasive risk. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 20(11), 99–102. (in Chinese with English abstract) [王迪, 吴军, 窦寅, 黄成 (2008) 江苏水产养殖鱼类外来物种调查及其生物入侵风险初探. 江西农业学报, 20(11), 99–102.]
- Wang D, Wu J, Dou Y, Huang C (2009) Study on fish environmental risk of allopatry introduced in China domestic. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 37, 8544–8546. (in Chinese with English abstract) [王迪, 吴军, 窦寅, 黄成 (2009) 中国境内异地引种鱼类环境风险研究. 安徽农业科学, 37, 8544–8546.]
- Wang H (2020) The South-to-North Water Diversion Project is getting more and more exciting. *China Water Resources*, (23), 10–13. (in Chinese) [王慧 (2020) 南水北调大文章越来越精彩. 中国水利, (23), 10–13.]
- Wang L, Gan H, Zhao SX, Wang F, You JJ, Wang L (2009) Ecological and environmental impact analysis of first phase of South-to-North Water Transfer Project on water-recipient

areas. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 7(6), 4–7, 53. (in Chinese with English abstract) [汪林, 甘泓, 赵世新, 王芳, 游进军, 王琳 (2009) 南水北调东、中线一期工程对受水区生态环境影响分析. 南水北调与水利科技, 7(6), 4–7, 53.]

Wang SA, Wang ZM, Li GL, Cao YP, Zhang ZW, Xu XJ, Sun JH (2001) Fauna of Hebei: Fish. Hebei Science & Technology Press, Shijiazhuang. (in Chinese) [王所安, 王志敏, 李国良, 曹玉萍, 张忠文, 徐学军, 孙介华 (2001) 河北动物志: 鱼类. 河北科学技术出版社, 石家庄.]

Wang YC, Sun YL, Zhang J, Wang ZL (2014) Climate change characteristics of Haihe River Basin in recent 51 years. Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition), 34(4), 58–63. (in Chinese with English abstract) [王永财, 孙艳玲, 张静, 王中良 (2014) 近51年海河流域气候变化特征分析. 天津师范大学学报(自然科学版), 34(4), 58–63.]

Wang YS, Yang YY (2005) South-to-North Water Transfer Project of China. Yangtze River, 36(7), 2–5, 71. (in Chinese with English abstract) [汪易森, 杨元月 (2005) 中国南水北调工程. 人民长江, 36(7), 2–5, 71.]

Wang YZ, Guo SY, Cui WY (2017) Practice and development of rivers and lakes health assessment in Haihe River Basin. Haihe Water Resources, (4), 7–11. (in Chinese) [王乙震, 郭书英, 崔文彦 (2017) 海河流域河湖健康评估的实践与发展. 海河水利, (4), 7–11.]

Wei FW, Nie YG, Miao HX, Lu H, Hu YB (2014) Advancements of the researches on biodiversity loss mechanisms. Chinese Science Bulletin, 59, 430–437. (in Chinese with English abstract) [魏辅文, 聂永刚, 苗海霞, 路浩, 胡文波 (2014) 生物多样性丧失机制研究进展. 科学通报, 59, 430–437.]

Xiong F, Li WC, Pan JZ (2008) Present status of alien fishes and analysis of relative problems in Fuxian Lake in Yunnan Province. Acta Agriculturae Jiangxi, 20(2), 92–94, 96. (in Chinese with English abstract) [熊飞, 李文朝, 潘继征 (2008) 云南抚仙湖外来鱼类现状及相关问题分析. 江西农业学报, 20(2), 92–94, 96.]

Xiong YH, Qi WG, Wang ZJ (2010) Operation risk study on the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project (Part I): Risk identification in the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 8(3), 1–5. (in Chinese with English abstract) [熊雁晖, 漆文刚, 王忠静 (2010) 南水北调中线运行风险研究(一): 南水北调中线工程风险识别. 南水北调与水利科技, 8(3), 1–5.]

Xiong YL, Zhao N (2020) Analysis of variation in pan evaporation and its influencing factors in Haihe River Basin. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 18(2), 22–30. (in Chinese with English abstract) [熊玉琳, 赵娜 (2020) 海河流域蒸发皿蒸发量变化及其影响. 南水北调与水利科技, 18(2), 22–30.]

Xu HL (2019) Construction and achievements of flood control,

drought relief and disaster reduction systems in the Haihe River Basin. China Flood & Drought Management, 29(10), 61–70. (in Chinese) [徐和龙 (2019) 海河流域防汛抗旱减灾体系建设与成就. 中国防汛抗旱, 29(10), 61–70.]

Yang JX, Pan XF, Chen XY, Wang XA, Zhao YP, Li JY, Li ZY (2013) Overview of the artificial enhancement and release of endemic freshwater fish in China. Zoological Research, 34, 267–280. (in Chinese with English abstract) [杨君兴, 潘晓斌, 陈小勇, 王晓爱, 赵亚鹏, 李建友, 李再云 (2013) 中国淡水鱼类人工增殖放流现状. 动物学研究, 34, 267–280.]

Yang XL, Wang DL (2007) External invasive animals. Acta Agriculturae Jiangxi, 19(6), 125–127, 130. (in Chinese with English abstract) [杨小林, 王德良 (2007) 外来入侵动物. 江西农业学报, 19(6), 125–127, 130.]

Yin MC (1995) Fish Ecology. China Agricultural Press, Beijing. (in Chinese) [殷名称 (1995) 鱼类生态学. 中国农业出版社, 北京.]

Yin W, Wang C, Xin XK (2020) Thinkings on water quality management of main channel in Middle Route of South-to-North Water Transfer Project. Yangtze River, 51(3), 17–24. (in Chinese with English abstract) [尹炜, 王超, 辛小康 (2020) 南水北调中线总干渠水质管理问题与思考. 人民长江, 51(3), 17–24.]

Yu X, Wang YH, He HZ, Chen J (2020) Analysis of nutritional components in muscle of hybrid (*Tinca tinca* & *Cyprinus carpio*). China Fisheries, (8), 79–81. (in Chinese) [于潇, 王延晖, 贺海战, 陈杰 (2020) 丁鲶鱼与黄河鲤鱼杂交种肌肉营养成分分析. 中国水产, (8), 79–81.]

Yuan ZJ, Shen YJ, Chu YM, Qi YQ (2009) Variations and distribution of temperature and precipitation of Haihe River Basin in recent 40 years. Research of Soil and Water Conservation, 16(3), 24–26. (in Chinese with English abstract) [袁再健, 沈彦俊, 褚英敏, 齐永青 (2009) 海河流域近40年来降水和气温变化趋势及其空间分布特征. 水土保持研究, 16(3), 24–26.]

Yue PQ (2000) Fauna Sinica · Osteichthyes · Cypriniformes. III. Science Press, Beijing. (in Chinese) [乐佩琦 (2000) 中国动物志·硬骨鱼纲·鲤形目(下卷). 科学出版社, 北京.]

Zhang CG, Shao GZ, Wu HL, Zhao YH, Xing YC, Niu CY (2020) Species Catalogue of China (Vol. 2): Animals, Vertebrates (V), Fishes (II). Science Press, Beijing. (in Chinese) [张春光, 邵广昭, 伍汉霖, 赵亚辉, 邢迎春, 牛诚祯 (2020) 中国生物物种名录(第二卷): 动物, 脊椎动物(V), 鱼类(II). 科学出版社, 北京.]

Zhang CG, Zhao YH (2013) Fishes in Beijing and Adjacent Areas. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张春光, 赵亚辉 (2013) 北京及其邻近地区的鱼类. 科学出版社, 北京.]

Zhang DC, Zheng JL (2019) Preliminary study on invasion of alien fish species after construction of hydropower projects. Yangtze River, 50(2), 83–89. (in Chinese with English abstract) [张登成, 郑娇莉 (2019) 水电工程建设前后外



- 来鱼类入侵问题初步研究. 人民长江, 50(2), 83–89.]
- Zhang J (2008) Biodiversity and conservation of Salangids. *Bulletin of Biology*, 43(6), 4–6. (in Chinese) [张洁 (2008) 银鱼科鱼类及其物种多样性保护. 生物学通报, 43(6), 4–6.]
- Zhang Q, Hao JF (2011) Research progress on invasion mechanism of alien invasive species. *Guizhou Agricultural Sciences*, 39(6), 94–98. (in Chinese with English abstract) [张巧, 郝建锋 (2011) 外来物种入侵机制的研究进展. 贵州农业科学, 39(6), 94–98.]
- Zhang XA, Sui XY, Lü Z, Chen YF (2014) A prediction of the global habitat of two invasive fishes (*Pseudorasbora parva* and *Carassius auratus*) from East Asia using MaxEnt. *Biodiversity Science*, 22, 182–188. (in Chinese with English abstract) [张熙骐, 隋晓云, 吕植, 陈毅峰 (2014) 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, 22, 182–188.]
- Zhang ZG (2017) Artificial propagation technique of *Tinca tinca*. *Ocean and Fishery*, (4), 60–62. (in Chinese) [张沾光 (2017) 丁鲶鱼人工繁殖技术. 海洋与渔业, (4), 60–62.]
- Zhao YH, Tang WQ, Zhang CG (2002) Status and protection of fish resources in the Shiwan Dashan Mountains, Guangxi, China. *Chinese Journal of Zoology*, 37(6), 43–47. (in Chinese with English abstract) [赵亚辉, 唐文乔, 张春光 (2002) 广西十万大山地区的鱼类资源现状和保护对策. 动物学杂志, 37(6), 43–47.]
- Zhao YH, Zhang CG (2001) Fish fauna and zoogeographical analysis of Shi Wan Da Shan Mountains, Guangxi, China. *Biodiversity Science*, 9, 336–344. (in Chinese with English abstract) [赵亚辉, 张春光 (2001) 广西十万大山地区的鱼类区系及其动物地理学分析. 生物多样性, 9, 336–344.]
- Zheng HZ, Zhang Z, Wu HM, Lei XH (2016) Study on the daily optimized dispatching and economic operation of cascade pumping stations in water conveyance system. *Journal of Hydraulic Engineering*, 47, 1558–1565. (in Chinese with English abstract) [郑和震, 张召, 吴辉明, 雷晓辉 (2016) 梯级泵站输水系统日优化调度及经济运行研究. 水利学报, 47, 1558–1565.]
- Zhou HT, Na XD, Zang SY, Xie RF (2016) Applications of maximum entropy (MaxEnt) model in species habitat study. *Environmental Science and Management*, 41(3), 149–151. (in Chinese with English abstract) [周海涛, 那晓东, 臧淑英, 解瑞峰 (2016) 最大熵(MaxEnt)模型在物种栖息地研究中的应用. 环境科学与管理, 41(3), 149–151.]

(责任编辑: 陈小勇 责任编辑: 闫文杰)

## 附录 Supplementary Material

### 附录1 WorldClim气候数据名称及描述

Appendix 1 The name and description of WorldClim data  
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021130-1.pdf>

### 附录2 南水北调中线工程引水区鱼类名录

Appendix 2 List of fish species in water diversion areas of the central route of the South-to-North Water Diversion Project  
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021130-2.pdf>

附录1 WorldClim气候数据名称及描述

Appendix 1 The name and description of WorldClim data

代码	描述
Code	Description
bio1	年平均气温 Annual mean temperature
bio2	昼夜温差月均值 Mean diurnal range
bio3	等温性 Isothermality
bio4	气温季节性变动系数 Temperature seasonality
bio5	最暖月最高温 Max temperature of the warmest month
bio6	最冷月最低温 Min temperature of the coldest month
bio7	年均温变化范围 Temperature annual range
bio8	最湿季平均温度 Mean temperature of the wettest quarter
bio9	最干季平均温度 Mean temperature of the driest quarter
bio10	最暖季平均温度 Mean temperature of the warmest quarter
bio11	最冷季平均温度 Mean temperature of the coldest quarter
bio12	年均降水量 Annual precipitation
bio13	最湿月降水量 Precipitation of wettest month
bio14	最干月降水量 Precipitation of driest month
bio15	降水量变异系数 Precipitation seasonality
bio16	最湿季降水量 Precipitation of the wettest quarter
bio17	最干季降水量 Precipitation of the driest quarter
bio18	最暖季降水量 Precipitation of the warmest quarter
bio19	最冷季降水量 Precipitation of the coldest quarter

附录2 南水北调中线工程引水区鱼类名录

Appendix 2 List of fish species in water diversion areas of the central route of the South-to-North Water Diversion Project

物种 Species	引水区 Water diversion areas	海河流域 Haihe River Basin
<b>鲤形目 Cypriniformes</b>		
鲤科 Cyprinidae		
雅罗鱼亚科 Leuciscinae		
鳊 <i>Elopichthys bambusa</i>	+	+
青鱼 <i>Mylopharyngodon piceus</i>	+	+
拉氏大吻鲃 <i>Rhynchocypris lagowskii</i>	+	+
尖头大吻鲃 <i>Phoxinus oxycephalus</i>	+	+
丁鲃 <i>Tinca tinca</i>	+	
赤眼鲮 <i>Squaliobarbus curriculus</i>	+	+
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	+	+
鲃亚科 Culterinae		
尖头鲃 <i>Chanodichthys oxycephalus</i>	+	+
红鳍原鲃 <i>Cultrichthyserys thropterus</i>	+	+
鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	+	+
团头鲂 <i>Megalobrama amblycephala</i>	+	+
鲂 <i>Megalobrama skolkovii</i>	+	+
鳊 <i>Parabramis pekinensis</i>	+	+
寡鳞鲃 <i>Pseudolaubuca engraulis</i>	+	+
鲃 <i>Pseudolaubuca sinensis</i>	+	+
伍氏华鲃 <i>Sinibrama wui</i>	+	+
鲴亚科 Xenocyprininae		
扁圆吻鲴 <i>Distoechodon tumirostris</i>	+	+
银鲴 <i>Xenocypris argentea</i>	+	+
黄尾鲴 <i>Xenocypris davidi</i>	+	+
细鳞鲴 <i>Xenocypris micolepis</i>	+	+
鲢亚科 Hypophthaemichthyinae		
鲢 <i>Aristichthys nobilis</i>	+	+



物种 Species	引水区 Water diversion areas	海河流域 Haihe River Basin
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	+	+
鲮亚科 <i>Acheilognathinae</i>		
大鳍鲮 <i>Acheilognathus macropterus</i>	+	+
寡鳞鲮 <i>Acanthorhodeus hypsefonotus</i>	+	+
短须鲮 <i>Acheilognathus barbatulus</i>	+	+
彩副鲮 <i>Paracheilognathus imberbis</i>	+	+
方氏鲮 <i>Rhodeus fangi</i>	+	+
高体鲮 <i>Rhodeus ocellatus</i>	+	+
中华鲮 <i>Rhodeus sinensis</i>	+	+
鲃亚科 <i>Gobioidae</i>		
棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i>	+	+
棒花鲃 <i>Gobio rivuloides</i>	+	+
钝吻棒花鱼 <i>Abbottina obtusirostris</i>	+	+
嘉陵颌须鲃 <i>Gnathopogon herzensteini</i>	+	
细纹颌须鲃 <i>Gnathopogon taeniellus</i>	+	
短须颌须鲃 <i>Gnathopogon imberbis</i>	+	
唇鲮 <i>Hemibarbus labeo</i>	+	+
花鲮 <i>Hemibarbus maculatus</i>	+	+
乐山小鰾鲃 <i>Microphysogobio kiatingensis</i>	+	+
似鲃 <i>Pseudogobio vaillantivaillant</i>	+	+
麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i>	+	+
吻鲃 <i>Rhinogobio typus</i>	+	
黑鳍鲃 <i>Sarcocheilichthys nigripinnis</i>	+	+
长蛇鲃 <i>Saurogobio dumerili</i>	+	+
蛇鲃 <i>Saurogobio dabryi</i>	+	+
银鲃 <i>Squalidus argentatus</i>	+	+
亮银鲃 <i>Squalidus nitens</i>	+	+
点纹银鲃 <i>Squalidus wolterstorffi</i>	+	+

物种 Species	引水区 Water diversion areas	海河流域 Haihe River Basin
鲇亚科 Gobiobotinae		
宜昌鲇 <i>Gobiobotia filifer</i>	+	
潘氏鲇 <i>Gobiobotia pappenheimi</i>	+	+
鲤亚科 Cyprininae		
鲫 <i>Carassius auratus</i>	+	+
银鲫 <i>Carassius auratus gibelio</i>	+	+
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	+	+
鲴亚科 Barbinae		
多鳞白甲鱼 <i>Onychostoma macrolepis</i>	+	+
条鲃科 Noemacheilinae		
北方须鲃 <i>Barbatula nuda</i>	+	+
达里湖高原鲃 <i>Triplophysa dalaica</i>	+	+
红尾副鲃 <i>Homatula variegatus</i>	+	+
花鲃科 Cobitidae		
中华花鲃 <i>Cobitis sinensis</i>	+	+
大斑花鲃 <i>Cobitis macrostigma</i>	+	+
稀有花鲃 <i>Cobitis raras</i>	+	+
泥鲃 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	+	+
大鳞副泥鲃 <i>Paramisgurnus dabryanus</i>	+	+
花斑副沙鲃 <i>Parabotia bimaculata</i>	+	+
爬鲃科 Balitoridae		
犁头鲃 <i>Lepurichthys fimbriata</i>	+	+
<b>鲇形目 Siluriformes</b>		
钝头鲃科 Amblycipitidae		
拟缘鲃 <i>Liobagrus marginatoides</i>	+	
白缘鲃 <i>Liobagrus marginatus</i>	+	
鮡科 Sisoridae		
中华纹胸鮡 <i>Glyptothorax sinensis</i>	+	

物种 Species	引水区 Water diversion areas	海河流域 Haihe River Basin
鲇科 Siluridae		
鲇 <i>Silurus asotus</i>	+	+
大口鲇 <i>Silurus meridionalis</i>	+	
鲿科 Bagridae		
大鳍鲿 <i>Hemibagrus macropterus</i>	+	+
粗唇鲿 <i>Leiocassis crassilabris</i>	+	+
长吻鲿 <i>Leiocassis longirostris</i>	+	+
叉尾鲿 <i>Leiocassis tenuifurcatus</i>	+	+
黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	+	+
光泽黄颡鱼 <i>Pelteobagrus nitidus</i>	+	
瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachellii</i>	+	+
盎堂拟鲿 <i>Pseudobagrus ondon</i>	+	+
圆尾拟鲿 <i>Pseudobagrus tenuis</i>	+	+
切尾拟鲿 <i>Pseudobagrus truncatus</i>	+	
乌苏里拟鲿 <i>Pseudobagrus ussuriensis</i>	+	+
颌针鱼目 Beloniformes		
大颌鲂科 Adrianichthyidae		
青鲂 <i>Oryzias latipes</i>	+	+
中华青鲂 <i>Oryzias latipes</i>	+	+
鲃鱼科 Hemiramphidae		
间下鲃 <i>Hyporhamphus intermedius</i>	+	+
鲃 <i>Hyporhamphus kurumus</i>	+	+
胡瓜鱼目 Osmeriformes		
胡瓜鱼科 Osmeridae		
池沼公鱼 <i>Hypomesus olidus</i>	+	+
银鱼科 Salangidae		
大银鱼 <i>Protosalanx chinensis</i>	+	+
陈氏新银鱼 <i>Neosalanx tangkahkeii</i>	+	



物种 Species	引水区 Water diversion areas	海河流域 Haihe River Basin
<b>鲑形目 Salmoniformes</b>		
鲑科 Salmonidae		
秦岭细鳞鲑 <i>Brachymystax lenok tsinlingensis</i>	+	
川陕哲罗鲑 <i>Hucho bleekeri</i>	+	
<b>刺鱼目 Gasterosteiformes</b>		
刺鱼科 Gasterosteidae		
中华多刺鱼 <i>Pungitius sinensis</i>	+	+
<b>合鳃鱼目 Synbranchiformes</b>		
合鳃鱼科 Synbranchidae		
黄鳝 <i>Monopterus albus</i>	+	+
中华刺鳅 <i>sinobdella sinensis</i>	+	+
<b>鲈形目 Perciformes</b>		
脂鲈科 Percichthyidae		
鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	+	+
大眼鳊 <i>Siniperca knerii</i>	+	
斑鳊 <i>Siniperca scherzeri</i>	+	+
沙塘鳢科 Odontobutidae		
中华沙塘鳢 <i>Odontobutis sinensis</i>	+	
小黄鲷鱼 <i>Micropercops swinhonis</i>	+	+
虾虎鱼科 Gobiidae		
波氏吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius cliffordpopei</i>	+	+
子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>	+	+
神农吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius shennongensis</i>	+	+
斗鱼科 Osphronemidae		
圆尾斗鱼 <i>Macropodus chinensis</i>	+	+
鳢科 Channidae		
乌鳢 <i>Channa argus</i>	+	+