

玛曲县高原鼠兔地理分布预测及其对气候变化的潜在响应

花蕊,周睿,包达尔罕,张飞宇,周富斐,唐庄生,花立民

(甘肃农业大学草业学院/草业生态系统教育部重点实验室/甘肃省草业工程实验室/中-美草地畜牧业可持续发展研究中心,甘肃兰州 730070)

摘要:高原鼠兔(*Ochotona curzoniae*)是高寒草地生态系统中的关键物种,对于维系草地生物多样性有着重要的作用。认识高原鼠兔的空间分布及其影响因素,对了解其栖息地的选择和生态系统中的作用有重要意义。利用甘肃省玛曲县当前高原鼠兔 90 个分布点数据和 27 个环境因子数据以及 BIOMOD2 软件包中的 10 个物种分布模型,预测了当前和 RCP(Representative Concentration Pathways) 2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 等 4 种排放情景下未来 2050s 和 2070s 时间段玛曲县高原鼠兔潜在分布范围。结果发现,在 10 个模型中,随机森林(Random Forest, RF)表现最佳,表面分布区分室模型(Surface Range Envelop, SRE)最差;在气候因子中最湿季平均气温(Bio8 因子)重要值最高,对高原鼠兔栖息地的选择影响最为显著。

关键词:高原鼠兔;BIOMOD2;物种分布模型;气候变化

中图分类号:S812 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2020)03-0001-08

DOI: 10.13817/j.cnki.cyycp.2020.03.001

环境因子不仅对生物生长发育、繁衍生存等有着重要影响,同时也影响着生态系统结构和功能,进而引起物种栖息地选择及分布范围变化^[1]。物种分布模型(Species Distribution Models, SDM_s)是利用物种空间分布点与不同环境因子之间的关系来模拟和预测某一物种在特定空间范围内的分布状况,是通过分布点来推测分布区的重要手段^[2-3]。近年来,随着 SDM_s 技术迅速发展,为了解物种分布及其影响因素提供了极大帮助。但在众多 SDM_s 模型中,不同参数设置及采

用方法上各有差异,导致研究结果存在很大的不确定性^[4],也为选择最优模型增加了一定的难度^[5-6]。为解决该问题,相关研究人员研发了 BIOMOD2 软件包,其包含 10 种物种分布模型算法,可以通过模型组合来综合评估模拟结果的差异,进而处理不同模型带来的不确定性,以最大精度来选择最优模型^[7]。

青藏高原具有丰富的草地资源,是我国乃至东南亚重要的陆地生态系统屏障,在涵养水源、维持生物多样性及生态系统稳定中发挥着十分重要的作用^[8]。高原鼠兔(*Ochotona curzoniae*)是青藏高原生态系统的优势鼠种,因大量采食牧草,不但加速了草地退化,而且对畜牧业及整个青藏高原生态环境存在威胁^[9-10]。但高原鼠兔在草地生态系统食物网结构及物质循环中又有其独特的地位,具有“生物工程师”称号^[11-12]。作为高寒草地生态系统的重要组成部分,了解高原鼠兔的空间分布及影响其栖息地选择的因子,对于保护草地生态系统物种多样性具有重要意义。

本研究基于 R 语言的 BIOMOD2 软件包,通过无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)技术实地调查甘肃省玛曲县高原鼠兔分布空间位置,利用 10 种模型

收稿日期:2019-09-18; **修回日期:**2019-11-25

基金项目:川西北和甘南退化高寒生态系统综合整治(2017YFC0504803);国家重点研发计划项目(No. 2016YFC0501902, No. 2017YFC0504803);甘肃省高校协同创新科技团队支持计划项目

作者简介:花蕊(1994-),女,甘肃临洮人,硕士研究生。

E-mail: huarui_gsau@163.com

花立民为通讯作者。

E-mail: hualm@gsau.edu.cn

分别预测玛曲县高原鼠兔当前分布范围,并进一步预测 21 世纪 50~70 年代,基于“代表性浓度途径”(Representative Concentration Pathways, RCP)RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5 等 4 种不同气候情景下该区域高原鼠兔分布范围变化情况,分析未来气候变化下高原鼠兔分布的变化特征,旨在了解高原鼠兔时空分布与相关环境因子之间的关系,同时也对草地生态系统保护和高原鼠兔科学防控提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区选择

研究区域选择在青藏高原东部玛曲县,地理位置 E 100°45′45″~102°29′00″,N 33°06′30″~34°30′15″。年均温 1.2℃,最冷月 1 月温度为-8.7℃,最热月 7 月温度为 11.3℃,无霜期 20 d,年均日照时数 2 631.9 h。西倾山从北向南绵延进入县境北部,形成了玛曲西北高,东南低,由西北向东南高度递减的地势。土壤类型主要有高山草甸土、亚高山草甸土、草甸土、沼泽土、泥炭土、黑钙土、暗棕壤,以亚高山草甸土分布面积最大。垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、紫花针茅(*Stipa purpurea*)、早熟禾(*Poa annua*)和鹅绒委陵菜(*Potentilla ansrina*)等为优势物种。主要伴生物种包括黄帚橐吾(*Ligularia virgaurea*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、丝叶毛茛(*Ranunculus tanguticus*)、乳浆大戟(*Euphorbia esula*)、独一味(*Lamio phlomis rotata*)和黄花棘豆(*Oxytropis ochrocephala*)。

1.2 高原鼠兔分布点调查

于 2019 年 5 月进行高原鼠兔分布点的野外调查。由于研究区的地形差异较大,高原鼠兔调查点的均匀设置会因为地势和距离等因素受到限制。为了提高调查效率与精度,本研究使用无人机低空航拍,共取得 60 个存在点和 30 个不存在点的数据(图 1),用 GPS 记录相应空间位置。

1.3 环境变量选择及其数据获取

选取 3 组(气候、地形和土壤)共 27 个环境变量,包括 19 个气候变量、3 个地形变量、3 个土壤理化性质变量,植被变量和水源变量。

气候数据来源于生物模型中广泛使用的世界气候数据库(WORLD-CLIM, version 1.4, <http://www.worldclim.org>),由 19 个(Bio1~Bio19)环境变量组

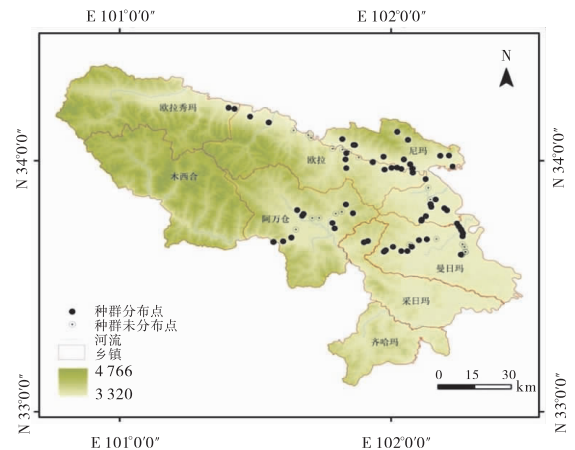


图 1 高原鼠兔调查取样点

Fig. 1 Sampling sites of plateau pika in Maqu

成^[11],包括年平均气温(Bio1)、气温月较差(Bio2)、气温的等温性(Bio3)、气温的季节性(Bio4)、最暖月最高气温(Bio5)、最冷月最低气温(Bio6)、气温年较差(Bio7)、最湿季平均气温(Bio8)、最干季平均气温(Bio9)、最暖季平均气温(Bio10)、最冷季平均气温(Bio11)、年降水量(Bio12)、最湿月降水量(Bio13)、最干月降水量(Bio14)、降水的季节性(Bio15)、最湿季降水量(Bio16)、最干季降水量(Bio17)、最暖季降水量(Bio18)和最冷季降水量(Bio19),空间分辨率为 1 km。

数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据来自地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn>)。在 ArcGIS 平台中提取海拔(Elevation),坡度(Slope)和坡向(Aspect)3 个变量的栅格数据。考虑到水源对高原鼠兔分布的影响,同时计算得到研究区河流分布栅格数据。土壤数据来自中国资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn>),选取地表以下 0~5 cm 土壤容重,土壤 pH 和土壤有机质 3 个数据集。植被数据来自归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)采用 MODIS/Terra MOD13A3 产品,空间分辨率为 1 km。在 ArcGIS 平台上进行像元计算,得到研究区 NDVI 年均值栅格图层。

未来气候数据来自于联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的第 5 次排放情景数据(<http://www.worldclim.org>),即“代表性浓度途径”(Representative Concentration Pathways, RCP),RCP 包括了 RCP2.6(最低温室气体排放量)、RCP4.5(中等温室气体排放量)、RCP6.0(较高温室气体排放量)和 RCP8.5(最高温室气体排放量)^[13-14]。4 个不同的排

放途径,假设不同的辐射强度和温室气体浓度,导致其增温效果也不同。其中,RCP8.5 情景模拟全球温度增加最快,气候变化最为剧烈。而 RCP2.6 假设全球增温在 2℃ 内。未来气候数据采用北京气候中心独立开发的大气环流模型 GCM(Beijing Climate Center Climate System Model version 1.1,BCC_CSM1.1)产生的预测数据。本研究选取未来 2050s(2041~2060 年)和 2070s(2061~2080 年)2 个时段玛曲县的 4 种 RCP 预测数据参与建模,空间分辨率为 1 km。

1.4 BIOMOD2 模型简介

BIOMOD2 是 R 语言下一个新型计算框架,它包含 10 种物种分布模型^[15],通过不同的模型方法分析物种与环境之间的关系,本研究分别用 10 种模型预测高原鼠兔的可能分布区。

1.4.1 广义线性模型(Generalized Linear Model, GLM) 广义线性模型比经典多元回归的形式要自由,能提供变量的误差分布,而不单是正态和方差不恒定,比普通线性模型的应用更加广泛。随之而来的缺点是需要事先了解物种和环境变量之间的关系^[16]。

1.4.2 广义相加模型(Generalized Additive Model, GAM) 广义相加模型是广义线性模型和可加模型的混合,它无需像 GLM 那样需要假定曲线的形状或特性参数的响应函数,比 GLM 的能力更强,且在数据形式上更为复杂。它在回归模型的基础上对每个因变量采用平滑函数进行变换,残差一般比广义线性模型小^[17]。

1.4.3 表面分布区分室模型(Surface Range Envelop or usually called BIOCLIM, SRE/BIOCLIM) 表面分布区分室模型又称 BIOCLIM 模型,分室模型可以通过物种存在点每个变量的最大和最小值来确定。位于这些最大值和最小值之间的变量被包括在其中,是模拟物种分布或生物群系的最简单方法^[18]。

1.4.4 多元适应回归样条函数(Multiple Adaptive Regression Splines, MARS) MARS 方法可以根据解释变量不同的等级来确认和估计模型的参数。模型参数的临界点或阈值取决于样条函数结点,可以认为与分段回归类似。MARS 的优越之处在于,样条函数结点是通过运算自动确定的。此外,变量间的复杂非线性交互也可以确定^[19]。

1.4.5 柔性判别分析(Flexible Discriminant Analysis, FDA) 柔性判别分析是广义线性分析的一种,是

一个多组的非线性判别方法。它通过依据预测变量建立判别准线,以达到最大化不同分类间离差的同时,最小化相同类内部的离差,依此进行判别分析^[20]。

1.4.6 分类树分析(Classification Tree Analysis, CTA) 分类树建立过程中,采用一个简单规则,根据自变量的一致性,对因变量进行重复分组,从而进行物种分布预测^[21]。

1.4.7 推进式回归树(Generalized Boosting Model or usually called Boosted Regression Tree, GBM/BRT) 推进式回归树运用推进方法对多个简单模型进行拟合,综合每个结果形成最优化的响应预测^[22]。更为重要的是,BRT 可以获得模型中每个变量的相对重要值^[23]。

1.4.8 人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN) 人工神经网络是一种模仿生物神经网络结构和功能的模型,通过大量人工神经元进行联合计算,常用于关系复杂的输入和输出变量间的建模。ANN 的准确性主要取决于两个参数:权重的衰减(weight decay)程度和隐元的数量(hidden unit)^[24]。

1.4.9 随机森林(Random Forest, RF) 随机森林是一种通过机器学习和集成的分类方法,通过对大量的分类树的计算来进行分类和回归^[25]。在树的构建过程中,随机地从源数据集获取训练集和选择训练集的属性,在输入向量中对一个新对象分类,将输入向量放到每个树下。每棵树将给出其分类信息,所有的树对其分类信息进行打分,随机森林将在所有树中搜寻得分最高的打分结果。

1.4.10 最大熵模型(Maximum Entropy, MAX-ENT) 最大熵统计建模就是从符合条件的分布中选择熵最大的分布作为最优分布。MAXENT 的突出优点是它可以拟合由多种函数类型组合而成的复杂的响应变量物,通过样本较小的物种分布数据即可得到较好的模拟效果^[26]。

1.5 最优模型选取

为了对模型精度进行检验评价,将本研究实地调查点中的 70% 样本作为训练样本,30% 样本作为检验样本。运行过程中随机对训练值和测试值进行选取,重复运行 12 次,用真实技巧统计值(True Skill Statistic, TSS)与受试者工作特征曲线 AUC(Area Under the ROC Curve)对最终模拟结果进行评价。TSS 的

取值在 0~1, TSS 的值越接近于 1, 模型的模拟效果越好。AUC 的取值一般在 0.5~1, 越接近于 1, 表示模型预测效果越好, 而越接近于 0.5, 则表示模型预测效果越差(表 1)^[26]。

表 1 TSS 与 AUC 评价标准

Table 1 Evaluation criteria of TSS and AUC

效果	AUC 取值范围	TSS 取值范围
极好	0.90~1.00	0.85~1.00
较好	0.80~0.90	0.70~0.85
好	0.70~0.80	0.50~0.70
一般	0.60~0.70	0.40~0.55
差	0.50~0.60	0.00~0.40

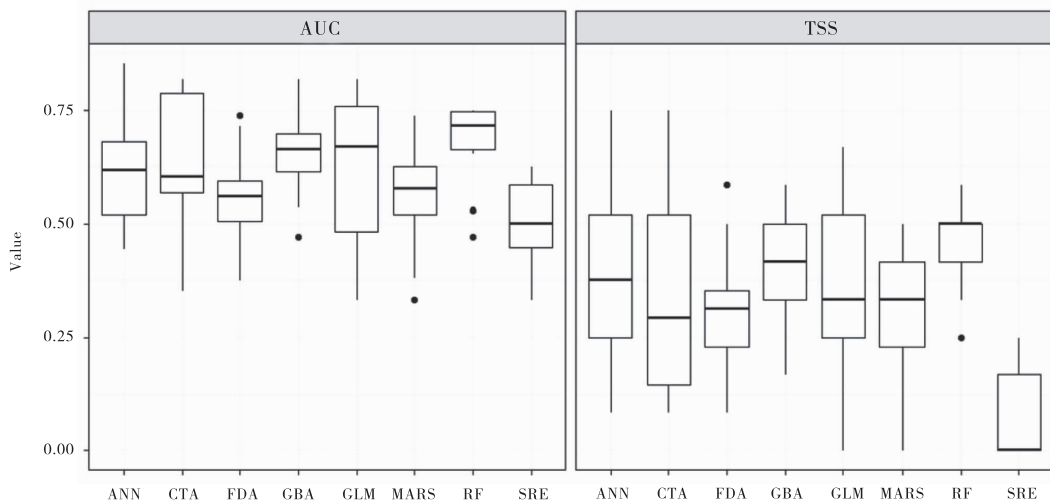


图 2 高原鼠兔预测模型的 AUC 与 TSS 值

Fig. 2 The values of TSS and AUC for prediction models of plateau pika

2.2 影响高原鼠兔分布的环境因子

根据多次运行结果得到不同环境因子重要值的平均值(表 2)。本研究中 RF 模型的精度最高, 在 RF 模型中, Bio4、Bio6、Bio8、Bio9 和 Bio16 因子重要值均高, 可见气温的季节性、最冷月最低温、最湿季平均气温、最干季平均气温、最湿季降水量因子对研究区高原鼠兔分布选择最为重要。

2.3 当前气候条件下高原鼠兔适宜生境分布预测

基于 RF 最优模型运行 12 次, 从中选取效果最佳的结果(AUC=0.750, TSS=0.583)进行绘图, 得到当前气候下玛曲县高原鼠兔分布预测图(图 3)。结果显示, 玛曲县高原鼠兔在东南部分布概率最小, 即曼日玛、采日玛东南部及齐哈玛大部, 西北部次之, 最适宜分布区多集中在尼玛全部、欧拉、木西合及阿万仓大部。总体来看适宜区面积占比最大, 为总面积的 55.8%; 低适宜生境面积占比最小, 为总面积的 8.9%(表 3)。

2 结果与分析

2.1 不同模型精度对比

10 种模型中除 GAM 与 MAXENT 运行失败外, 其余 8 种模型均运行成功。8 种模型运行多次得到的 AUC 与 TSS 值见图 2。8 种模型中, RF 的模拟效果最佳的 AUC 为 0.750, TSS 为 0.583, 说明在多次运行的过程中该模型能较准确地预测并能保持一定的稳定性。SRE 最差, AUC 为 0.499, TSS 为 0.076, 可以认为该模型基本无法在该地区准确预测。其他模型均表现一般。

表 2 模拟玛曲县高原鼠兔分布的环境因子重要值

Table 2 The importance of environmental factors simulating the distribution of plateau pika in Maqu

因子	RF	因子	RF
Bio1	0.000 9	Bio15	0.002 2
Bio2	0.009 5	Bio16	0.010 5
Bio3	0.007 5	Bio17	0.000 5
Bio4	0.012 3	Bio18	0.009 1
Bio5	0.001 5	Bio19	0.000 6
Bio6	0.060 1	Soil PH	0.001 0
Bio7	0.003 5	容重	0.000 9
Bio8	0.250 1	有机质	0.000 9
Bio9	0.036 5	河流	0.001 4
Bio10	0.004 2	坡度	0.001 0
Bio11	0.001 1	坡向	0.000 8
Bio12	0.006 7	海拔	0.000 8
Bio13	0.000 4	NDVI	0.000 8
Bio14	0.000 0		

表 3 当前气候下玛曲县高原鼠兔不同等级适宜区面积百分比

Table 3 Percentage of suitable areas for different grades of plateau pika under current climate in Maqu

不同适宜区	不适宜生境	低适宜生境	中适宜生境	适宜生境
面积百分比	12.6%	8.9%	22.8%	55.8%

下玛曲县高原鼠兔潜在分布的变化,得出未来气候条件下高原鼠兔的潜在空间分布(图 4)。根据模型预测结果,到 21 世纪 50 年代,与当前分布预测相比,随着 4 种排放情景的变化,高原鼠兔不适宜分布区面积均有所增大,分别占总面积的 16.2%、17.3%、13.3%、17.2%。其中在 RCP2.6 情境下,全县各适宜区面积变化幅度均较小。在 RPC4.5 情景下,高原鼠兔适宜区面积范围较大,占总面积的 70.5%,与当前预测相比增加了 14.7%;中等适宜生境范围较当前缩减 14.9%。在 RPC6.0 情景下,适宜区面积较当前分布减少了 27.9%,其余分布区面积均增加。在 RCP8.5 情境下,中适宜生境面积减少了 9.7%,其余各适宜区范围变化程度均较小。21 世纪 70 年代与当前相比,在 RCP2.6 情境下高原鼠兔不适宜生境分布面积增大,其余 3 种排放情景下不适宜区面积均减小。在 RCP8.5 最高温室气体排放下,21 世纪 70 年代高原鼠兔适宜区面积与目前相比缩减明显,为 21.8%(表 4)。

21 世纪 70 年代与 50 年代相比,在 RCP2.6 排放情景下,高原鼠兔不适宜区分布范围变化不大,适宜区面积增加 15.7%。在 RCP4.5 排放下,20 世纪 70 年代中等适宜分布区面积增幅明显,与 50 年代相比提升 36.8%,尤其体现在玛曲县西北部。在 RCP6.0 排放情景下,21 世纪 70 年代分布范围较 50 年代来看,适宜区面积增大 29.1%,其余均减小。而在 RCP8.5 排放情景下,21 世纪 70 年代玛曲县高原鼠兔不适宜生境与适宜生境面积与 50 年代相比均有减小。

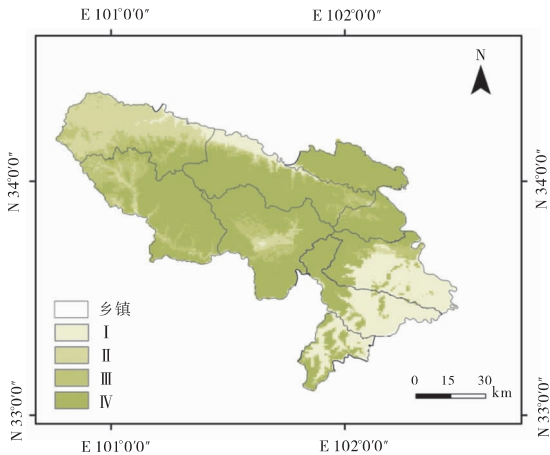


图 3 当前气候条件下玛曲县高原鼠兔分布情况预测

Fig. 3 Prediction of distribution for plateau pika in Maqu under current climatic condition

注: 图中 I:不适宜生境; II:低适宜生境; III:中适宜生境; IV:适宜生境,下同

2.4 未来气候条件下高原鼠兔适宜生境分布预测

本研究采用相同的气候环境指标,利用对应的气候环境因子数据进行建模,来预测不同气候变化情景

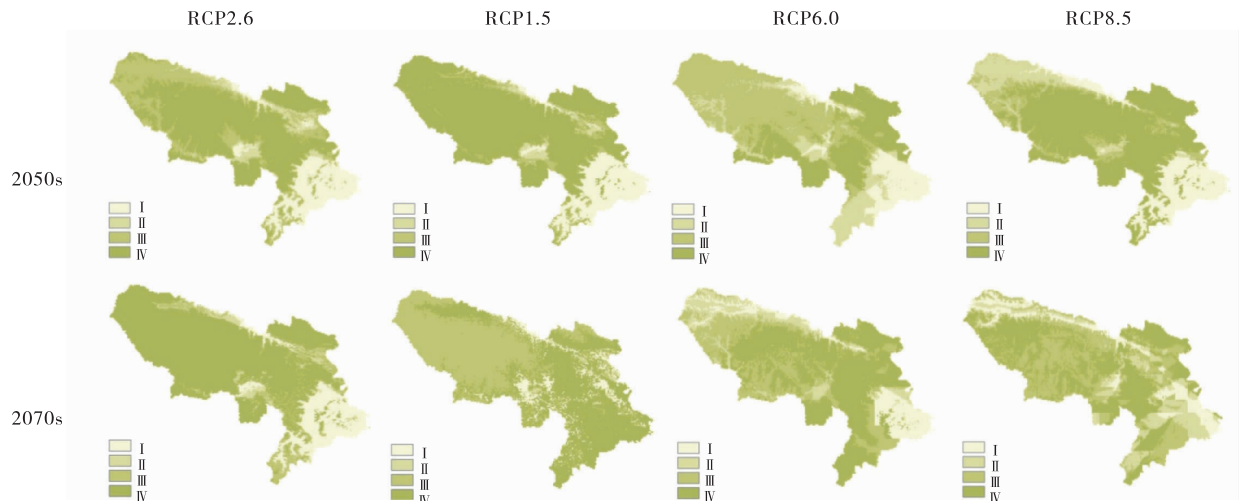


图 4 未来气候条件下玛曲县高原鼠兔分布预测

Fig. 4 Predication of distribution for plateau pika in Maqu under future climatic condition

表 4 未来气候下玛曲县高原鼠兔不同等级适宜区百分比

Table 4 Percentage of suitable areas for different grades of plateau pika under future climate in Maqu %

不同未来气候	2050s RCP2.6	2050s RCP4.5	2050s RCP6.0	2050s RCP8.5	2070s RCP2.6	2070s RCP4.5	2070s RCP6.0	2070s RCP8.5
不适宜生境	16.2	17.3	13.3	17.2	15.7	6.3	11.9	10.2
低适宜生境	6.9	4.2	16.6	12.8	5.23	3.7	12.6	16.1
中适宜生境	23.6	7.9	42.2	13.1	11	44.7	27	33.7
适宜生境	52.3	70.5	27.9	56.9	68	45.3	57	34

3 讨论

气候变化主要体现在降水与温度两方面,对物种的生存、繁殖有重要影响。本研究中,气温的季节性、最冷月最低温、最湿季平均气温、最干季平均气温、最湿季降水量因子对高原鼠兔分布有重要影响。高原鼠兔分布在高海拔地区,其本身对温度降水响应十分敏感^[27-30],较温暖的气温有利于高原鼠兔生存,气温的降低使得植被生长缓慢,对高原鼠兔采食造成一定影响,不利于其生长繁殖。高原鼠兔栖息地选择也受土壤 pH、有机质及容重的影响,过于干燥的土壤温度较高,过于潮湿的土壤易滋生微生物,所以土壤含水量太低或太高均不利于高原鼠兔掘洞居住^[31];土壤有机质可以反应土壤肥力状况,进而与植被的生长紧密相关,高原鼠兔偏向于有机质低的土壤进行居住,随着草地退化有机质降低,高原鼠兔密度呈增加趋势,相反其密度的增加又进一步加剧了草地退化。距离水源地远近也是高原鼠兔选择栖息地时的重要考虑因素,雨季汛期鼠洞可能会被水淹没^[32],通过预测全县东南部高原鼠兔分布面积小,原因之一可能为东南部是黄河二级阶地,在栖息地选择时高原鼠兔对其有所回避。同时高原鼠兔对坡向也有一定选择,卫万荣等^[33]研究得出高原鼠兔更偏爱于南坡或偏南坡向,对其他坡向完全没有选择。将分布预测与 DEM 结合,可看出在地势较陡峭的山地谷地分布较少,可能是由于地势较陡峭的山地视野不开阔,不利于躲避天敌,同时山地土层较薄也不利于其居住,与其他研究中高原鼠兔更喜欢地势平坦开阔的滩地、阶地一致^[34]。

本文采用 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 4 种排放情景的气候数据模拟气候变化来预测未来玛曲县高原鼠兔适宜生境分布,发现在不同排放情景下,高原鼠兔的适宜生境面积以及分布范围都有所不同,说明气候变化对其适宜生境分布的潜在影响有一定的

不确定性^[35]。在所有因子中最湿季平均气温(Bio8 因子)重要值最高,最冷月最低气温(Bio6 因子)次之,说明高原鼠兔栖息地选择与温度、降水有较大关系。高原鼠兔生活在高海拔地区,对温度响应十分敏感,温度的变化会影响鼠兔分布区变化。由于气候因素很大程度上决定着物种的生存分布,本研究通过预测 4 种排放情景下 21 世纪 50 年代与 21 世纪 70 年代两个时间段的玛曲县高原鼠兔的适宜生境的变化趋势,可看出在 RCP8.5 温室气体排放最高情景下,随着时间的增加高原鼠兔适宜分布区面积呈逐渐减小趋势,适宜生境更趋向于选择较高海拔地区,进一步证实温度对其栖息地选择的影响。通过对未来气候变化下高原鼠兔分布区预测,可提前对适宜分布概率较大区域进行监测预警,该结果对未来高原鼠兔的分布调查、防控可提供参考。

目前,对啮齿动物物种分布的调查多以人工实地统计为主,该方法简单直观,对工作人员技术要求低,但往往耗费大量人力及时间,且不能实现对高原鼠兔长期、连续性监测^[36]。近年来,随着无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)技术的发展,小型无人机逐渐开始应用于生态环境监测及生物多样性研究中。玛曲县地势起伏较大,在对高原鼠兔分布点调查时,往往受到地势、距离等因素限制使得调查点不易通行,无人机则充分彰显其优势^[37-38],对于物种分布点的调查,相较于传统人工法简单省力,取样范围广,填补了人工调查中存在的不足,为高效、快速监测提供了一种新方法^[39]。

4 结论

本研究利用无人机对玛曲县高原鼠兔分布点进行低空调查,从中提取 60 个存在点与 30 个不存在点,结合 BIOMOD2 模型对高原鼠兔分布区进行了模拟。在 10 个模拟模型中,GAM 与 MAXENT 模型存在缺失

值,故舍弃这两种模型。剩余 8 种模型中,RF 表现最佳,说明这种复杂的机器模型相较于 GLM、GAM 等简单算法在预测高原鼠兔分布中具有较高的准确性及稳定性。其优势在于可以在样本量不足时生成预测数据,在一定程度上对异常值进行处理,使得它在预测时性能表现最佳。对高原鼠兔的潜在地理分布预测结果显示,玛曲县高原鼠兔在东南部分布概率较小。

参考文献:

- [1] Li X, Tian H, Wang Y, *et al.* Vulnerability of 208 endemic or endangered species in China to the effects of climate change[J]. *Regional Environmental Change*, 2013, 13(4): 843–852.
- [2] Austin M P. Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modelling[J]. *Ecological Modelling*, 2002, 157(2–3): 101–118.
- [3] Guisan A, Zimmermann N E. Predictive habitat distribution models in ecology[J]. *Ecological Modelling*, 2000, 135(2–3): 147–186.
- [4] Pulliam H R. On the relationship between niche and distribution[J]. *Ecology Letters*, 2010, 3(4): 349–361.
- [5] Thuiller W, Lafourcade B, Engler R, *et al.* BIOMOD—a platform for ensemble forecasting of species distributions[J]. *Ecography*, 2009, 32(3): 369–373.
- [6] 毕迎风, 许建初, 李巧宏, 等. 应用 BioMod 集成多种模型研究物种的空间分布—以铁杉在中国的潜在分布为例[J]. *植物分类与资源学报*, 2013, 35(5): 647–655.
- [7] Austin M. Species distribution models and ecological theory: A critical assessment and some possible new approaches[J]. *Ecological Modelling*, 2007, 200(1–2): 1–19.
- [8] 于伯华, 吕昌河. 青藏高原高寒区生态脆弱性评价[J]. *地理研究*, 2011, 30(12): 2289–2295.
- [9] Smith A T, Foggin J M. The plateau pika (*Ochotona curzoniae*) is a keystone species for biodiversity on the Tibetan plateau[J]. *Animal Conservation*, 1999, 2(4): 235–240.
- [10] 李文靖, 张堰铭. 高原鼠兔对高寒草甸土壤有机质及湿度的作用[J]. *兽类学报*, 2006, 26(4): 331–337.
- [11] 孙飞达, 郭正刚, 尚占环, 等. 高原鼠兔洞穴密度对高寒草甸土壤理化性质的影响[J]. *土壤学报*, 2010, 47(2): 378–383.
- [12] Chen J, Yi S, Qin Y. The contribution of plateau pika disturbance and erosion on patchy alpine grassland soil on the Qinghai-Tibetan Plateau: Implications for grassland restoration[J]. *Geoderma*, 2017, 297: 1–9.
- [13] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report (AR5) of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [14] Moss R H, Edmonds J A, Hibbard K A, *et al.* The next generation of scenarios for climate change research and assessment[J]. *NATURE*, 2010, 463(7282): 747–756.
- [15] R Development Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing[M]. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2011.
- [16] Nelder J A, Wedderburn R W M. Generalized Linear Models[J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1972, 135(3): 370–384.
- [17] Hastie T, Tibshirani R. Generalized Additive Models[J]. *Statistical Science*, 1986, 1(3): 297–310.
- [18] Busby J R. BIOCLIM: a bioclimate analysis and prediction system. [J]. *Plant Protection Quarterly*, 1991, 6.
- [19] Friedman J H. Multivariate adaptive regression splines [J]. *The Annals of Statistics*, 1991, 19(1): 1–67.
- [20] Hastie T, Buja T A. Flexible Discriminant Analysis by Optimal Scoring[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1994, 89(428): 1255–1270.
- [21] Breiman L, Friedman J H, Olshen R A, *et al.* Classification and Regression Trees[M]. New York: Chapman and Hall, 1984.
- [22] Ridgeway G. The state of boosting[J]. *Computing Science and Statistics*, 1999, 31: 172–181.
- [23] Friedman J, Hastie T, Tibshirani R. Additive logistic regression: a statistical view of boosting (With discussion and a rejoinder by the authors)[J]. *The Annals of Statistics*, 2000, 28(2): 337–407.
- [24] Ripley B D. Pattern Recognition and Neural Networks [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 1–15.
- [25] Breiman L. Random Forests [J]. *Machine Learning*, 2001, 45(1): 5–32.
- [26] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3): 231–259.
- [27] Fielding A H, Bell J F. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models[J]. *Environmental Conservation*, 1997,

- 24(1):38–49.
- [28] Allouche O, Tsoar A, Kadmon R. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS)[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2006, 43(6):1223–1232.
- [29] 马波, 王小明, 刘晓庆, 等. 高原鼠兔洞穴数量与其栖息地植被分布格局的 GIS 分析[J]. *生物多样性*, 2011, 19(1):71–78.
- [30] Wang D, Sun R, Wang Z, *et al.* Effects of temperature and photoperiod on thermogenesis in plateau pikas (*Ochotona curzoniae*) and root voles (*Microtus oeconomus*)[J]. *Journal of comparative physiology B*, 1999, 169(1):77–83.
- [31] 卫万荣. 高原鼠兔栖息地、洞系特征及其功能的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [32] 王滔, 王小明, 王正寰. 高原鼠兔生境选择的初步研究[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2004, 41(4):1041–1045.
- [33] 卫万荣, 张灵菲, 杨国荣, 等. 高原鼠兔洞系特征及功能研究[J]. *草业学报*, 2013, 22(6):198–204.
- [34] 胡理乐, 张海英, 秦岭, 等. 中国五味子分布范围及气候变化影响预测[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(9):2445–2450.
- [35] 刘荣堂, 武晓东. 草地保护[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011:90–108.
- [36] 陈剑, 王忠全, 王勇, 等. 藏北草原高原鼠兔密度调查方法探讨[J]. *植物保护*, 2008(4):114–117.
- [37] 周晓琳, 安如, 陈跃红, 等. 三江源典型区鼠兔无人机遥感识别研究[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2018, 13(4):85–92.
- [38] 陈文业, 张瑾, 戚登臣, 等. 黄河首曲-玛曲县高寒草甸沙化动态演变趋势及其驱动因子定量分析[J]. *草业学报*, 2013, 22(2):11–21.
- [39] 汪沛, 罗锡文, 周志艳, 等. 基于微小型无人机的遥感信息获取关键技术综述[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(18):1–12.

Prediction of geographical distribution for plateau pikas and its potential response to climate change in Maqu

HUA Rui, ZHOU Rui, Baodaerhan, ZHANG Fei-yu, ZHOU Fu-fei,
TANG Zhuang-sheng, HUA Li-min

(College of Grassland Science, Gansu Agricultural University/Key Laboratory for Grassland Ecosystem of Education Ministry /Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province/Sino-U. S. Centers for Grazingland Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Plateau pika is a key species in the alpine rangeland ecosystem and plays an important role in maintaining rangeland biodiversity. The spatial distribution of plateau pika and its influence factors are important for understanding the causes of habitat selection, and the role of this species in the ecosystem. In this study, based on BIOMOD2 platform, with 90 species presence data and 27 climatic variables, the potential geographic distribution of plateau pika under the current conditions in Maqu was simulated with 10 species distribution model. The future distributions of plateau pika were also projected for the periods 2050s and 2070s under the climate change scenarios of RCP(Representative Concentration Pathways)2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 and RCP8.5 emission scenarios described. The results showed that: Random Forest (RF) was the best among the 10 models, Surface Range Envelop (SRE) was the worst; the wet season mean temperature (Bio8) was the most important factor in climate factors, which had the most significant impact on the habitat of plateau pika.

Key words: plateau pika; BIOMOD2; species distribution model; climate change