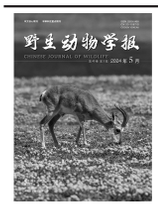
野生动物学报 Chinese Journal of Wildlife 2024,45(2):354－366



Chinese Journal of Wildlife
野生动物学报
http：//ysdw. nefu. edu. cn



新疆叶城沙蜥生境适宜性评价及生境廊道模型构建

蒋罗雪[1]，李政余[1]，陈天莹[1]，段嘉宝[1]，赵　伟[2]，祁　玥[2]，陈伟基[1*]，李　铀[1,3*]

（1. 西北民族大学生命科学与工程学院，兰州，730030；
2. 兰州大学生命科学学院，甘肃省环境生物监测与修复重点实验室，兰州，730000；
3. 西北民族大学生物医学研究中心，甘肃省动物细胞技术创新中心，兰州，730030）

稿件运行过程

收稿日期：2023－07－12
修回日期：2023－08－02

关键词：叶城沙蜥；Linkage Mapper；MaxEnt模型；生境廊道；塔里木盆地

Key words：*Phrynocephalus axillaris*；Linkage Mapper；MaxEnt model；Habitat corridor；Tarim Basin

中图分类号：Q958. 1

文献标识码：A

文章编号：
2310－1490(2024)－02－0354－13

DOI:**10.12375/ysdwxb.20240215**

摘　要

保护或创造破碎化生境中的景观连通性被认为是保护生物多样性、生态系统以及促进野生动植物种群的流动和适应气候变化的关键战略，而生境廊道是恢复和保护景观连通性的常用策略。以塔里木盆地为例，结合该区域内叶城沙蜥(*Phrynocephalus axillaris*)21个栖息地分布点数据，运用MaxEnt模型对该区域叶城沙蜥的生境适宜性进行分析，并综合植被类型、地理因素、人为干扰等因素，利用Linkage Mapper工具构建适宜叶城沙蜥扩散的潜在生境廊道。结果表明：对叶城沙蜥潜在适宜分布区影响较大的环境因子包括最冷季度平均气温、最冷月份最低气温、植被覆盖类型、最冷季度降水量、坡度及最干月份降水量。在所记录到的21个叶城沙蜥分布点中，6个属于最佳栖息地，6个属于适宜栖息地，另外9个属低适宜栖息地。以MaxEnt模型分析的叶城沙蜥适宜区分布情况为基础，共构建32条生境廊道，包括11条长距离廊道和21条短距离廊道。其中短距离廊道连通邻近栖息地，长距离廊道连通南北栖息地。研究结果有助于优化叶城沙蜥栖息地格局，同时为塔里木盆地区域周边及部分吐鲁番盆地爬行类物种持续发展提供科学参考，并为荒漠生态系统的物种保护与保护区规划提供借鉴思路。

基金项目：国家自然科学基金项目(32060311)；甘肃省省级人才项目(51202506)；中央高校基本科研业务费专项资金项目(31920210143，31920190083，31920240109)

第一作者简介：蒋罗雪(1997—)，女，硕士研究生；主要从事遗传育种与繁殖研究。E-mail：j532992262@163. com

*通信作者：陈伟基，E-mail：chenweiji0597@163. com；李铀，E-mail：284142549@xbmu. edu. cn

Habitat Suitability Evaluation and Corridor Construction of *Phrynocephalus axillaris* in Xinjiang

JIANG Luoxue[1], LI Zhengyu[1], CHEN Tianying[1], DUAN Jiabao[1], ZHAO Wei[2], QI Yue[2], CHEN Weiji[1*], LI You[1,3*]

(1. College of Life Science and Engineering, Northwest Minzu University, Lanzhou, 730030, China;
2. Gansu Key Laboratory of Biomonitoring and Bioremediation for Environmental Pollution, School of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, 730000, China;
3. Gansu Tech Innovation Center of Animal Cell, Biomedical Research Centre, Northwest Minzu University, Lanzhou, 730030, China)

Abstract: Protecting or rebuilding landscape connectivity in fragmented habitats is considered to be a key strategy for conserving biodiversity and ecosystems, facilitating the movement of wildlife populations as well as adapting to climate change. And habitat corridors are a common strategy for restoring and protecting landscape connectivity. Taking the Tarim Basin as an example, using 21 species distribution locations of *Phrynocephalus axillaris*, the MaxEnt model was developed to analyze the habitat suitability of *Ph. axillaris*, and the Linkage Mapper tool was used to construct a potential ecological corridor suitable for the spread of *Ph. axillaris* by integrating vegetation type, geographical factors, human disturbance and other factors in the leaf city. The results showed that the environmental factors had great influences on the potential suitable distribution area of *Ph. axillaris*, which included the coldest average temperature, the coldest month minimum temperature, vegetation cover type, the coldest quarterly precipitation, slope and dryest monthly. Of the 21 recorded distribution locations of the leaf city sand lizard, six were in the best habitat, six were in suitable habitat, and nine were in low suitable habitat. Based on the distribution of suitable areas of *Ph. axillaris* analyzed by MaxEnt model, a total of 32 ecological corridors were constructed, including 11 long-distance corridors and 21 relatively short-distance corridors. Among them, short-distance corridors connect adjacent habitats, and long-distance corridors connect north-south habitats. The results will fill the gap in the study of ecological corridor and habitat suitability of *Ph. axillaris* in this area, help optimize the habitat pattern of this species, provide scientific reference for the sustainable development of reptile species, and provide reference for species conservation and protected area planning of desert ecosystems.

人类的发展现已改变了地球上超过50%的景观成分[1]。由此产生的自然栖息地的丧失和景观格局的波动对物种间相互作用和全球生物多样性造成不利影响，成为保护生物学和生物地理学研究的关键问题之一[2-3]。栖息地丧失和破碎化使得全球范围内生物多样性和生态系统功能的模式发生变化，进而影响全球生态网络的连通性和生态完整性[4]。景观连通性因此被定义为景观促进或阻碍生物体或某种生态过程在源斑块间运动的程度，包含结构连通性和行为连通性两方面的内容[5]。结构成分指景观元素（如地貌、土地覆盖和土地利用类型）的空间和时间配置，行为成分指生物或生物过程对景观元素的物理排列做出的行为反应[6-7]。

连通性的丧失通过物种内部、物种之间以及生态系统间的相互作用影响个体、种群和群落。这些相互作用影响着一系列生态机制，包括养分和能量流动、捕食关系、授粉、种子传播、近亲繁殖规避、种间相互作用的变化和疾病传播等[4,8-9]。因此，景观连通性能够促进生物过程（如动物迁移、植物繁殖、基因流）以及非生物过程（如水、能源和物质在生态系统内和生态系统之间的交换）。随着栖息地的丧失和破碎化日益加剧，剩余栖息地碎片的大小、碎片之间的连通性、周围基质的特征，以及栖息地边缘的渗透性和结构，都对生物多样性的长期保护很重要，

并影响剩余生态相互作用的整体持久性、强度和完整性[10]。因此,保护或创造景观连通性被认为是保护生物多样性、维持可持续发展的生态系统和野生动植物种群以及促进野生动植物种群的流动和适应气候变化的关键战略[11]。

生境廊道是物种生活、觅食、迁移的重要通道,有助于促进和维持孤立生境斑块之间的连通性,生境廊道使物种能够在破碎的生境之间扩散和自由移动,增强物种间遗传信息交流,防止种群隔离,维持最小种群规模和保护生物多样性[12-13]。构建生境廊道是恢复和保护景观连通性的常用策略。生境廊道模型构建的方法相对成熟,其中运用最为广泛的有最小累积阻力模型(minimum cumulative resistance,MCR)[14]和结合GIS技术的廊道设计模型Linkage Mapper[15]。物种分布模型(species distribution models,SDMs)是将物种现存的分布信息与分布区的环境数据相结合的一种数字工具[16],因此常与生境廊道模型相配合并广泛应用于模拟和预测物种栖息地潜在适应性[17-18]。在众多的SDM模型分析工具中,最大熵模型(maximum entropy models,MaxEnt)通常在预测准确性方面优于其他方法,同时具有简便易操作的特点,因此被广泛用于物种分布及生态位模型预测[19]。

国内外众多学者结合MaxEnt和Linkage Mapper工具进行生境适应性评价和潜在生境扩散廊道的构建,为多种野生动物的栖息地格局优化、保护区合理规划及物种保护提供了重要的基础数据和理论参考[20-23]。同时,利用MaxEnt模型评估物种栖息地的分布,结果可用于模拟全球气候变化对种群分布及适宜栖息地空间分布的影响,预测物种未来可能存在的灭绝风险并及时提出应对策略[24-27]。因此,MaxEnt模型在物种保护及栖息地规划等方面能够发挥重要作用。

叶城沙蜥(*Phrynocephalus axillaris*)是我国特有的一种小型沙生蜥蜴,其垂直分布跨度较大,从海拔接近或低于海平面的新疆南湖戈壁、海拔1 500 m左右的天山山脉以南地区,到海拔3 000 m左右的阿尔金山均有分布[28]。分布在塔里木盆地、吐鲁番—哈密盆地以及敦煌盆地等典型的干旱、荒漠及半荒漠地带[29]。因气候变化和人类活动的影响,如沙漠地区石油、天然气、煤炭资源的开采和沙漠公路、周边水库水渠的修建[30],叶城沙蜥栖息地破碎化日趋严重。与其他野生动物相较[31],叶城沙蜥等荒漠动物更依赖完整的荒漠生态系统来获取生存所需的食物和栖息地,栖息地破碎化更可能对这些物种造成负面影响,并增加种群局部灭绝的风险。目前,对叶城沙蜥的研究主要集中于形态特征的地理变异[32]、遗传分化分析[33]、基因组微卫星分析[34]和繁殖生物学[35]等方面,而关于生境廊道的研究未见报道。

本研究以塔里木盆地为例,结合该区域内叶城沙蜥部分栖息地分布点,通过ArcGIS 10.8和MaxEnt对该区域叶城沙蜥的栖息地适宜性进行分析研究,同时结合植被类型、地理因素、人为干扰等环境因子,利用Linkage Mapper工具构建适宜叶城沙蜥迁移的潜在生境廊道。研究结果将填补该地区叶城沙蜥生境廊道及生境适宜性研究的空白,有助于优化该物种栖息地格局,同时为该地区爬行类物种持续发展提供科学参考,并为荒漠生态系统的物种保护与保护区规划提供借鉴思路。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国新疆塔里木盆地周边及部分吐鲁番盆地,地处天山、昆仑山和阿尔金山之间(34°22′—49°10′ N,73°40′—96°23′ E;图1),面积约130多万 km^2。四周高山海拔4 000~6 000 m,西部海拔1 000 m以上,盆地中部海拔800~1 300 m[36]。该区地貌呈环状分布,边缘是与山地相连的砾石戈壁,中心是塔克拉玛干沙漠,属于温带大陆性干旱气候,降水稀少且蒸发量大,最冷月平均气温-20 ℃,最热月平均气温33 ℃[37-38]。大部分地区由沙漠和荒漠盆地组成,适合荒漠动物生存。

1.2 数据来源

塔里木盆地叶城沙蜥分布区资料来源于谢慧[39]报道的2019年夏季野外调查数据,共计21个分布点。

选取可能与叶城沙蜥行为特征和生活习性相关的24个环境因子(表1),分别为:(1)地形变量数据(坡度、坡向、海拔)由DEM数据(http://www.gscloud.cn)获取,分辨率30 m。(2)植被类型数据和土地利用数据来自https://www.resdc.cn,分辨率30 m。(3)气候因子(19个生物气候变量)来自http://www.worldclim.org/,空间分辨率为2.5 arc-minutes。

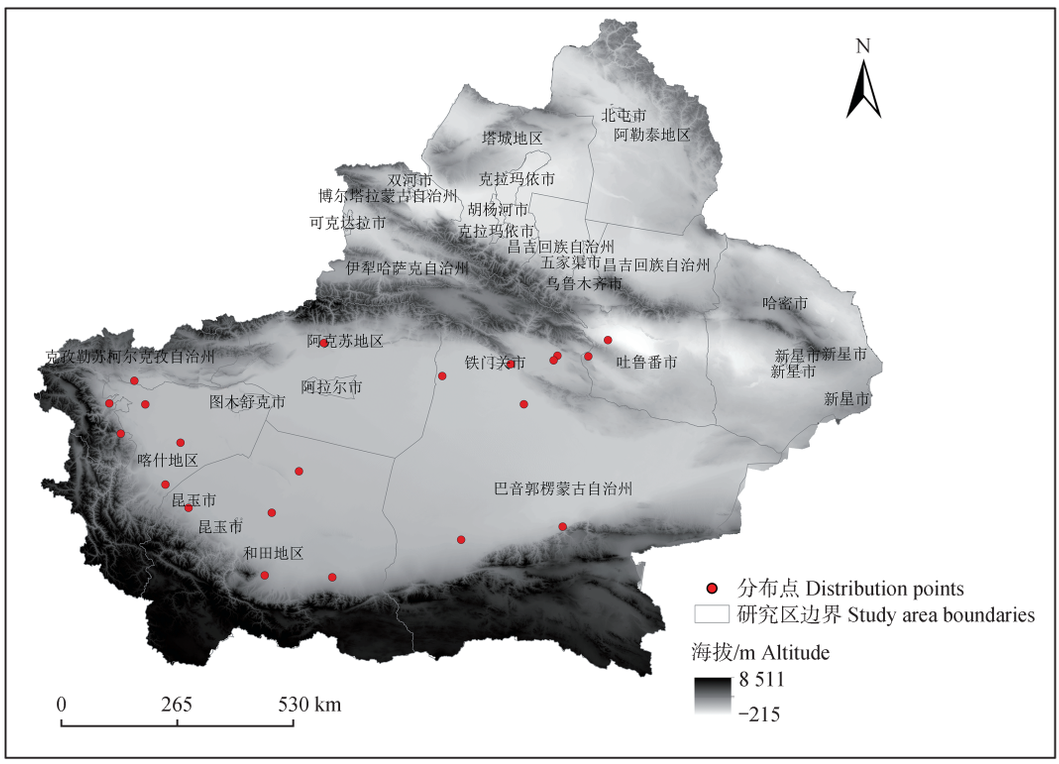


图1　研究区及区域内叶城沙蜥部分分布点

Fig. 1 The study area and distribution locations of the *Phrynocephalus axillaris* used in the study

注：地图是经地理空间数据云（www. gscloud. cn）下载的原始数据编辑并绘制而成。

Note：Map was downloaded from the Geospatial Data Cloud（www. gscloud. cn）and then edited accordingly.

表1　可能与叶城沙蜥行为特征和生活习性相关的24个环境因子

Tab. 1 Information on 24 environmental factors which might be related to behavioral characteristics and habit selection of *Phrynocephalus axillaris*

编号 Code	环境变量 Environment variable	贡献率(%) Percent contribution	编号 Code	环境变量 Environment variable	贡献率(%) Percent contribution
bio1	**年平均气温**	**0. 4**	**bio13**	**最湿月份降水量**	**1. 0**
bio2	**昼夜温差月均值**	**0. 4**	**bio14**	**最干月份降水量**	**2. 1**
bio6	**最冷月份最低气温**	**18. 9**	**bio18**	**最暖季度降水量**	**1. 2**
bio9	**最干季度平均气温**	**1. 4**	**bio19**	**最冷季度降水量**	**3. 0**
bio11	**最冷季度平均气温**	**57. 0**	**Aspect**	**坡向**	**1. 1**
bio12	**年降水量**	**0. 5**	**Slope**	**坡度**	**2. 7**
Veg	**植被覆盖类型**	**10. 5**	**Dem**	**海拔**	**0. 1**
bio3	等温性	0	bio8	最湿季度平均气温	0
bio4	温度变化方差	0	bio17	最干季度降水量	0
bio10	最暖季度平均气温	0	bio16	最湿季度降水量	0
bio5	最热月份最高气温	0	bio15	降水量变化方差	0
bio7	年气温变化范围	0	Land	土地利用类型	0

注：筛选出的14个环境因子在表中以黑体标出。

Note：The 14 selected environmental factors are highlighted in bold.

利用ArcGIS 10.8,将所有环境变量按掩膜提取统一边界,地理坐标系统一为WGS1984坐标,再转换成MaxEnt模型识别的ASCII格式[40-42]。

1.3 基于MaxEnt生境适宜性评价

将叶城沙蜥分布点数据和环境变量因子数据导入MaxEnt 3.4.3软件,参考相关文献的软件参数设置,随机选取75%的叶城沙蜥分布位点数据作为训练集建立预测模型,剩余25%的分布点作为测试集验证模型,输出结果为Logistic格式,其他参数为默认值[21,43]。利用刀切法检测环境变量对叶城沙蜥分布的重要性,绘制ROC曲线(receiver operating characteristic curve,ROC),检验模型的结果精度采用AUC值(area under curve,AUC)[44-45]。AUC取值为0~1,越接近1,表示预测效果越好[46-47]。根据文献确定模型检验标准:构建失败(<0.6),较差(≥0.6~0.7),一般(≥0.7~0.8),较好(≥0.8~0.9),优秀(≥0.9~1.0)[48]。同时参考相关文献的取值,将模型输出结果导入ArcGIS 10.8软件进行"重分类"分析,按照"自然断点"法将叶城沙蜥生境分布区重新分成3个等级:最佳栖息地(≥0.70),适宜栖息地(≥0.50~0.70),低适宜栖息地(≥0.25~0.50),不适宜栖息地(<0.25),用以生成叶城沙蜥适宜生境等级分布图[49-51]。

1.4 叶城沙蜥生境廊道的建立

利用ArcGIS 10.8软件中的Linkage Mapper工具构建适宜叶城沙蜥扩散的生境廊道[52]。生境廊道的识别基于最小累积阻力模型,因此提取叶城沙蜥生境源地斑块并建立相应的阻力图层[53]。依据叶城沙蜥生境适宜性分布图,利用ArcGIS 10.8软件提取最佳栖息地和适宜栖息地中所有斑块,剔除面积较小且零散斑块,提取面积大于20 km^2的生境斑块作为叶城沙蜥生境廊道的源地斑块。

参考层次分析法[54-55],根据MaxEnt模型预测结果中各环境因子的贡献率及重要性来确定影响叶城沙蜥分布的阻力值和综合权重赋值(表2)。在ArcGIS 10.8软件中建立阻力图层,参考相关文献阻力值的设定[22,56],阻力因子赋值为10、60、100、150,阻力值越大表示阻碍越严重,越不适宜叶城沙蜥迁移扩散。

表2 叶城沙蜥分布区内不同土地类型的环境因子阻力赋值体系

Tab. 2 Resistance assignment values of the environmental factors based on land type in the distribution areas of *Phrynocephalus axillaris*

阻力值 Resistance	土地类型 Land type	坡度/(°) Slope	海拔/m Altitude	坡向/(°) Aspect	植被类型 Vegetation type
10	沙漠	≤20	≤1 500	≤45	荒漠
60	林地	>20~30	>1 500~3 500	>45~135	草地
100	耕地	>30~45	>3 500~4 000	>135~225	灌木
150	建设用地	>45	>4 000	>225	针阔叶林
权重 Weight	0.04	0.20	0.13	0.15	0.48

将得到的叶城沙蜥源地斑块、阻力面导入廊道设计模型Linkage Mapper中,计算最小成本路径,使用3 km的宽度表示叶城沙蜥潜在生境廊道[57]。

2 结果

2.1 环境因子对MaxEnt模型的贡献性

对24个环境因子进行初步模拟,得出环境因子对模型贡献率的大小。剔除贡献率小于0.1的环境因子,剩余14个环境因子(表1黑体部分)。对这14个主要环境因子进行二次模型分析。

2.2 叶城沙蜥生境预测结果

数据经过运算,最终得到ROC曲线下AUC值为0.923(图2),因此判定MaxEnt模型预测的叶城沙蜥分布准确性为优,该结果可用于叶城沙蜥生境的预测。

通过刀切法检验对模型贡献较大的14个环境因子对叶城沙蜥生境适宜性分布的影响程度。结果如图3所示:最冷季度平均气温(bio11)、最冷月份最低气温(bio6)、植被覆盖类型(Veg)、最冷季度降水量(bio19)、坡度(Slope)、最干月份降水量(bio14)对模型预测结果影响较大;年降水量(bio12)、最湿月份降水量(bio13)、最暖季度降水量(bio18)、年平均气温(bio1)、昼夜温差月均值(bio2)、最干季度平均气温(bio9)、海拔(Dem)、坡向(Aspect)对模型结果的影响均较小。

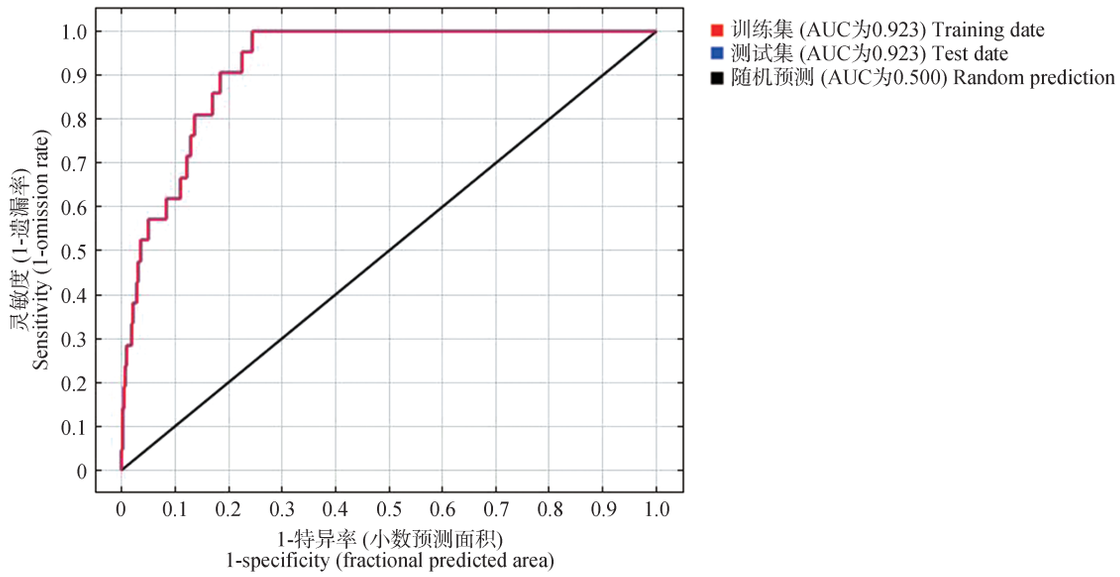


图2　MaxEnt模型预测叶城沙蜥适宜分布区结果的ROC曲线

Fig. 2　ROC curve of the MaxEnt model for predicting the suitable distribution area of *Phrynocephalus axillaris*

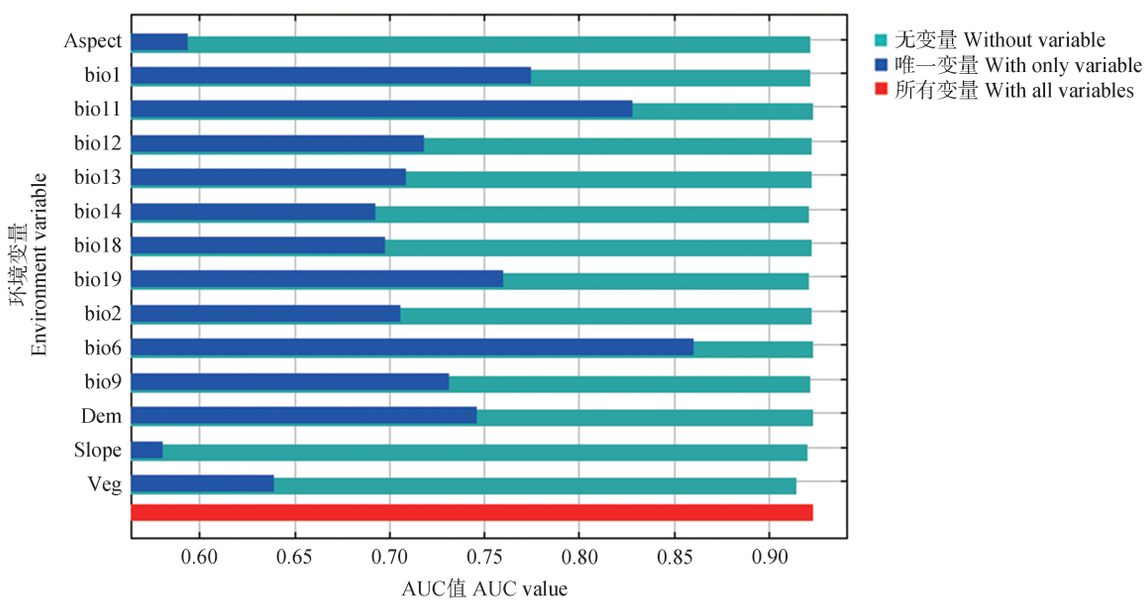


图3　刀切法检验环境因子对叶城沙蜥潜在适宜分布的重要性

Fig. 3　The importance of environmental factors to the potential suitable distribution of *Phrynocephalus axillaris* examined by Jackknife method

根据前文设定的栖息地等级，选取贡献率最大的6个环境因子作为影响叶城沙蜥适宜生境的主导因子，从MaxEnt输出的主导气候因子响应曲线（图4）可以看出，叶城沙蜥较适宜的最冷季度平均气温（bio11）在-9~0 ℃时，随温度上升生境适宜性增加，在-3~0 ℃生存概率保持在0.7；最冷月份最低气温（bio6）在-17~-12 ℃时，随温度上升生境适宜性增加，超过-12 ℃时生存概率下降，但在-9 ℃时生存概率保持在0.65；随植被覆盖类型（Veg）数值增大，生存概率呈现逐步下降趋势，Veg值在0~500时，下降较快，但Veg值在>500~10 000时，生存概率较平稳，保持在0.60~0.68；最冷季度降水量（bio19）在1~4 mm时生境适应性随降水量升高而增加，超过4 mm生境适宜性则随降水量的上升而降低；随坡度值增大，生存概率下降；最干月份降水量（bio14）在0~1 mm生存概率上升，超过1 mm后随数值增大生存概率下降。

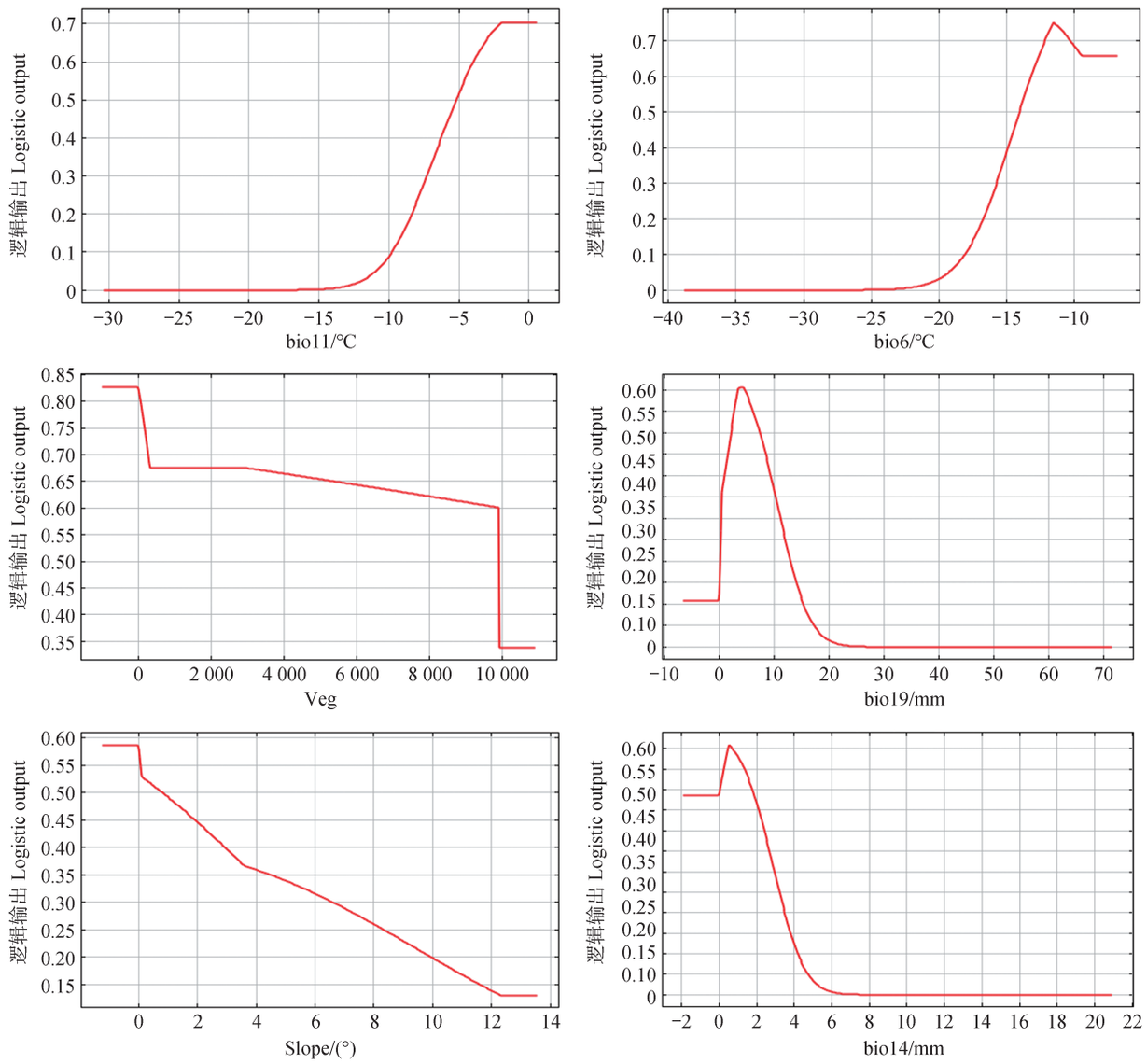


图4 叶城沙蜥对主导气候因子的响应曲线

Fig. 4 Response curves for the major environmental determinators of *Phrynocephalus axillaris*

2.3 叶城沙蜥生境适宜性分区

利用ArcGIS 10.8软件对模型结果进行“重分类”后获得叶城沙蜥生境适宜性分布(图5),结果表明,叶城沙蜥种群最适宜分布区面积为27 998.0 km^2,约占研究区域总面积的2.2%;适宜分布区面积为87 110.9 km^2,约占研究区域总面积的6.7%;低适宜分布区面积为216 608.0 km^2,约占研究区域总面积的16.7%。这些生境类型主要以小斑块形式分散分布,对研究区内叶城沙蜥生境破碎化的识别起着重要作用。

2.4 叶城沙蜥潜在生境廊道构建

基于环境因子阻力值和综合权重赋值(表2),利用ArcGIS 10.8的“栅格计算器”,生成叶城沙蜥生境扩散最小阻力面(图6)。基于叶城沙蜥栖息地分布预测区划(图5),用ArcGIS 10.8空间分析工具提取最佳适宜栖息地面积较大斑块作为叶城沙蜥的生境源地斑块,共130个,面积最大的是29 938.0 km^2,面积最小的是21.6 km^2,总面积是109 650.3 km^2。将毗邻源地斑块组合,共生成14个叶城沙蜥生境斑块(图7)。把生境斑块和阻力栅格图层导入廊道设计模型Linkage Mapper工具中,得到叶城沙蜥潜在生境廊道共32条(图7),其中长距离廊道11条(c1、c2、c3、c4、c5、c6、c7、c8、c9、c10、c11),短距离廊道21条(d1、d2、d3、d4、d5、d6、d7、d8、d9、d10、d11、d12、d13、

d14、d15、d16、d17、d18、d19、d20、d21)，最长的廊道是c9，距离为538.8 km，最短的是d19，距离为8.8 km，廊道总长为5 057.9 km。由栖息地分布预测图(图5)可以看出，有6个叶城沙蜥分布点分布在最佳栖息地区域，6个分布在适宜栖息地，另外9个分布在低适宜栖息地。

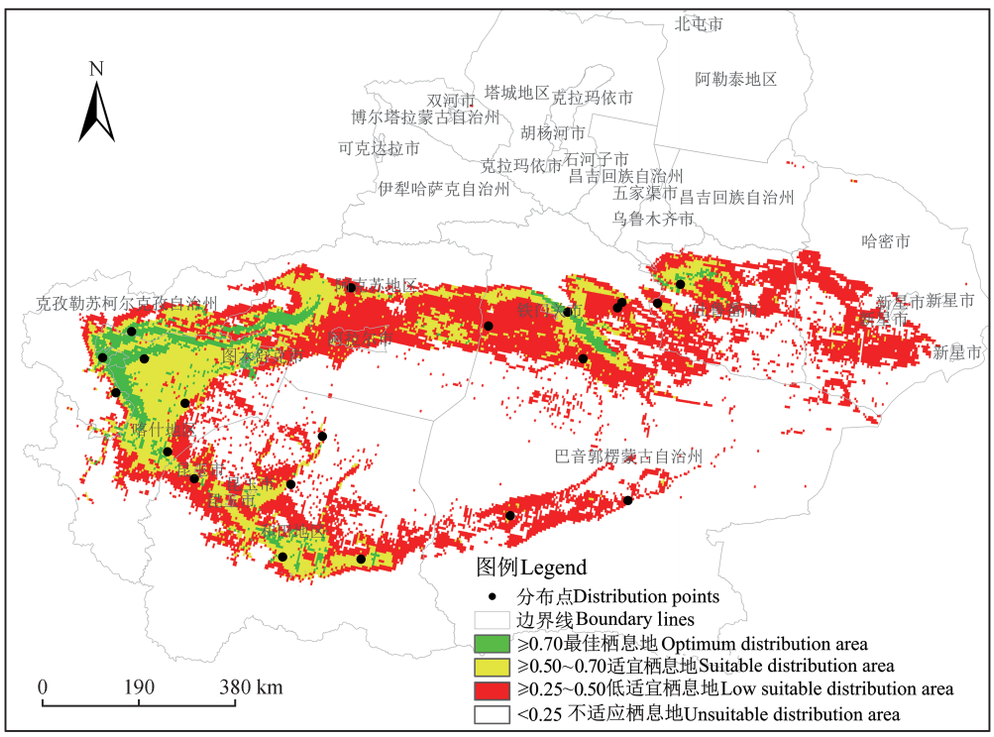


图5　新疆南段叶城沙蜥栖息地分布预测区划

Fig. 5　Predicted habitat distribution of *Phrynocephalus axillaris* in the southern Xinjiang

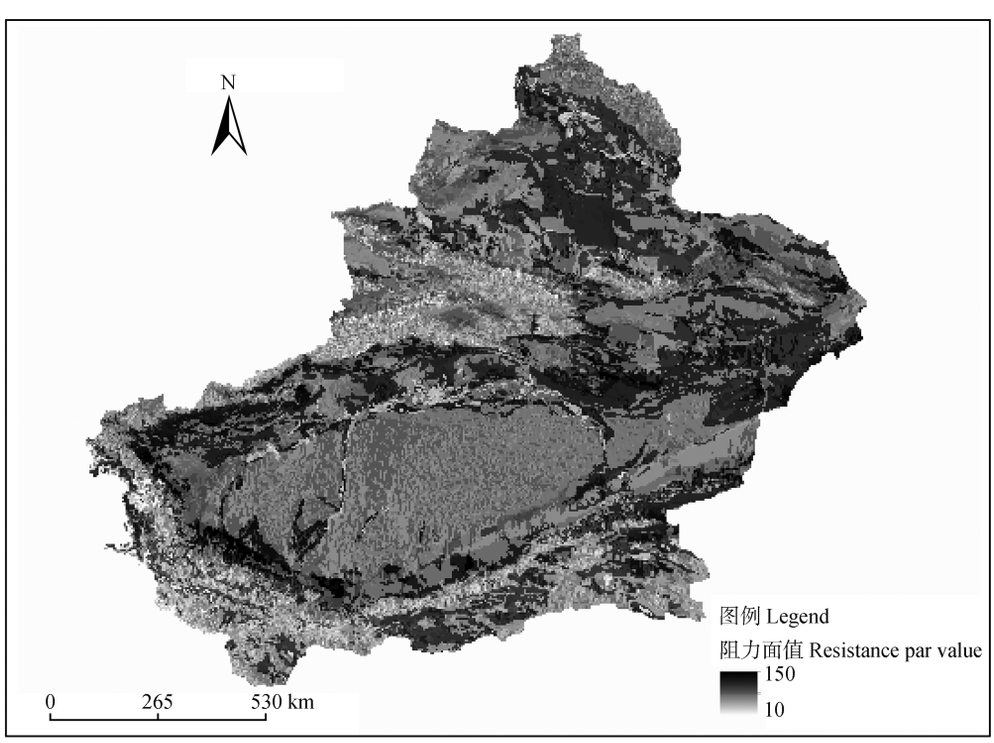


图6　叶城沙蜥扩散阻力图层

Fig. 6　Map of diffusion resistance layer of *Phrynocephalus axillaris*

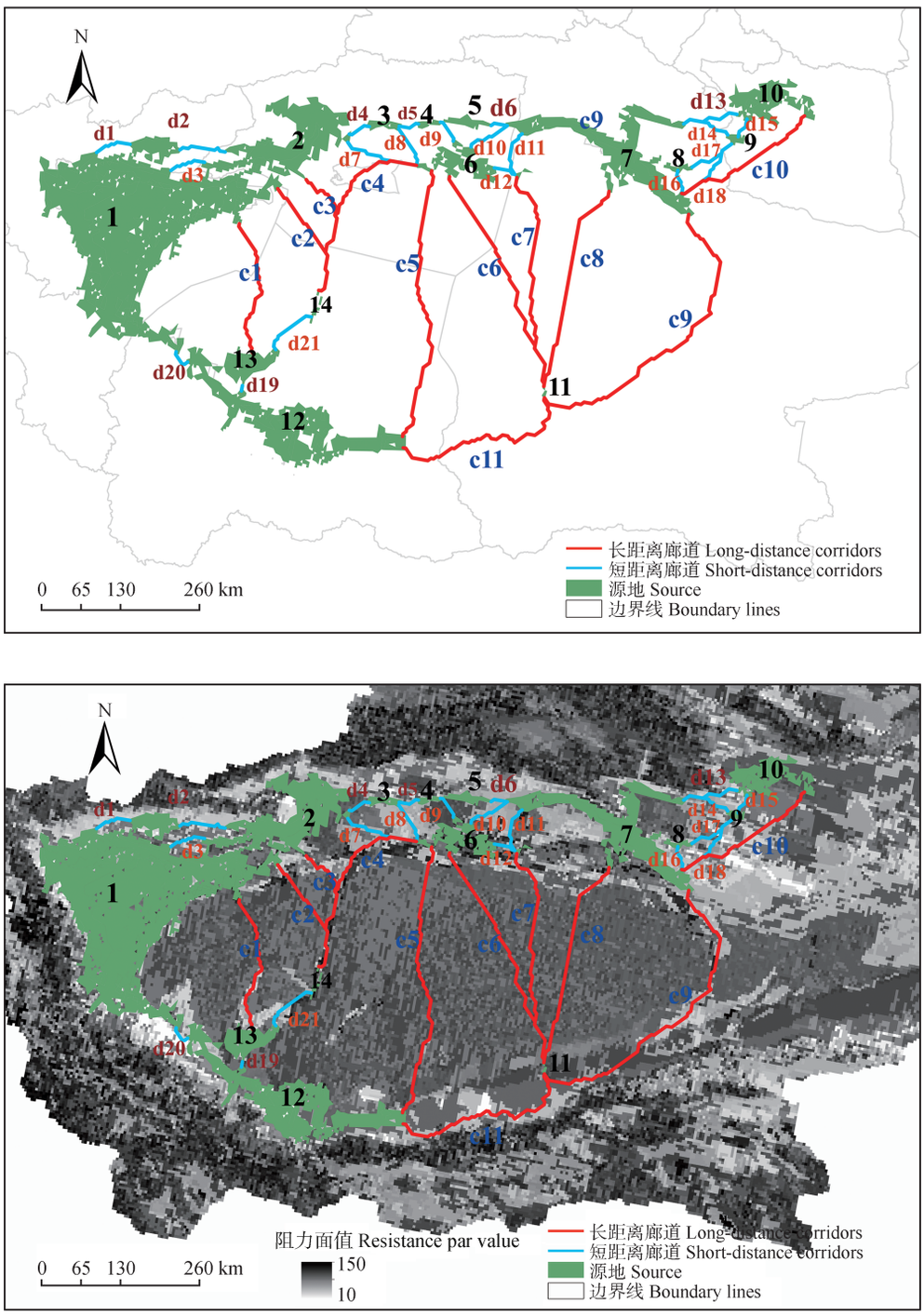


图7 研究区域内构建的叶城沙蜥生境廊道

Fig. 7 Constructed habitat corridors for *Phrynocephalus axillaris* in the leaf city of Xinjiang

21条短距离廊道连接相邻源地，其中d1、d2、d3、d19、d20、d13、d18廊道连接面积较大且密集的源地斑块。c1、c5、c6、c7、c8五条长距离廊道纵贯塔里木盆地，建立南北连接的通道。c2廊道促进了喀什、和田和阿克苏3个地区的连通性；c11廊道促进了和田和巴音郭勒地区的连通性。总的来看，d1、d2、d4、d5、d6、d13、c10、c9、c11、d20廊道连通了叶城沙蜥外围生态源地的连通性，d21、d19、d14、d15、d17、d18促进了内部源地与边缘地区的连通性。

3 讨论

本研究利用MaxEnt模型，综合筛选出的14个环

境因子，结合新疆部分地区叶城沙蜥21个分布点，预测叶城沙蜥生境适宜性。通过刀切法分析环境变量，经ROC曲线验证显示，测试集和训练集AUC值均大于0.9，表明本次模型预测结果准确，具有较高可信度。

研究区属温带大陆气候，受降水量和温度差影响较大，由AUC值可以看出，叶城沙蜥生境适宜区受到最冷季度平均气温（bio11）、最冷月份最低气温（bio6）的影响最大。由响应曲线（图4）可知，最冷季度平均气温（bio11）在-5~0 ℃时，叶城沙蜥存在概率>0.50；最冷月份最低气温（bio6）在-14~-7 ℃时，存在概率>0.50；植被覆盖类型（Veg）在1~5 000时，存在概率>0.65；最冷季度降水量（bio19）在2~4 mm时，存在概率>0.60；最干月份降水（bio14）在0~1时，生存概率保持在0.60。由贡献率（表1）可知，最冷季度平均气温（bio11）、最冷月份最低气温（bio6）、植被覆盖类型（Veg）贡献率分别为57.0%、18.9%、10.5%，验证了叶城沙蜥喜干旱沙漠和荒漠带的特点，与文献报道[28-29]一致。由响应曲线（图4）可见，叶城沙蜥受气温和降水影响最为明显，坡度起伏越大，叶城沙蜥蜴存在概率越低。

叶城沙蜥种群最适宜分布区、适宜分布区及低适宜分布区分别占研究区域总面积的2.2%、6.7%和16.7%，表明研究区域内叶城沙蜥的可分布区整体占比较低。在所记录到的叶城沙蜥21个分布点中，6个属于最佳栖息地，6个属于适宜栖息地，另外9个属低适宜栖息地。叶城沙蜥适宜栖息地在喀什地区源地面积最大，其次是在和田和阿克苏地区源地斑块面积适中但分布紧密；在吐鲁番、哈密地区和巴音郭楞地区源地斑块小而分散，因此短距离廊道数量多。

本研究使用Linkage Mapper工具构建了32条叶城沙蜥潜在生境廊道：长距离廊道11条，短距离廊道21条。其中，最长的廊道是c9为538.8 km，最短的是d19为8.8 km，廊道总长度是5 057.9 km。短廊道连通了相邻栖息地，长廊道促进南北源地之间的连通性。同时，沙漠的干扰作用、海拔的升高以及建筑和人口密集区可能会使廊道阻力值增加。对于叶城沙蜥的适宜栖息地应加强廊道建设，优先保护好重要廊道，廊道构建时要注重源地间的联系，避免形成生态孤岛，更好地发挥整体的保护效应。相关部门应加大对阻力大的廊道区域的资金投入，迁移阻碍物或者构建人工适应斑块。

本研究通过构建阻力面、构建最小成本路径确定叶城沙蜥生境廊道的连通性，可为研究区内叶城沙蜥生境保护与规划提供科学指导。但研究仍有不足，首先，不同环境因子的阻力值和权重是根据相关文献资料和AUC值得出的相对比重值，其赋值具有主观性，对结果的准确性可能具有一定影响。同时，环境因子的选择对叶城沙蜥生境廊道规划有重要影响。基于叶城沙蜥的生活习性及相关数据的易获取性，笔者从土地利用、海拔、植被类型、坡度、坡向及气候因子等方面分别选取影响叶城沙蜥生境分布的24个环境因子，选择这些环境因子的科学性和客观性有待进一步研究。

综合本研究结果，为了更好地保护叶城沙蜥的种群及栖息地，提出以下建议。研究区内叶城沙蜥适宜生境面积比例较低，并且气候、植被类型和海拔是影响叶城沙蜥栖息地选择的主要因子，因此需加强叶城沙蜥最适宜生境区域的保护措施。应在叶城沙蜥频繁出现的环境区域放置警告标语及警告牌，加强伤害野生动物行为的惩戒措施。研究区内低海拔地区人为干扰较多，要加强对人为干扰活动的监管，同时大力打击捕杀叶城沙蜥的违法犯罪活动，通过宣传教育，提高群众对叶城沙蜥的保护意识，鼓励当地居民积极参与叶城沙蜥等野生动物的保护工作。

参考文献：

[1] BARNOSKY A D, HADLY E A, BASCOMPTE J, *et al*. Approaching a state shift in Earth's biosphere[J]. Nature, 2012, 486(7401): 52-58.

[2] FAHRIG L. Effects of habitat fragmentation on biodiversity[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2003, 34: 487-515.

[3] RICHARDSON D M, WHITTAKER R J. Conservation biogeography: foundations, concepts and challenges[J]. Diversity and Distributions, 2010, 16: 313-320.

[4] RUDNICK D A, RYAN S J, BEIER P, *et al*. The role of landscape connectivity in planning and implementing conservation and restoration priorities[J]. Issues in Ecology, 2012, 16: 1-20.

[5] TAYLOR P D, FAHRIG L, HENEIN K, *et al*. Connectivity is a vital element of landscape structure[J]. Oikos, 1993, 68(3): 571-573.

[6] BENNETT A F. Linkages in the landscape: the role of corridors and connectivity in wildlife conservation[M]. 2nd ed. Gland: IUCN, 2003:8-9.

[7] CROOKS K R, SANJAYAN M. Connectivity conservation: maintaining connections for nature[M]//CROOKS K R, SANJAYAN M. Connectivity conservation. Cambridge: Cambridge University Press, 2006:1-10.

[8] HANSKI I. Metapopulation dynamics[J]. Nature, 1998, 396: 41-49.

[9] AYRAM C A C, MENDOZA M E, ETTER A, *et al*. Habitat connectivity in biodiversity conservation: a review of recent studies and applications[J]. Progress in Physical Geography, 2016, 40(1): 7-37.

[10] FORTUNA M A, BASCOMPTE J. Habitat loss and the structure of plant-animal mutualistic networks[J]. Ecology Letters, 2006, 9(3): 281-286.

[11] MEIKLEJOHN K, AMENT R, TABOR G. Habitat corridors & landscape connectivity: clarifying the terminology[R/OL]. Bozeman: Center for Large Landscape Conservation, 2010 (2016-09-26)[2023-07-12]. https://www. researchgate. net/publication/242196426.

[12] SHEN J K, WANG Y C. An improved method for the identification and setting of ecological corridors in urbanized areas[J]. Urban Ecosystems, 2023, 26(1): 141-160.

[13] WEI Z Z, XU Z L, DONG B, *et al*. Habitat suitability evaluation and ecological corridor construction of wintering cranes in Poyang Lake[J]. Ecological Engineering, 2023, 189: 106894.

[14] KNAAPEN J P, SCHEFFER M, HARMS B. Estimating habitat isolation in landscape planning [J]. Landscape and Urban Planning, 1992, 23(1): 1-16.

[15] CASTILHO C S, HACKBART V C S, PIVELLO V R, *et al*. Evaluating landscape connectivity for *Puma concolor* and *Panthera onca* among atlantic forest protected areas[J]. Environmental Management,2015. DOI: 10. 1007/s00267-015-0463-7.

[16] GUISAN A, THUILLER W. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models [J]. Ecology Letters, 2005, 8(9): 993-1009.

[17] BEAUMONT L J, GRAHAM E, DUURSMA D E, *et al*. Which species distribution models are more (or less) likely to project broad-scale, climate-induced shifts in species ranges?[J]. Ecological Modelling, 2016, 342: 135-146.

[18] FRANKLIN J, MILLER J A. Mapping species distributions: spatial inference and prediction [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010:15-16.

[19] MEROW C, SMITH M J, SILANDER J A, Jr. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter[J]. Ecography, 2013, 36(10): 1058-1069.

[20] 刘炳莲, 杨雨佳, 马帅, 等. 吉林省东部山区獐潜在适宜分布及生态廊道构建[J]. 野生动物学报, 2023, 44(2): 273-283.
LIU B L, YANG Y J, MA S, *et al*. Potentially suitable distribution and construction of ecological corridor of *Hydropotes inermis* in the eastern mountainous area of Jilin Province[J]. Chinese Journal of Wildlife, 2023, 44(2): 273-283.

[21] 滕扬, 张沼, 张书理, 等. 大兴安岭南段马鹿生境适宜性分析与生态廊道构建[J]. 生态学报, 2022, 42(14): 5990-6000.
TENG Y, ZHANG Z, ZHANG S L, *et al*. Habitat suitability analysis and ecological corridor designs for red deer (*Cervus elaphus*) in the southern Greater Khingan Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 5990-6000.

[22] 李琼雯, 李双, 曹铭昌, 等. 钱江源国家公园黑麂(*Muntiacus crinifrons*)生境适宜性评价及廊道设计[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(6): 778-785.
LI Q W, LI S, CAO M C, *et al*. Habitat suitability evaluation and corridor design of *Muntiacus crinifrons* in Qianjiangyuan National Park [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(6): 778-785.

[23] 徐强, 顾渝娟, 李盼畔, 等. 基于最大熵模型预测小火蚁在我国的适生区[J]. 植物保护, 2023, 49(4): 101-107.
XU Q, GU Y J, LI P P, *et al*. Potential geographical distribution of the little fire ant, *Wasmannia auropunctata* (Hymenoptera: Formicidae) in China based on MaxEnt model[J]. Plant Protection, 2023, 49(4): 101-107.

[24] PERKINS-TAYLOR I E, FREY J K. Predicting the distribution of a rare chipmunk (*Neotamias quadrivittatus oscuraensis*): comparing MaxEnt and occupancy models [J]. Journal of Mammalogy, 2020, 101(4): 1035-1048.

[25] RAI R, ZHANG Y L, WANG Z F, *et al*. Use of the MaxEnt model to predict changes in sloth bear (*Melursus ursinus*) habitats in the Gandaki River Basin, Nepal [J]. Journal of Mountain Science, 2022, 19(7): 1988-1997.

[26] BERHANU Y, TASSIE N, SINTAYEHU D W. Predicting the current and future suitable habitats for endemic and endangered Ethiopian wolf using MaxEnt model[J]. Heliyon, 2022, 8(8): e10233.

[27] DAHAL D, NEPAL A, RAI C M, *et al*. Understanding the impact of climate change on the habitat of the rufous-necked hornbill (*Aceros nipalensis*) (Hodgson, 1829) using MaxEnt modeling in Bhutan [J]. Ornithology Research, 2023, 31(3): 182-192.

[28] 阿尔孜古·衣米提. 叶城沙蜥两性异形和形态特征的地理差异研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2021.
YIMIT A. Sexual dimorphism and geographic variations of morphological characteristics of *Phrynocephalus axillaris* [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2021.

[29] 阿尔孜古·衣米提, 徐峰, 李俊. 塔里木盆地西南部叶城沙蜥的两性异形研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(7): 190-195.
YIMIT A, XU F, LI J, *et al*. Sexual dimorphism in morphologi-

cal traits of *Phrynocephalus axillaris* in the southwestern Tarim Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(7): 190-195.

[30] 钟文. 塔里木盆地环境因子对密点麻蜥遗传进化的影响[D]. 兰州: 西北民族大学, 2022.
ZHONG W. Effects of environmental factors in the Tarim Basin on the genetic evolution of the *Eremias multiocellata*[D]. Lanzhou: Northwest Minzu University, 2022.

[31] BARELLI C, ALBANESE D, DONATI C, *et al*. Habitat fragmentation is associated to gut microbiota diversity of an endangered primate: implications for conservation[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 14862.

[32] 金园庭, 田仁荣, 刘迺发, 等. 四种沙蜥的形态地理变异: Bergmann和Allen规律的检验[J]. 动物学报, 2006, 52(5): 838-845.
JIN Y T, TIAN R R, LIU N F, *et al*. Altitudinal variations of morphological characters of *Phrynocephalus* sand lizards: on the validity of Bergmann's and Allen's rules[J]. Acta Zoologica Sinica, 2006, 52(5): 838-845.

[33] LOMBAL A J, O'DWYER J E, FRIESEN V, *et al*. Identifying mechanisms of genetic differentiation among populations in vagile species: historical factors dominate genetic differentiation in seabirds[J]. Biological Reviews, 2020, 95(3): 625-651.

[34] 宋琪, 刘金龙, 郭宪光. 基于Roche 454 GS FLX高通量测序的叶城沙蜥基因组微卫星特征分析[J]. 四川动物, 2019, 38(1): 62-67.
SONG Q, LIU J L, GUO X G. Characterization of microsatellites in *Phrynocephalus axillaris* genome using Roche 454 GS FLX[J]. Sichuan Journal of Zoology, 2019, 38(1): 62-67.

[35] 岳丰. 密点麻蜥的能量代谢以及三种沙蜥的繁殖生物学研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
YUE F. A study on the energy metabolism of *Eremias multiocellata* and reproductive biology of three *Phrynocephalus* lizards[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013.

[36] 郭燕玲. 新疆湖泊蒸发的时空演变特征和影响机制研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2022.
GUO Y L. Spatial-temporal evolution characteristics and influencing mechanism of lake evaporation in Xinjiang[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022.

[37] WEN H, ZHI X F, HU S Q, *et al*. Refined assessment of potential evapotranspiration in the Tarim Basin[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10:904129.

[38] ZHAO Y, ZHOU Y, WANG M Z, *et al*. Annual distributions and variations of dust weather occurrence over the Tarim Basin, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2018, 132: 209-217.

[39] 谢慧. 塔里木盆地及周边地区叶城沙蜥系统地理和遗传结构研究[D]. 兰州: 西北民族大学, 2023.
XIE H. Phylogeography and genetic structure of the *Phrynocephalus axillaris* in the Tarim Basin and surrounding areas[D]. Lanzhou: Northwest Minzu University, 2023.

[40] 谢聿源, 李晨, 赵宁宁, 等. 基于MaxEnt模型的西藏飞蝗在昌都市的适生区预测[J]. 高原农业, 2023, 7(3): 249-258.
XIE Y Y, LI C, ZHAO N N, *et al*. Prediction of suitable habitat of Tibetan *Migratory locust* in Changdu City based on MaxEnt model[J]. Journal of Plateau Agriculture, 2023, 7(3): 249-258.

[41] 申立泉, 吴佳忆, 周鑫, 等. 基于MaxEnt模型的北京周边山区野生狍(*Capreolus pygargus*)的生境适宜性评价[J]. 生态学杂志, 2023, 42(10): 2555-2560.
SHEN L Q, WU J Y, ZHOU X, *et al*. Assessment of habitat suitability for wild roe deer (*Capreolus pygargus*) in mountainous areas around Beijing with MaxEnt model[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(10): 2555-2560.

[42] 陈文昱, 党英侨, 王小艺, 等. 基于MaxEnt模型的白蜡吉丁啮小蜂的潜在适生区预测[J/OL]. 中国生物防治学报, 2023(2023-06-09)[2023-07-12]. https://doi. org/10. 16409/j. cnki. 2095-039x. 2023. 01. 023.
CHEN W Y, DANG Y Q, WANG X Y, *et al*. Potential distribution of *Tetrastichus planipennisi* based on MaxEnt Niche model[J/OL]. Chinese Journal of Biological Control, 2023(2023-06-09)[2023-07-12]. https://doi. org/10. 16409/j. cnki. 2095-039x. 2023. 01. 023.

[43] ASHRAF U, ALI H, CHAUDRY M N, *et al*. Predicting the potential distribution of *Olea ferruginea* in Pakistan incorporating climate change by using MaxEnt model[J]. Sustainability, 2016, 8(8): 722.

[44] 程向元, 刘俊, 崔杰, 等. 基于MaxEnt模型预测马来鳄在中国的潜在生境[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2023, 46(5): 691-697.
CHENG X Y, LIU J, CUI J, *et al*. Potential habitat prediction of *Tomistoma schlegelii* in China based on MaxEnt model[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2023, 46(5): 691-697.

[45] 孙贝贝, 汤璐璐, 王俪桦, 等. 基于MaxEnt模型及ArcGIS预测浙贝母适生区分布[J]. 亚太传统医药, 2023, 19(5): 159-164.
SUN B B, TANG L L, WANG L H, *et al*. Predicting suitable growth areas of *Fritillaria thunbergii* based on MaxEnt model and ArcGIS[J]. Asia-Pacific Traditional Medicine, 2023, 19(5): 159-164.

[46] MA B B, SUN J. Predicting the distribution of *Stipa purpurea* across the Tibetan Plateau via the MaxEnt model[J]. BMC Ecology, 2018, 18(1): 10.

[47] 万安, 朱正杰, 万云, 等. 基于MaxEnt模型的绿太阳鱼物种分布预测[J]. 宿州学院学报, 2023, 38(3): 34-39.
WAN A, ZHU Z J, WAN Y, *et al*. Prediction of species distribution of green sunfish based on MaxEnt model[J]. Journal of

Suzhou University, 2023, 38(3): 34-39.

[48] MARTÍNEZ-CAMBLOR P, BAYÓN G F, PÉREZ-FERNÁNDEZ S. Cumulative/dynamic ROC curve estimation[J]. Journal of Statistical Computation and Simulation, 2016, 86(17): 3582-3594.

[49] 姬捷, 郭旭东, 杨莉萍, 等. 基于MaxEnt模型和ArcGIS的兰州百合生态适宜性区划研究[J]. 中国中医药信息杂志, 2023, 30(5): 1-4.
JI J, GUO X D, YANG L P, *et al*. Study on ecology suitability regionalization of *Lilium davidii* var. *willmottiae* based on MaxEnt model and ArcGIS[J]. Chinese Journal of Information on Traditional Chinese Medicine, 2023, 30(5): 1-4.

[50] 夏岩, 杨艳, 刘军和. 基于MaxEnt模型的河南省美国白蛾适生性分析[J]. 湖南农业科学, 2022(12): 66-70.
XIA Y, YANG Y , LIU J H. Adaptability analysis of *Hyphantria cunea* in Henan Province based on MaxEnt model[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2022(12): 66-70.

[51] 王佩, 李英杰, 袁家根, 等. 基于优化MaxEnt模型的原麝生境适宜性评价[J]. 野生动物学报, 2023, 44(1): 38-45.
WANG P, LI Y J, YUAN J G, *et al*. Habitat suitability assessment for *Moschus moschiferus* based on optimized MaxEnt model [J]. Chinese Journal of Wildlife, 2023,44(1): 38-45.

[52] 孙珊, 齐增湘, 周敏, 等. 野生哺乳动物生态廊道构建:以云豹为例[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(7): 81-84;96.
SUN S, QI Z X, ZHOU M, *et al*. Construction of ecological corridor for wild mammals: taking clouded leopard as an example [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(7): 81-84;96.

[53] 郭韩悦阳, 刘嘉纬, 陈春旭. 云南省澜沧江流域自然保护地生态网络构建[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 193-201.
GUO-HAN Y Y, LIU J W, CHEN C X. Construction of an ecological network of natural reserves in Lancang River Basin, Yunnan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 193-201.

[54] 田硕娟, 张文君, 何灵, 等. 基于Linkage Mapper与复杂网络的成都市生态网络构建与优化[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(3): 176-184.
TIAN S J, ZHANG W J, HE L, *et al*. Construction and optimization of Chengdu ecological network based on Linkage Mapper and complex network[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, 38(3): 176-184.

[55] 张旭, 王玲玲, 黄峰, 等. 长江中游地区麋鹿生境适宜性分析与生态廊道构建[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2023, 57(3): 404-411.
ZHANG X, WANG L L, HUANG F, *et al*. Habitat suitability analysis and ecological corridor construction of milu (*Elaphurus davidianus*) in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2023, 57(3): 404-411.

[56] FONSECA E D S, GUIMARÃES R B, PRESTES-CARNEIRO L E, *et al*. Predicted distribution of sand fly (Diptera: Psychodidae) species involved in the transmission of leishmaniasis in São Paulo state, Brazil, utilizing maximum entropy ecological niche modeling[J]. Pathogens and Global Health, 2021, 115(2): 108-120.

[57] 贾翔, 王超, 王润林, 等. 基于MaxEnt模型的对开蕨在吉林省的潜在适生区预测[J]. 中国野生植物资源, 2023, 42(3): 100-106.
JIA X, WANG C, WANG R L, *et al*. Prediction of potential suitable distribution area in Jinlin Province of *Asplenium komarovii* based on MaxEnt model[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2023, 42(3): 100-106.