

DOI: 10.5846/stxb202204110952

唐杨欣, 皮杰, 刘新华, 向建国, 曾聪, 李德亮. 基于最大熵模型预测气候变化下河蚬在中国的潜在分布. 生态学报, 2023, 43(10): 4250-4259.  
Tang Y X, Pi J, Liu X H, Xiang J G, Zeng C, Li D L. Predicting potential distribution of *Corbicula fluminea* under climate change scenarios using MaxEnt model. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10): 4250-4259.

# 基于最大熵模型预测气候变化下河蚬在中国的潜在分布

唐杨欣<sup>1</sup>, 皮杰<sup>1</sup>, 刘新华<sup>1</sup>, 向建国<sup>1</sup>, 曾聪<sup>2</sup>, 李德亮<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> 湖南农业大学水产学院, 长沙 410128

<sup>2</sup> 上海交通大学海洋学院, 上海 200030

**摘要:** 河蚬是一类在我国广泛分布的底栖贝类, 具有重要的经济价值及生态价值。近年来, 河蚬野生资源量锐减, 了解河蚬在国内的潜在分布能为河蚬的保护和合理利用提供重要参考。基于河蚬在中国的 136 个分布点和 8 个环境因子, 采用 ENMeval 包和 biasfile 优化后的最大熵模型 (MaxEnt) 预测分别河蚬现代和未来 (2041—2060 年和 2081—2100 年) 6 个气候情景下的潜在分布。综合 Jackknife 检验、置换重要值和环境因子贡献率评估影响现代河蚬潜在分布的主要因子, 比较未来气候情景下潜在适生区差异从而分析预测河蚬适宜分布的变化。结果表明: (1) 优化后的 MaxEnt 模型预测准确度极高, 平均 AUC 值为  $0.900 \pm 0.037$ , 平均  $AUC_{DIFF}$  值为 0.019, 现代河蚬潜在分布区域总面积为  $188.33 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 主要集中在长江流域、海河流域、淮河流域、珠江流域、东南沿海区域以及黄河流域下游和渤海湾沿岸区域。(2) 影响河蚬潜在分布的主要环境因子为海拔、温度 (年均温和温度年较差) 和降水 (年降水量)。(3) 在未来 6 种气候情景下, 河蚬主要潜在分布区有向北和向西移动的趋势, 潜在适生区面积在 SSP245 情景下明显减少, 而在 SSP126 和 SSP585 情景下呈先增加后减少趋势, 这也表明气候变化下河蚬在我国的潜在分布存在缩减的风险。

**关键词:** 河蚬; 气候变化; 最大熵模型 (MaxEnt); 潜在分布

## Predicting potential distribution of *Corbicula fluminea* under climate change scenarios using MaxEnt model

TANG Yangxin<sup>1</sup>, PI Jie<sup>1</sup>, LIU Xinhua<sup>1</sup>, XIANG Jianguo<sup>1</sup>, ZENG Cong<sup>2</sup>, LI Deliang<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> College of Fisheries, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

<sup>2</sup> School of Oceanography, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China

**Abstract:** *Corbicula fluminea* is a benthic shellfish with substantially commercial and ecological value that is extensively dispersed in China. In recent years, the wild stocks of *C. fluminea* have been decreasing rapidly. Understanding the potential distribution of *C. fluminea* in China could be useful for their conservation and rational utilization. Based on 136 recorded points and 8 environmental factors in China, the MaxEnt model optimized by the ENMeval package and biasfile were used to predict the potential distribution of *C. fluminea* under six climate scenarios in the current and future (2041—2060 and 2081—2100, respectively). The Jackknife test, permutation importance, and environmental factor contribution rates were combined to examine the main factors determining the potential distribution of modern *C. fluminea*, and to compare the predicted distribution differences under future climate scenarios. The results showed that the optimized MaxEnt

**基金项目:** 国家自然科学基金 (31772832); 国家重点研发计划 (2019YFD090060603); 湖南省现代农业产业技术体系项目 (湘农发[2019]105号)

收稿日期: 2022-04-11; 采用日期: 2023-03-15

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lidl@hunau.edu.cn

model was very accurate, with an average AUC (area under curve) value of  $0.900 \pm 0.037$  and an average  $AUC_{DIFF}$  value of 0.019. The main environmental factors affecting the potential distribution of *C. fluminea* were elevation, temperature (annual mean temperature and temperature annual range), and precipitation (annual precipitation). The overall area of potential distribution of *C. fluminea* was  $188.33 \times 10^4 \text{ km}^2$ , with the majority of it concentrated in the Yangtze River basin, the Haihe River basin, the Huaihe River basin, the Pearl River basin, southeast coastal region, the Yellow River basin and the Bohai Bay coastal region. Under the six future climate scenarios, the main potential distribution areas of *C. fluminea* tended to move northwards and westwards, and the potential habitat area would decrease significantly under the SSP245 scenario, whereas it would increase and then decrease under the SSP126 and SSP585 scenarios, implying that the potential distribution of *C. fluminea* in China would be at risk of contraction under climate change.

**Key Words:** *Corbicula fluminea*; climate change; MaxEnt model; potential distribution

河蚬 (*Corbicula fluminea*), 隶属于软体动物门 (Mollusca)、双壳纲 (Bivalvia)、帘蛤目 (Venerida)、蚬科 (Cyrenidae)、蚬属 (*Corbicula*), 是一类滤食性、营底栖生活的水生动物, 广泛分布于我国大多数省份的江河、湖泊、沟渠和池塘等淡水或咸淡水水域<sup>[1-2]</sup>。河蚬的原产地位于亚洲、非洲、澳洲和中东地区, 但其分布范围在过去的一百多年间已扩展到美洲和欧洲<sup>[3-5]</sup>。1924 年, 河蚬首次在原产地之外的北美洲温哥华岛被发现, 之后迅速在美洲大陆上扩散, 大约在 20 世纪 70 年代已经出现在南美洲, 到 20 世纪 80 年代已经遍布美洲大陆, 并于 1980 年入侵到了欧洲的葡萄牙和法国<sup>[6-9]</sup>。在欧美地区, 河蚬被认为是水域生态系统中最重要的人侵物种之一, 给当地带来了严重的经济损失和生态影响<sup>[3, 10-11]</sup>。在我国, 河蚬具有十分重要的经济价值, 其养殖已有数百年历史, 河蚬肉可作食用和药用, 河蚬加工品还可出口到国外<sup>[1]</sup>。此外, 河蚬也具有一定的生态价值。有研究表明河蚬可作为水体沉积物污染监测和毒性评价的有效指示生物, 对部分富营养水体也有一定的改善作用<sup>[12-13]</sup>。受捕捞活动和水体污染等因素的影响, 河蚬野生资源量相比于 20 世纪 80 年代初已发生了剧烈衰减<sup>[14-15]</sup>。因此, 了解河蚬在国内的分布能为保护和合理利用河蚬野生资源提供基础。

近年来, MaxEnt、GARP 和 BIOCLIM 等物种分布模型 (Species distribution model, SDM) 已被广泛用于预测物种的潜在栖息地以及气候变化下物种的潜在分布变化<sup>[16-19]</sup>。MaxEnt (Maximum Entropy modeling, 最大熵模型) 是一种利用物种分布数据和环境数据, 以机器学习和最大熵原理为基础预测物种潜在地理分布的物种分布模型<sup>[16, 20]</sup>。MaxEnt 模型预测效果优于常用的 GARP 和 BIOCLIM 等分布模型, 并且在数据不全、数据量小等情况下都能取得不错的预测效果<sup>[16, 21]</sup>。McDowell 等运用 MaxEnt 模型研究了未来气候条件下河蚬在美国的扩散, 结果表明未来河蚬会继续向美国的西部和北部扩张, 潜在分布面积会增加 25%—32%<sup>[16]</sup>。Gama 等利用包括 BIOCLIM 模型在内的 BIOMOD2 包预测了河蚬在全球的适宜栖息地分布以及未来气候变化对河蚬分布的影响, 发现气候变化将有利于河蚬向新的水域, 尤其是高纬度地区的水域扩张, 河蚬的潜在分布面积大幅增加<sup>[17-18]</sup>。Reyna 等基于 BIOMOD2 包的预测结果同样表明河蚬未来会在北美和欧洲进一步扩张, 但在澳大利亚和北美南部的分布会出现一定的缩减<sup>[22]</sup>。有研究表明, 海拔<sup>[10, 17]</sup>、温度<sup>[10, 16-17]</sup>、降水<sup>[16]</sup>等环境因子都对河蚬分布有重要影响。目前, 尚未有河蚬在国内潜在分布范围的报道, 且未来气候变化对河蚬在国内分布和扩散的影响有待解析。

本研究在获取河蚬分布数据的基础上, 应用 MaxEnt 模型分析国内河蚬分布及其与环境因子的关系, 以期探明影响河蚬分布的主要环境因子, 预测河蚬在现代和未来气候情景下的潜在分布范围及其变化, 研究结果对我国河蚬野生资源的保护和合理利用具有重要的参考价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 物种分布数据

通过收集整理河蚬相关中英文文献资料中的采样点数据以及采样信息, 以及检索全球生物多样性信息机

构数据库 (GBIF, <https://www.gbif.org/>), 剔除信息缺失、重复和无效数据后, 共计收集河蚬样本分布点 136 个 (见图 1), 其中从文献中获取分布点 80 个, 从 GBIF 数据库中获取分布点 56 个。将获得的样本分布点坐标以 Excel 软件存储并导出为 CSV 格式, 用于建立 MaxEnt 模型。

## 1.2 环境因子数据

本研究共选取了气候因子和地形因子两类环境因子, 气候因子包括来源于世界气候数据网站 (<https://www.worldclim.org/>, v 2.1) 的现代气候数据 (1970—2000 年) 以及两个时期 (2041—2060 年和 2081—2100 年) 的未来气候数据。未来气候数据均来自第六次国际耦合模式比较计划 (CMIP6), 由国家 (北京) 气候中心发展的 BCC-CSM2-MR 气候系统模式生成, 选取了

SSP (Shared socioeconomic pathway, 共享社会经济路径) 126 (低水平温室气体排放)、SSP245 (中水平温室气体排放) 和 SSP580 (高水平温室气体排放) 三种气候情景<sup>[23–25]</sup>。所有数据均选用 bio1—bio19 共 19 个气候因子, 数据分辨率为 2.5 arcmin。地形因子包括来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>), 分辨率为 500 m 的数字高程模型 (Digital elevation model, DEM) 数据, 以及基于该 DEM 数据计算得到的海拔 (Elevation, elev)、坡度 (Slope, slo) 和坡向 (Aspect, asp) 数据。地图数据来源于中华人民共和国自然资源部标准地图服务 (<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>), 所使用的标准地图审图号为 GS(2019)1823 号。

## 1.3 最大熵模型的构建

使用 ArcGIS 10.8 软件处理所有环境因子数据, 得到范围一致, 分辨率为 2.5 arcmin 的 ASCII 格式数据。将所用环境数据以及分布数据输入到 R v4.0.5 中, 使用 ENMTools 包计算所有环境因子的皮尔逊相关系数 ( $r$ ), 剔除一组相关性很高 ( $|r| > 0.8$ ) 的变量中与物种分布关联相对较小的因子, 最终得到 8 个用于构建模型的环境因子, 包括年均温 (Annual mean temperature, bio1)、等温性 (Isothermality, bio3)、温度年较差 (Temperature annual range, bio7)、年降水量 (Annual precipitation, bio12)、降水量变异系数 (Precipitation seasonality, bio15)、海拔 (Elevation, elev)、坡度 (Slope, slo) 和坡向 (Aspect, asp)。研究表明, 在 MaxEnt 中使用默认参数会导致模型预测过拟合<sup>[26]</sup>, 因此使用 ENMeval 包计算构建模型最优的特征组合 (Feature combination, FC) 和调控倍频 (Regulatory multiplier, RM) 以优化模型的预测结果<sup>[27]</sup>。MaxEnt 模型假设所有分布数据为随机或系统采样所得, 而来源于文献或数据库中的数据通常存在采样偏差<sup>[28–29]</sup>, 因此基于当前分布数据使用 MASS 包生成 biasfile 以校正采样偏差对模型准确性的影响<sup>[26, 30]</sup>。将分布数据、环境因子数据、模型优化参数以及生成的 biasfile 输入到 MaxEnt 3.4.1 ([https://biodiversityinformatics.amnh.org/open\\_source/maxent/](https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/)) 软件中, 采用交叉验证法 (Crossvalidate), 将河蚬的分布数据随机均分为 10 份, 每次运算选取其中 1 份为测试集, 其余 9 份为训练集, 重复运行 10 次, 最大迭代次数设置为 5000 次, 确保模型运行结果达到收敛。将重复运行 10 次输出结果的平均值导入 ArcGIS 10.8 中, 采用重分类工具按 Cloglog 值 (可视为分布概率值) 大小将适宜度划分为 4 个等级: 非适宜 (0—0.2)、低适宜 (0.2—0.4)、中适宜 (0.4—0.6) 和高适宜 (0.6—1)<sup>[25, 31]</sup>。

## 1.4 模型准确性评价

使用受试者工作特征曲线 (Receiver operating characteristic curve, ROC) 对模型构建的效果进行检验, 曲线下面积 (Area under curve, AUC) 为判断模型预测的准确度的指标。AUC 值越大, 说明预测结果距离随机模型越远, 预测效果越好, AUC 值低于 0.6 表明预测失败,  $0.6 < AUC < 0.7$  为准确性较差,  $0.7 < AUC < 0.8$  为较准

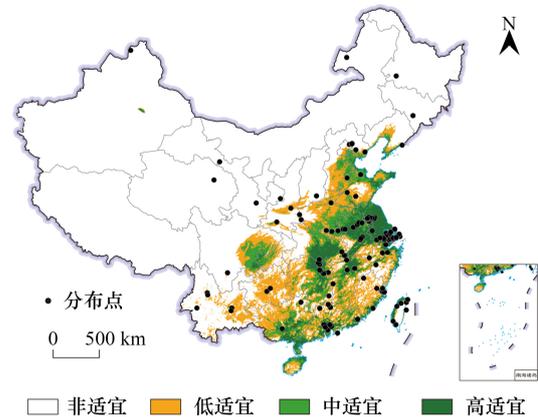


图 1 河蚬现代潜在分布

Fig.1 Predicted current distribution of *C. fluminea*

确,  $0.8 < AUC < 0.9$  为很准确,  $0.9 < AUC < 1$  为极准确<sup>[21]</sup>。采用训练 AUC 值 ( $AUC_{\text{training}}$ ) 与测试 AUC 值 ( $AUC_{\text{test}}$ ) 之差  $AUC_{\text{DIFF}}$  检验模型的过拟合程度,  $AUC_{\text{DIFF}}$  越接近 0 表明模型过拟合程度越低, 预测效果越好<sup>[32-33]</sup>。综合分析 MaxEnt 模型输出的环境因子贡献率、置换重要值和刀切法 (Jackknife) 检验结果, 确定影响河蚬分布的主要环境因子, 依据主要环境因子的响应曲线分析河蚬对各环境因子的适宜范围 ( $\text{Cloglog} \geq 0.2$ )。

### 1.5 潜在适生区变化分析

为探究未来河蚬潜在适生区的空间格局变化, 参考相关研究, 利用 ArcGIS 10.8 软件将所有预测结果进行重分类并转换成由“0”和“1”组成的二元矩阵文件,  $\text{Cloglog} \geq 0.4$  的区域, 即中适生区和高适生区作为河蚬的潜在适生区, 用“1”表示;  $\text{Cloglog} < 0.4$  的区域划分为非适生区, 用“0”表示<sup>[25]</sup>。以现代河蚬的潜在适生区作为基准计算未来潜在适生区的变化。根据矩阵值的变化情况, 可分为新增区 (矩阵值由 0 到 1)、保持区 (矩阵值由 1 到 1) 以及丧失区 (矩阵值由 1 到 0)。比较分析后的结果输入到 ArcGIS 10.8 中, 完成河蚬未来潜在适生区格局变化的可视化表达。各类型适生区及区域变化面积均使用 ArcGIS 10.8 统计后得到。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型预测准确性评价

将分布数据以及选取的 8 个环境因子数据输入到 MaxEnt 中重复运行 10 次后, 得到的平均 AUC 值为  $0.900 \pm 0.037$ , 平均  $AUC_{\text{DIFF}}$  值为 0.019, 表明 Maxent 模型预测的河蚬在国内的潜在分布结果极准确, 能有效避免过拟合现象。

### 2.2 河蚬潜在分布的影响因子

如表 1 所示, 在参与 Maxent 模型预测的 8 个环境因子中, 贡献率排名前四的环境因子累计贡献占比达 92.4%, 依次分别为海拔 (elev, 51.7%)、年均温 (bio1, 30.3%)、温度年较差 (bio7, 5.9%) 和年降水量 (bio12, 4.5%)。置换重要值 (置换重要值的大小反映模型对该变量的依赖程度) 位居前四的环境因子分别为海拔 (elev, 45.0%)、温度年较差 (bio7, 37.8%)、坡度 (slo, 6.5%) 以及年降水量 (bio12, 6.2%), 累计值为 95.5%。

表 1 各环境因子贡献率和置换重要值

Table 1 Environmental factors and their contributions and permutation importance

环境因子 Environmental factor	贡献率/% Percent contribution	置换重要值/% Permutation importance	环境因子 Environmental factor	贡献率/% Percent contribution	置换重要值/% Permutation importance
elev	51.7	45.0	bio3	4.3	0.8
bio1	30.3	1.2	slo	2.2	6.5
bio7	5.9	37.8	bio15	0.8	2.0
bio12	4.5	6.2	asp	0.3	0.4

elev: 海拔 Elevation; bio1: 年均温 Annual mean temperature; bio7: 温度年较差 Temperature annual range; bio12: 年降水量 Annual precipitation; bio3: 等温性 Isothermality; slo: 坡度 Slope; bio15: 降水量变异系数 Precipitation seasonality; asp: 坡向 Aspect

在刀切法 (Jackknife) 检验中, 仅使用单一环境因子时获得的测试增益越大, 说明该因子包含越多其他环境因子不具有的信息。由图 2 可知, 使用所有环境因子时得到的测试增益值为 1.49, 而单独使用海拔 (elev)、年均温 (bio1)、年降水量 (bio12) 以及温度年较差 (bio7) 进行检验时, 所获得的测试增益值位居前四, 分别为 1.20、0.88、0.74 和 0.57。

综合分析三种方法的检验结果可知, 海拔 (elev)、年均温 (bio1)、年降水量 (bio12) 和温度年较差 (bio7) 是影响河蚬潜在适宜分布的主要环境因子, 表明河蚬在我国分布受海拔、温度和降水的影响较大。根据各主要因子的响应曲线可得出 (图 3), 河蚬对海拔 (elev)、年均温 (bio1)、年降水量 (bio12) 以及温度年较差 (bio7) 的适宜范围分别为:  $< 436 \text{ m}$ 、 $> 9.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $> 526 \text{ mm}$  和  $< 42.3$ 。

### 2.3 现代气候条件下河蚬在中国的潜在分布

根据现代潜在分布预测结果(图1)可知河蚬在国内的分布十分广泛,在我国云南、四川、重庆、贵州、陕西、山西、河南、湖北、湖南、广西、广东、香港、澳门、海南、辽宁、河北、北京、天津、山东、江苏、安徽、上海、浙江、江西、福建、台湾以及新疆等省份(市和区)都存在潜在分布。现代河蚬的潜在分布范围总面积为 $188.33 \times 10^4 \text{ km}^2$ (表2),中适宜区和高适宜区面积分别为 $49.70 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $43.77 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,合计约占总分布面积的49.6%,低适宜区面积为 $94.86 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,约占总分布面积的50.4%。其中高适宜区主要集中在长江流域、海河流域、淮河流域、珠江流域、东南沿海区域以及黄河流域下游和渤海湾沿岸区域。

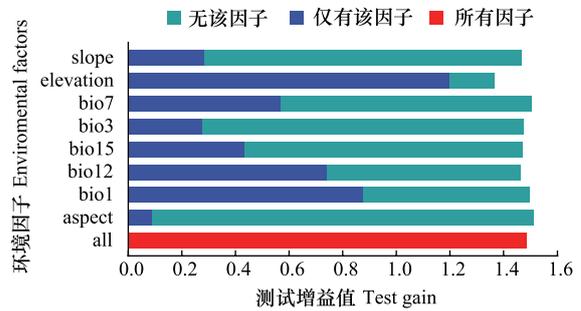


图2 环境因子刀切法检验结果

Fig.2 The jackknife test result of environmental factors

slope: 坡度; elevation: 海拔; bio7: 温度年较差 Temperature annual range; bio3: 等温性 Isothermality; bio15: 降水量变异系数 Precipitation seasonality; bio12: 年降水量 Annual precipitation; bio1: 年均温 Annual mean temperature; aspect: 坡向

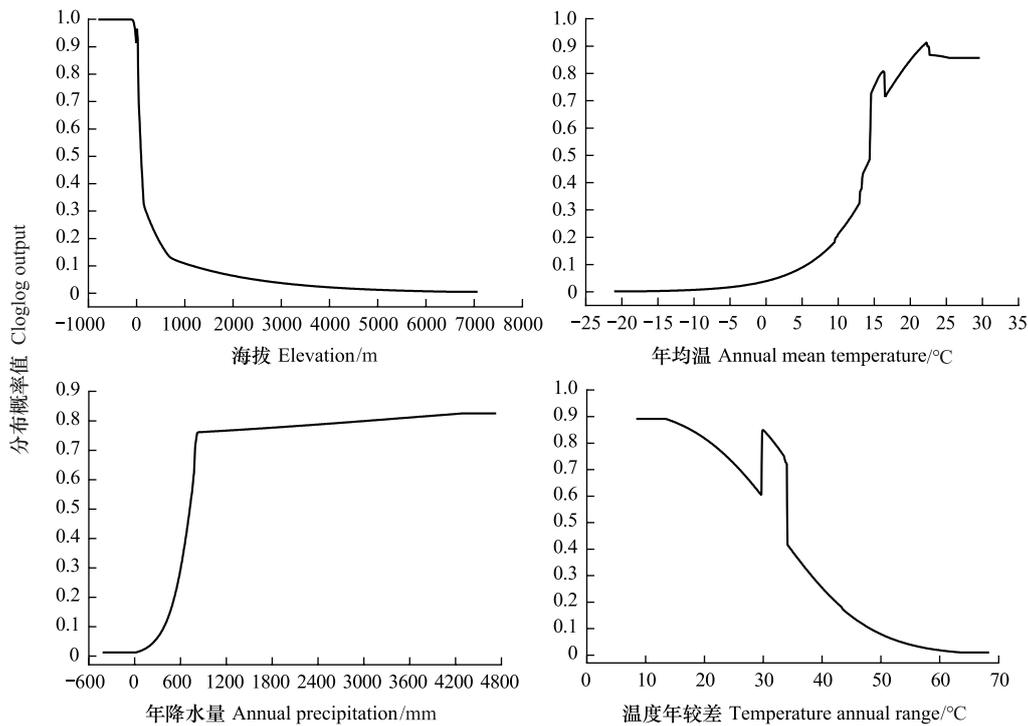


图3 主要环境因子响应曲线

Fig.3 Response curve of main environmental factors

表2 不同时期河蚬的潜在分布范围/( $\times 10^4 \text{ km}^2$ )

Table 2 Predicted distribution coverages of *C. fluminea* in different periods

时期 Period	现代 Current	2041—2060			2081—2100		
		SSP126	SSP245	SSP585	SSP126	SSP245	SSP585
低适宜 Less suitable	94.86	119.91	92.17	105.57	89.61	91.43	102.74
中适宜 Middle suitable	49.70	46.21	38.22	49.04	33.14	38.94	46.06
高适宜 Highly suitable	43.77	46.37	37.85	44.51	37.39	36.92	41.39
合计 Total	188.33	212.49	168.24	199.13	160.14	167.30	190.19

## 2.4 未来气候情景下河蚬在中国的潜在分布及变化

未来时期 6 个 SSP 气候情景下,河蚬的潜在分布以及高适宜区范围与现代气候下的预测结果极为相似(图 4)。如表 2 所示,相较于现代气候情景,河蚬的潜在分布总面积在 SSP245 气候情景下发生了小幅缩减,而在 SSP126 和 SSP585 情景下为先增加而后减少。在 2041—2060 时期,与现代河蚬各适宜区的范围相比,SSP126 和 SSP585 气候情景下的高、低适宜区面积有一定幅度的增加,中适宜区面积则有小幅缩减,SSP245 气候情景下高、中、低适宜区面积均发生了减少。而到 2081—2100 时期,除 SSP585 情景下的低适宜区面积有小幅增加外,三个气候情景下高、中、低适宜区面积均出现了不同程度的减少。

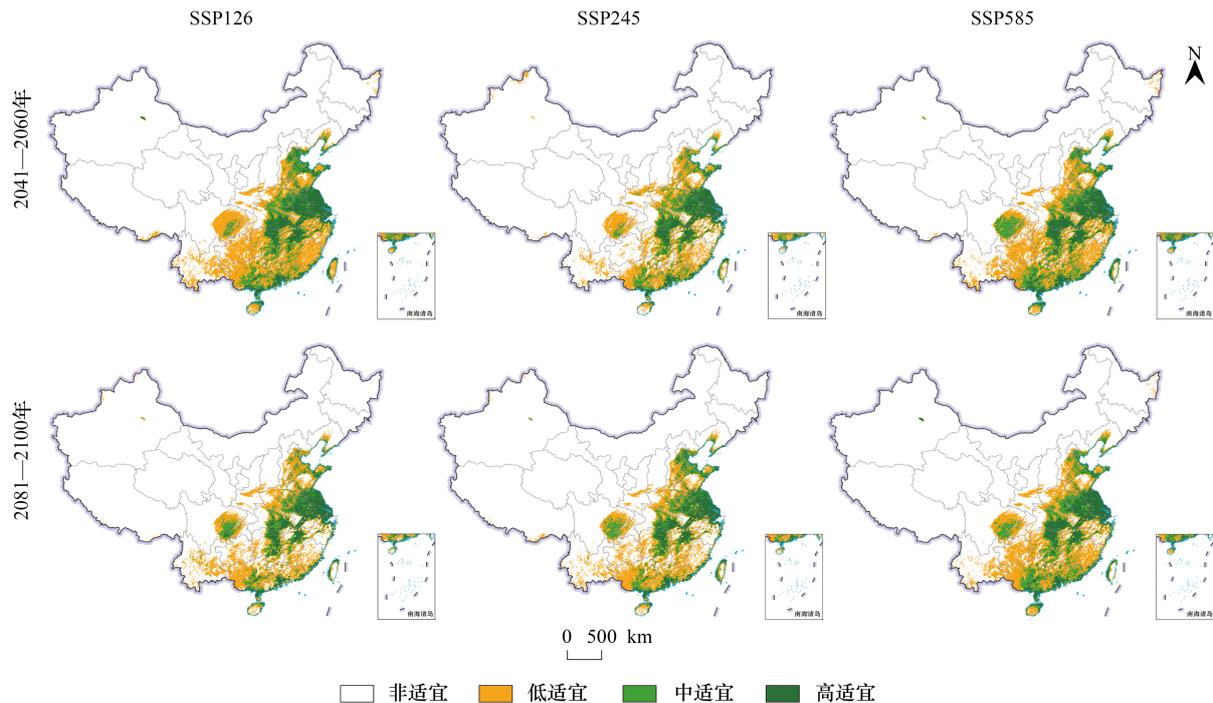


图 4 未来气候情景下河蚬的潜在分布

Fig.4 Predicted distributions of *C. fluminea* under future climate change scenarios

基于现代潜在分布结果比较分析 6 个未来气候情景下河蚬潜在适生区的空间格局变化(表 3 和图 5),结果显示,在未来气候情景下,河蚬现代中、高适宜区的绝大部分范围均属于保持区,6 个未来气候情景下的保持率为 74.43%—90.43%;新增区在不同气候情景下的新增率为 0.66%—11.35%,集中出现在广西、广东、江西、湖北、河南、山东、河北、北京、辽宁、新疆和台湾等省份,呈现零星分布的趋势;丧失区在不同气候情景下丧失率为 4.51%—25.57%,不同气候情景下的面积存在较大差距,2081—2100 年 SSP126 情景下丧失区面积最大,集中在四川、广西、广东、海南、湖南、湖北、江西、浙江、安徽、河南、山东、河北、天津和辽宁等省份。同时期 SSP585 情景下丧失区面积最小,除广东、湖南、江西和辽宁等省份以外,集中分布的区域与同时期 SSP126 情景相似。此外,在云南、陕西、新疆以及台湾等省份也偶有丧失区出现。从 2041—2060 年到 2081—2100 年,河蚬主要潜在适生区呈现向北和向西扩张的趋势。

## 3 讨论

### 3.1 模型预测结果的可靠性

环境因子的选择会影响物种分布模型的预测效果,同时使用地形和环境因子预测河蚬的潜在分布被认为能取得更好的预测结果<sup>[17]</sup>。构建模型时,使用 ENMeval 包优化参数和构建 biasfile 校正采样偏差可进一步降低模型的过拟合程度,提高模型预测的准确性<sup>[25—26]</sup>。本研究模型经优化后获得的平均 AUC 值为  $0.900 \pm$

0.037, 平均  $AUC_{DIFF}$  值为 0.019, 表明预测结果具有极高的准确性, 过拟合程度低。早期的研究指出, 河蚬广泛分布于我国 23 个省(市和区), 覆盖我国东北、华东和中南地区绝大部分省份以及华北、西北和西南地区的部分省份<sup>[1]</sup>。近年来的研究在我国长江、淮河、黄河、西江以及珠江等流域均发现了河蚬的分布<sup>[34]</sup>。本实验室此前的采样工作也验证了河蚬在岷江、洞庭湖流域、鄱阳湖、太湖、洪泽湖、淀山湖、巢湖以及崇明岛等区域的分布。上述结果与本研究所预测现代河蚬的潜在分布较为吻合, 与河蚬中、高适宜区的分布也较为一致, 表明本研究的结果具有较高的可靠性。

表 3 未来气候情景下河蚬潜在分布范围变化

Table 3 Changes of predicted distribution coverages of *C. fluminea* under future climate scenarios

时期 Time	气候情景 Scenario	面积 Area/( $\times 10^4$ km <sup>2</sup> )			变化率 Change/%		
		新增 Increase	保持 Reserved	丧失 Lost	新增率 Increase rate	保持率 Reserved rate	丧失率 Lost rate
2041—2060	SSP126	8.50	83.40	9.63	9.10	89.23	10.30
	SSP245	2.32	73.11	19.92	2.49	78.22	21.31
	SSP585	8.30	84.52	8.46	8.88	90.43	9.05
2081—2100	SSP126	0.62	69.57	23.90	0.66	74.43	25.57
	SSP245	2.45	72.76	20.27	2.62	77.84	21.68
	SSP585	10.61	82.87	4.22	11.35	88.65	4.51

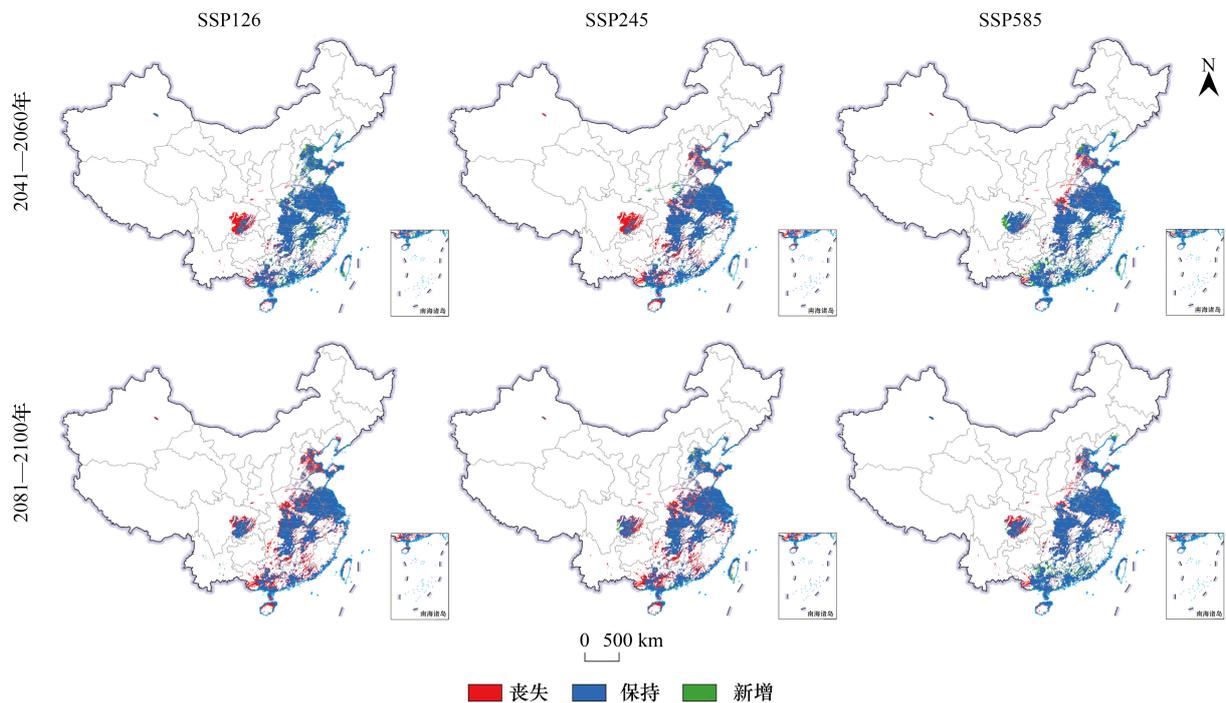


图 5 未来气候情景下河蚬的潜在分布变化

Fig.5 Changes of predicted distributions of *C. fluminea* under future climate scenarios

### 3.2 影响河蚬分布的主要环境因子

本研究的结果表明, 海拔、温度(温度年较差和等温性)以及降水(年降水量)都是影响河蚬分布的主要环境因子。Crespo 等和 Gama 等针对河蚬的研究均表明海拔和温度是影响河蚬分布的重要环境因子<sup>[10, 17]</sup>; McDowell 等的模型研究结果表明温度和降水对河蚬的分布也有重要影响<sup>[16]</sup>, 这都与本研究的结果类似。有研究发现欧洲、美洲和北非等地区的河蚬栖息地海拔通常不超过 500 m<sup>[10]</sup>。这与本研究中河蚬适宜的海拔

在 436 m 以下较为一致。作为一种软体动物,河蚬本身的运动能力较弱,研究也未发现河蚬能进行快速、长距离主动扩散的证据<sup>[35]</sup>。由于天然的地理屏障(如高原、山脉等)或人为因素(如修建水电站)的存在,河蚬无法以主动扩散突破高海拔的限制<sup>[10, 16]</sup>。我国的地形呈现天然的三级阶梯地势,这可能是河蚬集中分布在平原、丘陵地区(即第三阶梯)以及四川盆地的直接原因。而位于第一阶梯的河流上游,如长江上游等区域,可能出现较高落差带来的更高的水流速度,影响泥砂的沉积,河蚬也难以固定在底质中生存<sup>[34, 36]</sup>。当水流湍急时,河蚬可获得的食物减少,河蚬适宜栖息环境的面积和数量也可能缩减,进而影响河蚬的扩散<sup>[35-36]</sup>。此外,较高的海拔还可能导致营养物质的可获得性下降,从而影响河蚬的栖息<sup>[10]</sup>。

适宜的温度能保证生物包括繁殖在内的重要生命活动的正常进行。研究表明河蚬在 2—37 °C 的温度条件下均可存活,最适温度为 10—15 °C<sup>[10, 37]</sup>。本研究的结果表明河蚬适宜的年均温在 9.8 °C 以上,较高的温度年较差也反映了河蚬对温度有较广的适应范围。河蚬潜在的中、高适宜区主要位于我国的亚热带和温带气候区,适宜河蚬正常生命活动的进行。而处于非适宜区的青藏高原地区,最热月平均温度为 5.5—13.6 °C,大部分地区年均温在 0 °C 以下<sup>[38]</sup>。同为非适宜区的大兴安岭地区则存在多年冻土区,年均温仅为 -4—-1 °C<sup>[39]</sup>。有研究指出长时间暴露在 2 °C 以下,河蚬的存活率也十分有限<sup>[37, 40]</sup>。上述区域较低的温度可能会突破河蚬的温度耐受下限,显著影响河蚬的存活率,进而限制河蚬向高海拔以及高纬度地区的扩散<sup>[10, 16, 41]</sup>。

充足的降水可以为水生生物的适宜栖息地提供一定的条件。降水对河蚬分布影响的相关研究较少,但有研究表明,水体的变动(如水位变化)对河蚬的生长和分布有重要的影响<sup>[42-43]</sup>。针对洪泽湖河蚬的一项研究表明,径流量和水位等因素会影响河蚬的生长,较低的水位会使河蚬的生长变慢<sup>[42]</sup>。由于降水减少、干旱等气候因素的影响,河蚬栖息地的水体水位下降,可能无法有效缓冲夏季高温所带来的水温升高,而较高的水温可能对河蚬产生胁迫或致死效应<sup>[42-43]</sup>。并且有研究发现在温度较高而水体水位较低的情况下,干旱或者降水量减少会导致河蚬经受异常的高温从而出现的大量死亡,尤其是河蚬在受到环境胁迫时无法及时调节其耗氧率<sup>[16, 44-45]</sup>。

### 3.2 河蚬潜在适生区的变化

未来气候情景下河蚬的潜在适生区与现代气候条件下的分布较为一致,集中在长江流域中下游、海河流域、淮河流域、珠江流域、东南沿海区域以及黄河流域下游和渤海湾沿岸区域。分析潜在适生区的变化发现,未来河蚬的主要潜在适生区出现了一定程度的向北和向西移动。这可能是主要潜在适生区毗邻的北部和西部区域变化为类似亚热带或温带气候的条件,为河蚬提供了更适宜栖息的环境<sup>[18]</sup>。相关研究显示,未来河蚬在美国的潜在分布范围呈现向北和向西扩张的趋势,潜在分布区面积大幅增加<sup>[16]</sup>。气候变化可能有利于河蚬在全球范围内的潜在分布范围扩大,并且河蚬有继续向北和向高纬度地区扩散的趋势<sup>[18, 22, 46]</sup>。而本研究的结果显示,中排放情景(SSP245)下,河蚬的潜在适生区面积明显减少,低、高排放情景(SSP126 和 SSP585)下面积均先增加后减少,仅高排放情景下面积与现代条件下相似。地区气候差异可能是造成国内河蚬分布变化与其它地区不同的主要原因。未来情景下河蚬潜在适生区存在 4.51%—25.57% 的丧失率,丧失的区域主要来自于预测结果的中、低适宜区,温度和降水等因子的不平衡变化可能导致这些地区出现干旱等极端气候,使得这些地区从适宜区转变为非适宜区<sup>[16, 22, 45]</sup>。这表明气候变化背景下,河蚬在四川、广西、广东、海南、湖南、江西、河南和山东等省份的潜在适生区存在缩减的风险。

随着全球气候的不断变化,河蚬在我国的潜在适生区存在缩减的风险,这对河蚬野生资源的保护提出了挑战。作为广泛分布在我国各地的大型底栖动物,河蚬野生资源的衰退对我国淡水软体动物多样性以及水生生态健康都可能带来十分不利的影 响。因此,建议四川、湖北等地参考江苏建立河蚬种质资源保护区,开展河蚬人工繁殖相关研究,为保护和合理利用河蚬种质资源奠定基础。

## 4 结论

本研究基于 136 个河蚬分布点数据和筛选得到的 8 个环境因子数据,利用优化后的 MaxEnt 模型预测未

来 6 种气候情景下河蚬在国内的潜在分布及其变化,以及影响其分布的主要环境因子。结果表明:未来气候变化下河蚬有向北和向西扩张的趋势,潜在分布存在缩减的风险;海拔、年均温、年降水量和温度年较差是影响其分布的主要环境因子。本研究使用气候和地形因子对河蚬的潜在分布进行预测,除此之外,人类活动对河蚬的分布也具有重要影响。因此,在今后预测物种潜在分布及其变化时,可综合考虑上述因素从而得出更为全面的研究结果。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 刘月英, 张文珍, 王跃先. 中国经济动物志-淡水软体动物. 北京: 科学出版社, 1979: 119-123.
- [ 2 ] Bouchet P, Rocroi J P, Bieler R, Carter J G, Coan E V. Nomenclator of bivalve families with a classification of bivalve families. *Malacologia*, 2010, 52(2): 1-184.
- [ 3 ] Sousa R, Antunes C, Guilhermino L. Ecology of the invasive Asian clam *Corbicula fluminea* (Müller, 1774) in aquatic ecosystems: an overview. *Annales De Limnologie-International Journal of Limnology*, 2008, 44(2): 85-94.
- [ 4 ] Sousa R, Nogueira A J A, Gaspar M B, Antunes C, Guilhermino L. Growth and extremely high production of the non-indigenous invasive species *Corbicula fluminea* (Müller, 1774): possible implications for ecosystem functioning. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 80(2): 289-295.
- [ 5 ] 占江凡, 裴宏谦, 李科静, 皮杰, 曾聪, 李德亮. 沅江常德段蚬属贝类的谱系、倍性与性别特征. *水生生物学报*, 2021, 45(1): 125-131.
- [ 6 ] Counts C. *Corbicula fluminea* (Bivalvia: Corbiculidea) in British Columbia. *Nautilus*, 1981, 95: 12-13.
- [ 7 ] Ituarte C. Primera noticia acerca de la introducción de pelecípodos asiáticos en el área rioplatense (Mollusca, Corbiculidae). *Neotropica*, 1981, 27(77): 79-82.
- [ 8 ] Mouthon J. Sur la présence en France et au Portugal de *Corbicula* (Bivalvia, Corbiculidae) originaire d'Asie. *Basteria*, 1981, 45(4/5): 109-116.
- [ 9 ] Sheehan R, Etoundi E, Minchin D, Doninck K, Lucy F. Identification of the invasive form of *Corbicula* clams in Ireland. *Water*, 2019, 11(8): 1652.
- [ 10 ] Crespo D, Dolbeth M, Leston S, Sousa R, Pardal M Á. Distribution of *Corbicula fluminea* (Müller, 1774) in the invaded range: a geographic approach with notes on species traits variability. *Biological Invasions*, 2015, 17(7): 2087-2101.
- [ 11 ] Wang G P, Zhang T, Zhang J, Li D L, Xiao T Y. Morphological and molecular differentiation of genus *Corbicula* suggests that two species are sympatrically distributed in Datong Lake in the Central Yangtze River Basin. *Zoological Studies*, 2014, 53: 1-8.
- [ 12 ] 靳辉, 罗旭光, 谷娇, 宁晓雨, 蔡永久, 何虎, 于谨磊, 杨桂军, 李宽意. 河蚬 (*Corbicula fluminea*) 对霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*) 生物扰动的抑制效应. *湖泊科学*, 2016, 28(6): 1348-1353.
- [ 13 ] 郭晓宇, 李茹枫, 冯成洪. 河蚬在我国沉积物毒性评价与鉴定中的应用研究. *生态毒理学报*, 2016, 11(2): 89-100.
- [ 14 ] 刘燕山, 张彤晴, 唐晟凯, 李大命, 刘小维, 穆欢, 黄越峰. 洪泽湖河蚬种群生长方程估算及其应用. *水生态学杂志*, 2017, 38(4): 82-89.
- [ 15 ] 李大命, 张彤晴, 唐晟凯, 钟立强, 黄越峰, 穆欢, 刘燕山, 刘小维. 洪泽湖河蚬 (*Corbicula fluminea*) 2 种表型群体的遗传变异分析. *渔业科学进展*, 2017, 38(4): 111-117.
- [ 16 ] McDowell W G, Benson A J, Byers J E. Climate controls the distribution of a widespread invasive species: implications for future range expansion. *Freshwater Biology*, 2014, 59(4): 847-857.
- [ 17 ] Gama M, Crespo D, Dolbeth M, Anastácio P. Predicting global habitat suitability for *Corbicula fluminea* using species distribution models: the importance of different environmental datasets. *Ecological Modelling*, 2016, 319: 163-169.
- [ 18 ] Gama M, Crespo D, Dolbeth M, Anastácio P M. Ensemble forecasting of *Corbicula fluminea* worldwide distribution: projections of the impact of climate change. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2017, 27(3): 675-684.
- [ 19 ] Padalia H, Srivastava V, Kushwaha S P S. Modeling potential invasion range of alien invasive species, *Hyptis suaveolens* (L.) Poit. in India: Comparison of MaxEnt and GARP. *Ecological Informatics*, 2014, 22: 36-43.
- [ 20 ] 张华, 赵浩翔, 王浩. 基于 Maxent 模型的未来气候变化情景下胡杨在中国的潜在地理分布. *生态学报*, 2020, 40(18): 6552-6563.
- [ 21 ] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [ 22 ] Reyna P, Nori J, Ballesteros M L, Hued A C, Tatián M. Targeting clams: insights into the invasive potential and current and future distribution of Asian clams. *Environmental Conservation*, 2018, 45(4): 387-395.
- [ 23 ] 张伟萍, 胡云云, 李智华, 冯雪萍, 李登武. 气候变化情景下祁连圆柏在青海省的适宜分布区预测. *应用生态学报*, 2021, 32(7):

- 2514-2524.
- [24] Jiang C X, Zhang X Y, Xie W Q, Wang R L, Feng C H, Ma L, Li Q, Yang Q F, Wang H J. Predicting the potential distribution of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) under climate change in China. *Global Ecology and Conservation*, 2022, 33: e01994.
- [25] 叶兴状, 张明珠, 赖文峰, 杨森森, 范辉华, 张国防, 陈世品, 刘宝. 基于 MaxEnt 优化模型的闽楠潜在适宜分布预测. *生态学报*, 2021, 41(20): 8135-8144.
- [26] Ranjith Layola M R, Semwal M, Rana T S, Nair N K. Predicting potential suitable habitat for *Ensete glaucum* (Roxb.) Cheesman using MaxEnt modelling. *Flora*, 2022, 287: 152007.
- [27] Kass J M, Muscarella R, Galante P J, Bohl C L, Pinilla-Buitrago G E, Boria R A, Soley-Guardia M, Anderson R P. ENMeval 2.0: Redesigned for customizable and reproducible modeling of species' niches and distributions. *Methods in Ecology and Evolution*, 2021, 12(9): 1602-1608.
- [28] Phillips S J, Dudík M, Elith J, Graham C H, Lehmann A, Leathwick J, Ferrier S. Sample selection bias and presence-only distribution models: implications for background and pseudo-absence data. *Ecological Applications*, 2009, 19(1): 181-197.
- [29] Yackulic C B, Chandler R, Zipkin E F, Royle J A, Nichols J D, Campbell Grant E H, Veran S. Presence-only modelling using MAXENT: when can we trust the inferences? *Methods in Ecology and Evolution*, 2013, 4(3): 236-243.
- [30] Mudereri B T, Mukanga C, Mupfiga E T, Gwahirisa C, Kimathi E, Chitata T. Analysis of potentially suitable habitat within migration connections of an intra-African migrant-the Blue Swallow (*Hirundo atrocaerulea*). *Ecological Informatics*, 2020, 57: 101082.
- [31] Zhang K L, Yao L J, Meng J S, Tao J. Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of two peony species under climate change. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 1326-1334.
- [32] Warren D L, Seifert S N. Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. *Ecological Applications*, 2011, 21(2): 335-342.
- [33] John E, Bunting P, Hardy A, Roberts O, Giliba R, Silayo D S. Modelling the impact of climate change on Tanzanian forests. *Diversity and Distributions*, 2020, 26(12): 1663-1686.
- [34] 周会, 刘丛强, 闫慧, 丁文慈, 王兵, 江伟, 赵彦龙. 中国主要流域河蚬 [*Corbicula fluminea* (Müller, 1774)] 形态及其对环境的适应性. *生态学杂志*, 2011, 30(7): 1497-1503.
- [35] Perneckner B, Czirok A, Mauchart P, Boda P, Móra A, Csabai Z. No experimental evidence for vector-free, long-range, upstream dispersal of adult Asian clams [*Corbicula fluminea* (Müller, 1774)]. *Biological Invasions*, 2021, 23(5): 1393-1404.
- [36] Vannote R L, Minshall G W, Cummins K W, Sedell J R, Cushing C E. The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1980, 37(1): 130-137.
- [37] Lucy F, Karatayev A, Burlakova L. Predictions for the spread, population density, and impacts of *Corbicula fluminea* in Ireland. *Aquatic Invasions*, 2012, 7(4): 465-474.
- [38] 赵雪雁, 万文玉, 王伟军. 近 50 年气候变化对青藏高原牧草生产潜力及物候期的影响. *中国生态农业学报*, 2016, 24(4): 532-543.
- [39] 孙菊, 李秀珍, 王宪伟, 吕久俊, 李宗梅, 胡远满. 大兴安岭冻土湿地植物群落结构的环境梯度分析. *植物生态学报*, 2010, 34(10): 1165-1173.
- [40] Müller O, Baur B. Survival of the invasive clam *Corbicula fluminea* (Müller) in response to winter water temperature. *Malacologia*, 2011, 53(2): 367-371.
- [41] McMahon R F. Response to temperature and hypoxia in the oxygen consumption of the introduced Asiatic freshwater clam *Corbicula fluminea* (Müller). *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 1979, 63(3): 383-388.
- [42] Li J, Rypel A L, Zhang S Y, Luo Y M, Hou G, Murphy B R, Xie S G. Growth, longevity, and climate - growth relationships of *Corbicula fluminea* (Müller, 1774) in Hongze Lake, China. *Freshwater Science*, 2017, 36(3): 595-608.
- [43] Paschoal L R P, Andrade D P, Darrigran G. How the fluctuations of water levels affect populations of invasive bivalve *Corbicula fluminea* (Müller, 1774) in a Neotropical reservoir? *Brazilian Journal of Biology*, 2015, 75(1): 135-143.
- [44] Ilarri M I, Antunes C, Guilhermino L, Sousa R. Massive mortality of the Asian clam *Corbicula fluminea* in a highly invaded area. *Biological Invasions*, 2011, 13(2): 277-280.
- [45] McDowell W G, McDowell W H, Byers J E. Mass mortality of a dominant invasive species in response to an extreme climate event: implications for ecosystem function. *Limnology and Oceanography*, 2017, 62(1): 177-188.
- [46] Bepalaya Y V, Bolotov I N, Aksenova O V, Kondakov A V, Gofarov M Y, Laenko T M, Sokolova S E, Shevchenko A R, Travina O V. Aliens are moving to the Arctic frontiers: an integrative approach reveals selective expansion of androgenic hybrid *Corbicula* lineages towards the North of Russia. *Biological Invasions*, 2018, 20(8): 2227-2243.