



研究论文 ORIGINAL PAPERS

气候变化影响下昌都市高原鼠兔
潜在地理分布及其驱动因素分析蔡志远¹, 刘永杰¹, 曲家鹏^{2*}, 张飞宇^{1*}(1. 国家林业和草原局西南调查规划院, 昆明 650031;
2. 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810008)

稿件运行过程

收稿日期: 2024-11-13
修回日期: 2025-01-31**关键词:** 高原鼠兔;
最大熵模型;
地理探测器模型;
潜在分布**Keywords:** Plateau pika (*Ochotona curzoniae*);
Maximum entropy model;
Geographical detector model;
Potential distribution

中图分类号: Q958.1

文献标志码: A

文章编号:

2310-1490(2025)-04-0734-11

DOI: 10.12375/ysdwxb.202411018

摘要

明确高原鼠兔(*Ochotona curzoniae*)的地理分布及其驱动因素,对于深入理解其在生态系统中的作用意义重大。本研究基于昌都市的高原鼠兔分布点数据与环境变量,使用最大熵模型与地理探测器模型相结合的方法,对当前和未来昌都市高原鼠兔在4种气候情景(当前、2050年3种共享社会经济路径SSP1-2.6、SSP2-4.5和SSP5-8.5)下的潜在分布进行预测。结果表明:平均气温日较差(Bio2)、等温性(Bio3)、最干月降水量(Bio14)和最冷季度降水量(Bio19)是影响昌都市高原鼠兔潜在分布的主要环境变量。在当前气候情景下,高原鼠兔的高适宜区、次适宜区及非适宜区面积分别为 2.59×10^4 、 3.48×10^4 、 4.92×10^4 km²。与当前气候情景相比,未来30年不同气候路径下的适宜区面积均发生变化,高适宜区预计由当前的 2.59×10^4 km²,分别变动到 2.84×10^4 km²(SSP1-2.6)、 6.67×10^4 km²(SSP2-4.5)和 3.88×10^4 km²(SSP5-8.5)。本研究结果可为昌都市高原鼠兔的野外普查、早期预警、科学监测及有效防控提供理论依据与实践参考。

Driving Factors and Potential Geographical
Distribution of Plateau Pika in Chamdo
City Under the Influence of Climate ChangeCAI Zhiyuan¹, LIU Yongjie¹, QU Jiapeng^{2*}, ZHANG Feiyu^{1*}(1. Southwest Survey and Planning Institute of National Forestry and
Grassland Administration, Kunming 650031, China;

基金项目: 国家林业和草原局行业科技项目(LC2022-002);国家自然科学基金面上项目(32471603)

第一作者简介: 蔡志远(1994—),男,硕士研究生;主要从事草原保护修复研究。E-mail: zhiyuancai2022@163.com

*通信作者: 曲家鹏, E-mail: jpqu@nwipb.cas.cn; 张飞宇, E-mail: zhangfeiyu_gsau@163.com

2. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China)

Abstract: Investigating the geographical distribution of the plateau pika (*Ochotona curzoniae*) and underlying driving factors is crucial for enhancing our understanding of its ecological role within the ecosystem. In this study, leveraging the distribution data of plateau pika in Chamdo City, and environmental variables, we employed a combined approach integrating the maximum entropy model and the geographical detector model. This was to forecast the potential distribution of plateau pika in Chamdo City, under four climate scenarios: the current scenario and three shared socioeconomic pathways (SSPs) in 2050, namely SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5. The findings indicated that the mean diurnal range (Bio2), isothermality (Bio3), precipitation of driest month (Bio14), and precipitation of coldest quarter (Bio19) were the primary environmental variables influencing the potential distribution of plateau pikas in Chamdo City. Under the current climate scenario, the areas of highly suitable area, sub-suitable area, and unsuitable area for plateau pika were 2.59×10^4 , 3.48×10^4 , and 4.92×10^4 km², respectively. When compared with the current climate scenario, the areas of suitable habitats for plateau pika would vary under different climate pathways in the next 30 years. Specifically, the highly suitable area was projected to change from the current 2.59×10^4 km² to 2.84×10^4 km² (SSP1-2.6), 6.67×10^4 km² (SSP2-4.5), and 3.88×10^4 km² (SSP5-8.5). The results of this research can offer a theoretical foundation and practical guidance for the field surveys, early warnings, scientific monitoring, and effective management of plateau pika in Chamdo City.

气候变化一直以来是人们关注的焦点,气候变化及其所引发的一系列环境问题,不但影响生态系统和生物多样性的平衡,而且对人类社会的可持续发展和人类健康也具有重要影响^[1]。因此,探究气候变化对自然生态系统和社会生态系统都具有重大意义。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)报告指出,预计全球变暖将持续,2011—2020年全球地表温度比1850—1900年升高了约1.1℃^[2]。气候变化主要表现为气温上升和降水增加,这会直接或间接地导致物种生存环境、地理分布范围、种群数量、种间关系乃至整个生态系统结构和功能等的改变^[3]。为此,学者们做了大量工作来揭示气候变化对区域和全球生态系统的影响^[4-5]。

物种分布模型(species distribution model, SDM),也被称为物种栖息地模型(species habitat model),该模型通过一定的算法运算,得出物种和环境因子之间的关系^[6]。近十几年来,随着数据算法的不断发展,众多研究者已经开发出数十种不同的物种分布模型,其应用领域和理论基础各异。其中,最大熵模型(maximum entropy model, MaxEnt)获得了学界的高度评价。该模型操作简单、仅需物种存在点数据、

对环境因子敏感性较低,即便在物种存在点较少的情况下也展现出强大的预测能力^[7-8]。正因如此,物种分布模型已被广泛应用于濒危物种保护、植物引种栽培、入侵生物风险评估及火灾和滑坡等自然灾害风险评估等领域^[9]。

地理探测器模型(geographic detector model, GDM)是度量空间分异性的工具,能定量不同因子及其交互作用,由因子探测器(factor detector)、交互探测器(interaction detector)、风险探测器(risk detector)和生态探测器(ecological detector)4部分组成^[10]。该方法运用空间分异理论,以“因子力(power of determinant)”为衡量指标,将GIS空间叠加技术与集合论结合,形成“地理探测器”模型,用于探测属性Y与其解释因子X之间的关系,从而有效地识别因变量与自变量之间的相关性^[10],已被广泛应用于植被种植、经济及医疗等方面的研究^[11-13]。将最大熵模型与地理探测器模型结合,能够综合评价气候变化与人类活动对物种潜在分布的影响,为物种的潜在适宜区评价和保护管理提供科学依据。

青藏高原是世界上海拔最高的地理地貌单元,同时也是生物多样性的重要保护地^[14],在维持气候稳定、生物多样性保护以及水资源供给等方面起着

重要的生态安全和稳定屏障作用^[15]。近年来,在气候变化和人类活动等因素的影响下,该区域部分高寒草甸草原退化严重^[16],主要表现为草地承载力下降、物种丰富度降低和毒杂草比例上升等^[17-18],而退化的草地成为高原鼠兔的理想栖息地,进而加剧了草地退化的程度^[19]。高原鼠兔(*Ochotona curzoniae*)是青藏高原生态系统中特有的小型哺乳动物之一^[20],当其种群密度过高时,频繁的挖掘洞穴等行为会对草地植被和土壤造成破坏,且对草地生产力也会造成不可估量的损失^[20]。此外,高原鼠兔还可能携带寄生虫,对当地公共卫生安全构成威胁^[21]。因此,明确高原鼠兔的空间分布格局及其主要驱动因子,对维护草地生态系统健康和公共卫生安全具有重要意义。基于此,本研究选取西藏自治区昌都市为研究区,利用最大熵模型对当前和未来高原鼠兔生境适宜性进行研究,同时利用地理探测器模型分析影响高原鼠兔潜在分布的关键驱动因子,以期为

青藏高原鼠兔的科学管理和草地生态保护提供理论参考和实践依据。

1 材料与方法

1.1 物种分布数据获取与处理

高原鼠兔分布数据来源于2024年6—9月的野外实地调查。采用地面样带法获得物种分布点,在昌都市境内累计布设192条样带,总长度约 3.38×10^3 km,调查面积约 6.76×10^2 km²(按样带两侧各100 m范围计算)。昌都市总面积109 830 km²,其中草原面积57 146 km²,该数据来源于中华人民共和国民政部全国行政区划信息查询平台(<http://xzqh.mca.gov.cn>)和《西藏自治区草地资源与生态》。通过GPS记录高原鼠兔出现点的经纬度,并剔除空间上过近的数据分布点以降低采样偏差,最终获得177个有效的高原鼠兔分布点用于建模(图1)。

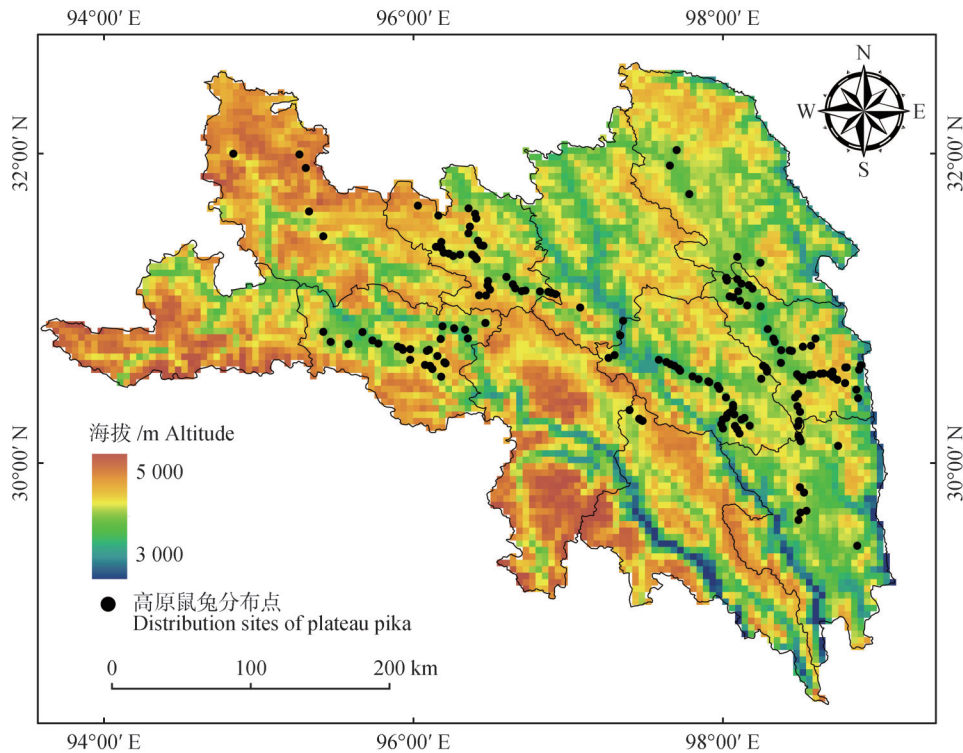


图1 昌都市高原鼠兔分布点

Figure 1 Distribution sites of plateau pika in Chamdo City

1.2 环境变量获取与处理

当前气候(1970—2000)和未来气候(2041—2060)情景的环境变量数据来自WorldClim数据库(<https://www.worldclim.org>),该数据库提供了反映

温度和降水特征的多项气候指标^[22]。未来气候数据选取“中等分辨率气候系统模式(BCC-CSM2-MR)”下的3种共享社会经济路径(shared socio-economic pathways, SSP),其中包括可持续路径(SSP1-2.6)、中

间路径(SSP2-4.5)和化石燃料为主的发展路径(SSP5-8.5)。海拔数据同样源自WorldClim。人类干扰因子来源于2016年由野生动物保护协会(Wildlife Conservation Society, WCS)和哥伦比亚大学国际地球科学信息网络中心(Center for International Earth Science Information Network, CIESIN)制作的人类足迹指数(human footprint index, Hfp)数据集^[23]。

所有环境变量数据统一重采样至2.5弧分分辨率(表1)。利用ArcMap软件掩膜提取至昌都市,最终将栅格数据转换为ASC格式。为降低环境变量间多重共线性影响,剔除相关性系数 $|r| > 0.8$ 的环境变量^[15],同时考虑变量对高海拔物种分布的生态学意义,最终选取Bio2、Bio3、Bio4、Bio7、Bio14、Bio15、Bio18、Bio19、Alt和Hfp进行分析。

表1 用于高原鼠兔潜在地理分布建模的环境变量

Table 1 Environmental variables used for modeling the potential geographic distribution of the plateau pika

环境变量 Environmental variable	描述 Description	环境变量 Environmental variable	描述 Description
Bio1	年平均气温 Annual mean temperature	Bio12	年降水量 Annual precipitation
Bio2	平均气温日较差 Mean diurnal range	Bio13	最湿月降水量 Precipitation of wettest month
Bio3	等温性 Isothermality	Bio14	最干月降水量 Precipitation of driest month
Bio4	气温季节性 Temperature seasonality	Bio15	降水量季节性 Precipitation seasonality
Bio5	最热月最高温度 Max temperature of warmest month	Bio16	最湿季度降水量 Precipitation of wettest quarter
Bio6	最冷月最低温度 Min temperature of coldest month	Bio17	最干季度降水量 Precipitation of driest quarter
Bio7	气温年较差 Temperature annual range	Bio18	最暖季度降水量 Precipitation of warmest quarter
Bio8	最湿季度平均温度 Mean temperature of wettest quarter	Bio19	最冷季度降水量 Precipitation of coldest quarter
Bio9	最干季度平均温度 Mean temperature of driest quarter	Alt	海拔 Altitude
Bio10	最暖季度平均温度 Mean temperature of warmest quarter	Hfp	人类足迹指数 Human footprint index
Bio11	最冷季度平均温度 Mean temperature of coldest quarter		

1.3 最大熵模型评估和优化

最大熵模型在默认设置下可能存在偏差^[24],因此,通过调整特征组合(feature classes, FC)和正则化乘数(regularized multiplier, RM)来优化模型。特征组合包括线性(linear, L)、二次型(quadratic, Q)、乘积型(product, P)、阈值型(threshold, T)和片段化(hinger, H)5种形式;正则化乘数设置为0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0八个水平^[25]。利用R软件ENMeval包通过赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC)得到最佳模型^[24],当 $\Delta A_{ic} \leq 2$ 时为最优模型。本研究得到最优模型,其参数FC和RM分别为LQH和3.5。

将高原鼠兔分布点数据与环境变量导入最大熵模型,75%的数据分布点被用作训练集,其余点被用作测试集,重复运行20次^[26]。在调整FC和RM后,开始运行模型。

利用受试者工作曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)验证模型的准确性,该曲线下面积(area under curve, AUC)的取值范围一般为0.500~1.000, AUC值越接近1.000,预测结果准确性越高^[27]。

将最大熵模型输出的ASC结果文件导入至ArcGIS,利用重分类工具定义物种潜在分布区的适宜概率阈值 P ^[27]。 $0 \leq P < 0.10$ 为非适宜区, $0.10 \leq P < 0.40$ 为次适宜区, $0.40 \leq P < 1.00$ 为高适宜区。计算各个潜在适宜区的面积及其占研究区总面积的比例^[15]。

1.4 基于地理探测器模型对高原鼠兔生境适宜性影响因素的量化分析

采用地理探测器模型中的因子探测器和交互探测器,对高原鼠兔生境适宜性的影响因素进行量化分析。利用ArcGIS中的空间分析工具将连续型环

境因子 X 按自然断点法进行离散化处理,再输入至地理探测器模型。基于统计量结果 q ,分析各个环境因子 X 对高原鼠兔分布区 Y 的解释力^[10]。单因子探测公式为

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}。$$

式中: $h=1,2,\dots,L$ 为变量 Y 或 X 的分类或分区; N_h 和 N 分别为层 h 和总区域内的单元数量; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和总区域内 Y 的方差。空间分异用 q 度量, q 值阈为 $[0,1]$, q 越大,说明解释因子 X 对因变量 Y 的影响越大。

交互探测器用于识别不同影响因子之间的交互作用,即评估两个因子共同作用时是否会增加或减弱对 Y 的解释力。两因子间的关系有 5 种,分别为双因子增强、非线性增强、相互独立、非线性减弱和单因子非线性减弱^[10]。

2 结果与分析

2.1 最大熵模型评估

模型预测结果的 ROC 曲线如图 2 所示,其平均 AUC 值为 0.807,精度良好,表明模型结果可用于适宜区预测。

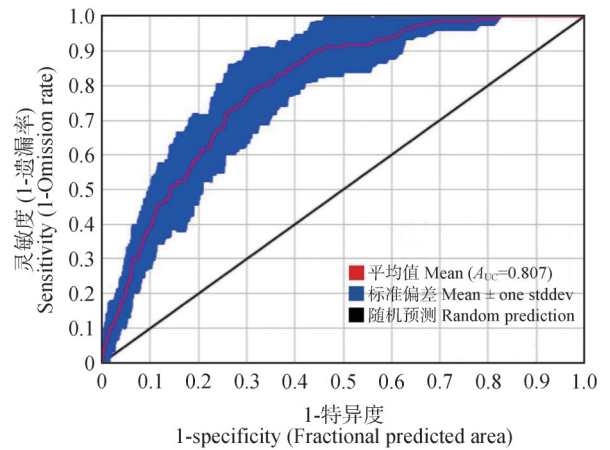


图2 最大熵模型模拟结果的 ROC 曲线

Figure 2 The ROC curve of the simulation results of the MaxEnt

2.2 当前昌都市高原鼠兔的潜在分布特征

当前,昌都市高原鼠兔的高适宜区在各县区均有分布,高适宜区面积为 $2.59 \times 10^4 \text{ km}^2$,占昌都市土地面积的 23.6%,次适宜区面积为 $3.48 \times 10^4 \text{ km}^2$,而非适宜区面积为 $4.92 \times 10^4 \text{ km}^2$,占比为 44.7%。从行政区划来看,高适宜区面积最大的是察雅县,为 $5.58 \times 10^3 \text{ km}^2$;其次是贡觉县,为 $4.68 \times 10^3 \text{ km}^2$;边坝县高适宜区面积最小,为 $4.64 \times 10^2 \text{ km}^2$ 。次适宜区面积最大的是卡若区,为 $6.01 \times 10^3 \text{ km}^2$;其次是江达县,为 $5.26 \times 10^3 \text{ km}^2$ (图 3,表 2)。

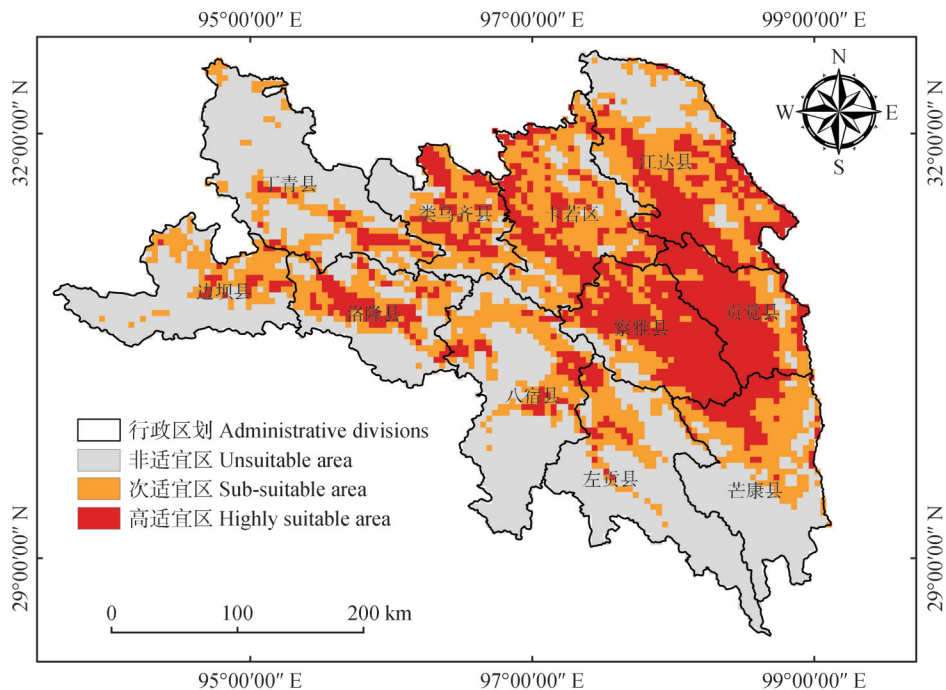


图3 当前昌都市高原鼠兔潜在适宜区分布

Figure 3 Current distribution of potential suitable areas of plateau pika in Chamdo City

表2 昌都市各县(区)高原鼠兔当前适宜区面积

Table 2 The current suitable area for plateau pika in each county (district) of Chamdo City

km²

行政区划 Administrative divisions	非适宜区 Unsuitable area		次适宜区 Sub-suitable area		高适宜区 Highly suitable area	
	面积 /km ²	占比 /%	面积 /km ²	占比 /%	面积 /km ²	占比 /%
	Area	Percentage	Area	Percentage	Area	Percentage
八宿县 Baxoi County	8.08×10 ³	65.51	3.21×10 ³	26.02	1.04×10 ³	8.47
边坝县 Banbar County	5.87×10 ³	66.81	2.45×10 ³	27.91	4.64×10 ²	5.29
察雅县 Chagyab County	6.51×10 ²	7.88	2.03×10 ³	24.55	5.58×10 ³	67.57
丁青县 Dengqen County	8.78×10 ³	70.99	2.79×10 ³	22.53	8.02×10 ²	6.48
贡觉县 Gonjo County	2.76×10 ²	4.36	1.36×10 ³	21.51	4.68×10 ³	74.13
江达县 Jomda County	3.40×10 ³	25.86	5.26×10 ³	39.97	4.49×10 ³	34.16
卡若区 Karuo District	1.56×10 ³	14.43	6.01×10 ³	55.69	3.23×10 ³	29.88
类乌齐县 Riwoqê County	1.88×10 ³	29.63	2.84×10 ³	44.73	1.63×10 ³	25.64
洛隆县 Lhorong County	3.68×10 ³	45.70	2.75×10 ³	34.16	1.62×10 ³	20.14
芒康县 Markam County	6.06×10 ³	52.34	3.76×10 ³	32.47	1.76×10 ³	15.19
左贡县 Zogang County	8.95×10 ³	75.59	2.31×10 ³	19.53	5.78×10 ²	4.88
总计 Total	4.92×10 ⁴		3.48×10 ⁴		2.59×10 ⁴	

2.3 昌都市高原鼠兔生境适宜性影响因素分析

最大熵模型分析显示, Bio14和Bio2是影响高原鼠兔潜在分布的关键环境变量,二者相对贡献率分别为26.5%和25.4%;其后是Bio3和Bio19,二者累计贡献率为31.6%;其余环境变量的贡献率均低于

10.0%(图4A)。基于正则化训练增益的刀切法检验进一步显示, Bio19、Bio2、Bio3和Bio14对高原鼠兔分布预测结果影响较大, Hfp、Alt的影响次之,其余环境变量影响较小(图4B)。

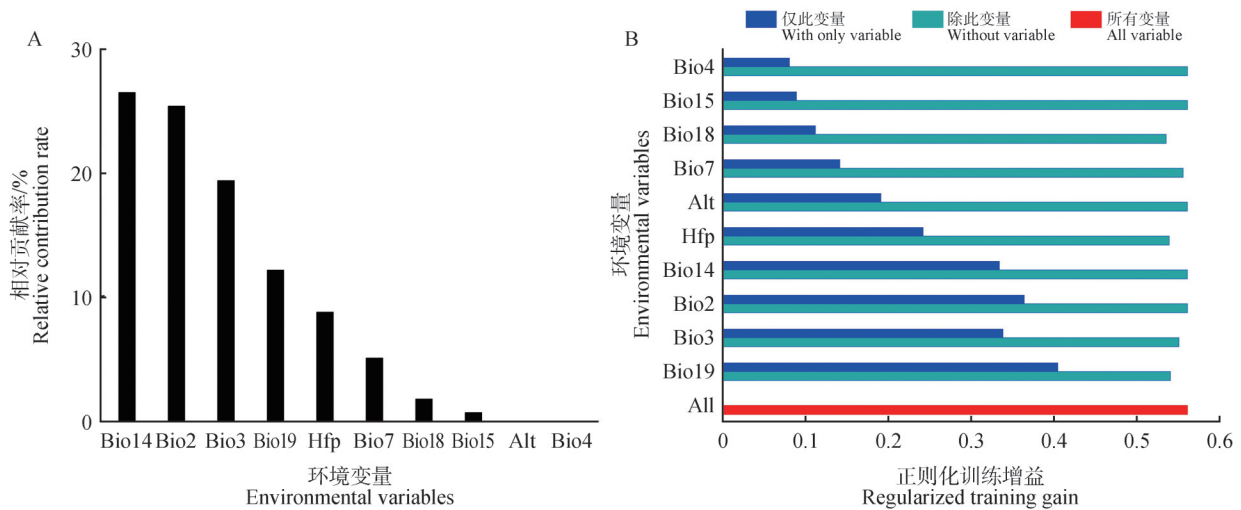


图4 环境变量贡献率(A)与重要性排序(B)

Figure 4 Contribution rates (A) and importance ranking (B) of environmental variables

地理探测器因子分析结果表明,除Bio5和Bio7外,其余8个环境变量均通过显著性检验(P < 0.05)。各因子对高原鼠兔分布的解释力(q值)从高到低排序依次为 Bio2、Bio3、Bio14、Bio19、Bio18、Alt、Bio4、

Hfp、Bio7和Bio15。在全部表征生境特征的环境变量中,前5个因子分别为 Bio2、Bio3、Bio14、Bio19、Bio18, q 分别为 0.601 2、0.540 3、0.485 1、0.447 8和0.378 6(图5)。

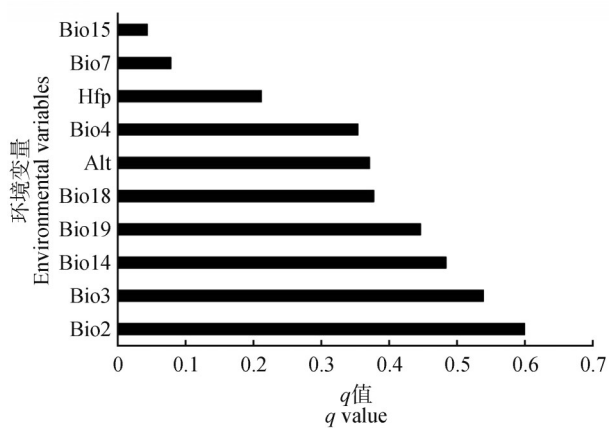


图5 环境变量解释力

Figure 5 Explanatory power of the environmental variables

综合最大熵模型与地理探测器分析结果, Bio2、Bio3、Bio14 和 Bio19 是影响昌都市高原鼠兔分布格局的主要环境因子。

交互探测器分析结果表明, Bio2 和 Hfp 的交互作用最强($q = 0.7518$)。此外, 多组变量交互作用较强, 其中 Bio2 与 Bio14($q = 0.7320$)、Bio3 与 Hfp($q = 0.7318$)以及 Bio3 与 Bio15($q = 0.7385$)的交互解释力均显著高于其单因子作用(表3)。这些结果说明, 各环境因子并非独立影响高原鼠兔的分布, 而是通过复杂的协同效应共同决定其生境适宜性。

表3 环境变量的交互作用

Table 3 Interactions of the environmental variables

环境变量 Environmental variable	Bio2	Bio3	Bio4	Bio7	Bio14	Bio15	Bio18	Bio19	Alt	Hfp
Bio2	0.6012									
Bio3	0.6486	0.5403								
Bio4	0.6648	0.5603	0.3556							
Bio7	0.6509	0.5999	0.5454	0.0798						
Bio14	0.7320	0.6364	0.5350	0.6445	0.4851					
Bio15	0.6964	0.7385	0.5011	0.2088	0.5505	0.0450				
Bio18	0.6522	0.5570	0.4719	0.5276	0.5255	0.4659	0.3786			
Bio19	0.7237	0.6830	0.5528	0.5258	0.5745	0.4862	0.5649	0.4478		
Alt	0.7213	0.6655	0.5216	0.5189	0.5057	0.4325	0.4799	0.5081	0.3725	
Hfp	0.7518	0.7318	0.5812	0.3370	0.6679	0.3630	0.5848	0.5808	0.5495	0.2133

2.4 未来气候情景下高原鼠兔的分布格局变化

相比当前气候情景, 在未来30年(2041—2060)的不同路径下, 昌都市高原鼠兔适宜区面积呈现不同的变化趋势。其中, 在SSP1-2.6路径下, 高适宜区面积增至 $2.84 \times 10^4 \text{ km}^2$, 而次适宜区面积缩减至 $1.92 \times 10^4 \text{ km}^2$; 在SSP2-4.5路径下, 高适宜区面积大幅增加至 $6.67 \times 10^4 \text{ km}^2$, 较当前气候情景增加了 $4.08 \times 10^4 \text{ km}^2$; 在SSP5-8.5路径下, 总适宜区(高适宜区面积+次适宜区面积)面积增加 $6.17 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。在未来3种路径下, 高适宜区均集中在中部和东部, 如卡若区、察雅县、贡觉县、江达县和芒康县, 其中芒康县中北部和西北部、江达县北部、丁青县北部以及边坝县西北部是高适宜区的主要增长区域(图6, 表4)。

3 讨论

最大熵模型和地理探测器模型结果表明, 平均气温日较差(Bio2)、等温性(Bio3)、最干月降水量(Bio14)和最冷季度降水量(Bio19)是影响昌都市高原鼠兔潜在分布的主要环境变量, 表明温度和降水是驱动高原鼠兔潜在分布的重要因子。Zhou *et al.*^[28]在高原鼠兔活动与环境因子关系的研究中发现, 适度降水能够有效减弱高温给高原鼠兔带来的不利影响, 从而增加其活动量, 而当降水量过大时, 可能会影响其采食, 导致其营养不良甚至死亡^[29]。此外, 降水增加会提高植物群落高度和盖度, 进而改变高原鼠兔生境结构, 对高原鼠兔生存构成潜在压力^[15]。温度对高原鼠兔生境的选择也有重要影响。研究发

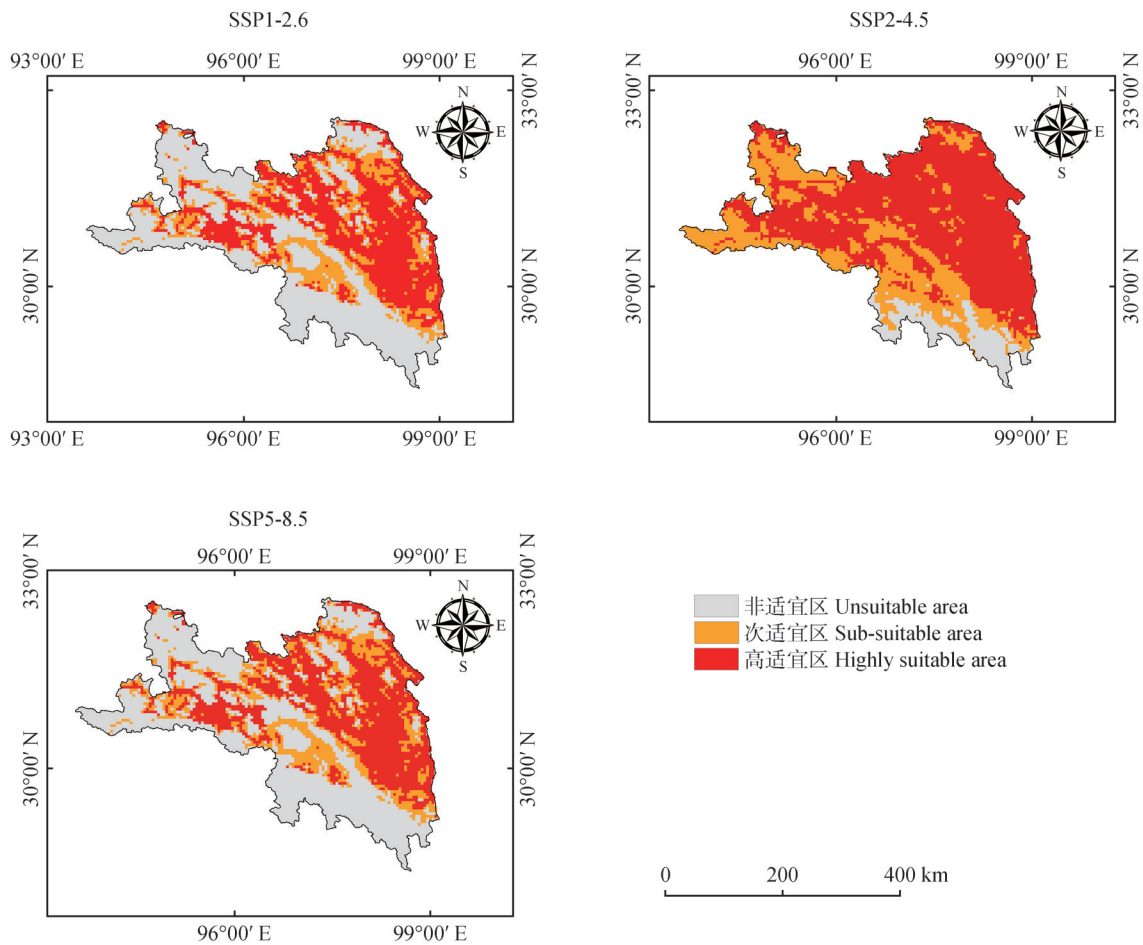


图6 未来不同气候情景下高原鼠兔的适宜区分布

Figure 6 Distribution of suitable areas of plateau pika under different climate scenarios in the future

表4 未来不同气候情景下高原鼠兔的适宜区面积

Table 4 Suitable grades area of plateau pika under different climate scenarios in the future

km²

气候情景 Climate scenario	非适宜区 Unsuitable area	次适宜区 Sub-suitable area	高适宜区 Highly suitable area
当前 Current	4.92×10 ⁴	3.48×10 ⁴	2.59×10 ⁴
SSP1-2.6	6.22×10 ⁴	1.92×10 ⁴	2.84×10 ⁴
SSP2-4.5	9.16×10 ³	3.40×10 ⁴	6.67×10 ⁴
SSP5-8.5	4.82×10 ⁴	2.29×10 ⁴	3.88×10 ⁴

现,高原鼠兔对温度较为敏感,高温会迫使其减少洞穴外活动时间,以避免热应激导致的死亡风险^[30],而在适合温度范围内,高原鼠兔能够调节自身体温,适应高原恶劣的气候环境。

本研究结果表明,与当前气候情景相比,未来不同气候情景下昌都市高原鼠兔的适宜生境面积将呈现不同的变化趋势。未来气候变暖,当地原有植被群落结构和丰富度可能发生改变^[31],从而影响高原鼠兔食物资源分布和可获得性,最终导致其适宜区

和非适宜区面积发生变化。

SSP1-2.6、SSP2-4.5和SSP5-8.5三种共享社会经济路径分别对应逐步增强的全球温室气体排放情景。本研究显示,当气候持续变暖时,高原鼠兔适宜区面积呈现先增加后降低的趋势,这可能是适宜区温度升高超出了其耐受范围,导致部分原有适宜区转为不适宜^[32]。此外,温室气体浓度的上升会直接引起温度升高和降水格局改变,进而影响植被物候及气候敏感物种的分布。在这些因素的影响下,高

原鼠兔的生理和行为适应能力、食物资源分布以及种间关系也随之发生变化,进而导致其适宜区面积发生变化^[15]。作为青藏高原的关键种,高原鼠兔分布广泛,高密度种群可通过挖掘和采食活动形成大量裸斑,加剧草地退化,因此有必要实施科学防控^[33]。但是在实际的治理过程中,存在治理过度等问题,如大规模人工捕杀和广泛投撒毒饵,可能导致非靶标生物被误杀或误食中毒^[15]。此外,高原鼠兔携带多种寄生虫,而开展疫源调查工作将花费大量的人力和物力。因此,利用物种分布模型结合地理信息技术,不仅可以有效评估当前和未来高原鼠兔的潜在分布,还可按照危害程度进行划区管理^[15]。本研究将当前和未来气候情景下昌都市高原鼠兔的适宜区划分为非适宜区、次适宜区和高适宜区,分别对应差异化的管理措施。在当前气候情景下,昌都市中东部高适宜区(如察雅县、江达县、贡觉县和芒康县)可采取应急化学防控和人工捕杀控制其危害范围;当前次适宜区(如江达县、卡若区、类乌齐县和洛隆县等斑块集中区域)则宜采用生物防治或不育控制^[34-35]。在未来气候情景下,高原鼠兔高适宜区的面积可能有所增加。因此,在未来的防控工作中要更加关注高原鼠兔适宜区面积扩张的区域。建议首先在不同适宜区之间进行生态阻隔,遏制其向非适宜区扩散^[36];其次,应重点监测左贡县中北部、八宿县中北部及芒康县南部等适宜区边缘地带的种群密度,防止其形成新的危害区域;此外,在未来高适宜区,特别是芒康县中北部和西北部、江达县北部、丁青县北部以及边坝县西北部等新增区域,需提前加强种群密度的监测,制定前瞻性防控预案。

本研究在环境变量筛选过程中,不仅考虑了环境变量间的相关性,更充分顾及了各变量对高原鼠兔的实际生态学意义。物种的分布往往受多个环境因子的独立驱动,若仅依据统计相关性剔除变量,可能导致模型中遗漏关键的限制因子。这会导致模型对物种生态需求的理解出现偏差^[37]。本研究中,Bio2和Bio3之间高度相关,但二者均被保留在模型中。这是因为Bio2直接影响高原鼠兔的体温调节能力,而Bio3则反映了环境温度的稳定性,进而影响物候、繁殖周期和长期适应性。同样,尽管Alt和Bio1存在关联,但考虑到高原鼠兔作为典型高海拔物种,其生理、生态和行为特征均是在高海拔环境中长期演化形成的。Alt本身即是限制其分布的关键因子,

因为它决定了与温度、降水和辐射等因子相关的食物资源的时空分布^[38]。其生态解释力可能超越单一的Bio1。此外,Bio18直接锁定植物的生长季节,充足的降水意味着植被茂盛,特别是在春夏两季^[39],为高原鼠兔提供了丰富的食物来源,提高了其幼崽的成活率,是其种群增长和生存的关键生态环境驱动因子;而Bio19直接指向的是冬季高原鼠兔的生存问题,一方面降雪形成了天然的隔热层,使雪下温度高于地表,从而使物种能够在冬季和早春期间抵御严寒^[39];另一方面覆盖的积雪也可以很好地减少个体在低温环境下进行体温调节所需的能量消耗^[39],从而提升越冬存活率。

本研究的预测结果可为昌都市高原鼠兔的野外普查与综合治理提供科学依据。模型预测结果在一定程度上优化了调查范围,弥补了传统普查手段的局限性,建议在当前和未来的高适宜区及尚未充分调查的次适宜区优先部署防控措施。然而,现有物种分布数据的不足可能使预测模型产生偏差,未来仍需收集更全面的高原鼠兔的分布数据,才能建立更加精确的预测模型。同时,影响高原鼠兔分布的环境变量不仅有气候、地形和人类活动等因子,还有土地利用类型、植被覆盖状况和局部微环境等多重因素^[15]。因此,未来的研究仍需更加全面的环境因子和分布数据来优化模型,以便更好地预测种群分布格局。

4 结论

本研究综合运用最大熵模型和地理探测器,识别并预测了昌都市高原鼠兔的适宜区域,明确了影响其生境适宜性的主要环境变量为Bio2、Bio3、Bio14和Bio19。在当前气候情景下,高原鼠兔的适宜区主要集中在察雅县和贡觉县等东部县区;而在未来气候情景下,其高适宜区将向昌都市东部、北部和西部扩展。据此,建议重点关注该区域高原鼠兔的种群密度,并根据适宜区变动趋势及时调整监测范围和防控措施。本研究结果可为昌都市高原鼠兔的野外调查、早期预警及精准防控提供科学依据。

参考文献:

- [1] 黄存瑞,刘起勇. IPCC AR6 报告解读:气候变化与人类健康[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(4): 442-451.
HUANG C R, LIU Q Y. Interpretation of IPCC AR6 on climate

- change and human health [J]. *Climate Change Research*, 2022, 18(4): 442-451.
- [2] IPCC. Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability: Working group II contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2023.
- [3] MCLAUGHLIN J F, HELLMANN J J, BOGGS C L, *et al.* Climate change hastens population extinctions [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2002, 99(9): 6070-6074.
- [4] 刘晓彤, 袁泉, 倪健. 中国植物分布模拟研究现状 [J]. *植物生态学报*, 2019, 43(4): 273-283.
LIU X T, YUAN Q, NI J. Research advances in modelling plant species distribution in China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2019, 43(4): 273-283.
- [5] BRADTER U, JOHNSTON A, HOCHACHKA W M, *et al.* Decomposing the spatial and temporal effects of climate on bird populations in northern European mountains [J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(21): 6209-6227.
- [6] ELITH J, LEATHWICK J R. Species distribution models: Ecological explanation and prediction across space and time [J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2009, 40: 677-697.
- [7] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [8] HILL N J, TOBIN A J, RESIDE A E, *et al.* Dynamic habitat suitability modelling reveals rapid poleward distribution shift in a mobile apex predator [J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(3): 1086-1096.
- [9] 吴艳, 王洪峰, 穆立蕃. 物种分布模型的研究进展与展望 [J]. *高师理科学刊*, 2022, 42(5): 66-70.
WU Y, WANG H F, MU L Q. Research progress and prospect of species distribution models [J]. *Journal of Science of Teachers' College and University*, 2022, 42(5): 66-70.
- [10] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望 [J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [11] LI X W, XIE Y F, WANG J F, *et al.* Influence of planting patterns on fluoroquinolone residues in the soil of an intensive vegetable cultivation area in northern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 458/459/460: 63-69.
- [12] 朱鹤, 刘家门, 陶慧, 等. 北京城市休闲商务区的时空分布特征与成因 [J]. *地理学报*, 2015, 70(8): 1215-1228.
ZHU H, LIU J M, TAO H, *et al.* Temporal-spatial pattern and contributing factors of urban RBDs in Beijing [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(8): 1215-1228.
- [13] 赵雪雁, 王晓琪, 刘江华, 等. 基于不同尺度的中国优质医疗资源区域差异研究 [J]. *经济地理*, 2020, 40(7): 22-31.
ZHAO X Y, WANG X Q, LIU J H, *et al.* Regional differences of quality medical resources in China based on different scales [J]. *Economic Geography*, 2020, 40(7): 22-31.
- [14] 宋刚, 屈延华. 青藏高原隆升与环境变化驱动鸟类的遗传分化与物种形成 [J]. *遗传*, 2025, 47(1): 133-145.
SONG G, QU Y H. Environmental changes and uplift of the Qinghai-Tibet Plateau drive genetic diversification and speciation of the birds [J]. *Hereditas (Beijing)*, 2025, 47(1): 133-145.
- [15] WANG Z C, DENG Y N, KANG Y K, *et al.* Impacts of climate change and human activities on three Glires pests of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Pest Management Science*, 2024, 80(10): 5233-5243.
- [16] 孙建, 张振超, 董世魁. 青藏高原高寒草地生态系统的适应性管理 [J]. *草业科学*, 2019, 36(4): 933-938.
SUN J, ZHANG Z C, DONG S K. Adaptive management of alpine grassland ecosystems over Tibetan Plateau [J]. *Pratacultural Science*, 2019, 36(4): 933-938.
- [17] 李祎, 李亚晓, 元雯雯, 等. 全球草地退化的成因、修复技术及恢复效果评估研究进展 [J]. *中国草地学报*, 2024, 46(11): 110-129.
LI Y, LI Y X, QI W W, *et al.* Review of causes, restoration techniques, and effectiveness evaluation of global grassland degradation [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(11): 110-129.
- [18] 何秋霞, 张莽莽, 陈德炜, 等. 若尔盖高寒退化草地高原鼠兔防控生态经济阈值初探 [J]. *四川农业大学学报*, 2024, 42(1): 159-165.
HE Q X, ZHANG Q Q, CHEN D W, *et al.* Preliminary study on ecological-economic threshold of rodent control in Zoige alpine degraded grassland [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2024, 42(1): 159-165.
- [19] 杨振宇, 江小蕾. 高原鼠兔对草地植被的危害及防治阈值研究 [J]. *草业科学*, 2002, 19(4): 63-65.
YANG Z Y, JIANG X L. The harm of plateau pika on grassland vegetation and its control threshold value [J]. *Pratacultural Science*, 2002, 19(4): 63-65.
- [20] 潘璇, 米玛旺堆. 高原鼠兔生态学研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2016, 35(9): 2537-2543.
PAN X, MIGMAR WANG-DWEI. Plateau pika ecology: A review [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(9): 2537-2543.
- [21] 杜雪梅, 钟维, 唐天才, 等. 四川省石渠县高原鼠兔棘球蚴感染情况调查 [J]. *中国兽医杂志*, 2019, 55(2): 68-70.
DU X M, ZHONG W, TANG T C, *et al.* Investigation on *Echinococcus* infection of plateau pikas in Shiqu County, Sichuan Province [J]. *Chinese Journal of Veterinary Medicine*, 2019, 55(2): 68-70.
- [22] FICK S E, HIJMANS R J. WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas [J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(12): 4302-4315.
- [23] VENTER O, SANDERSON E W, MAGRACH A, *et al.* Global terrestrial human footprint maps for 1993 and 2009 [J]. *Sci-*

- tific Data, 2016, 3: 160067.
- [24] LIDDLE A R. Information criteria for astrophysical model selection[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 2007, 377: L74-L78.
- [25] MUSCARELLA R, GALANTE P J, SOLEY-GUARDIA M, *et al.* ENMeval: An R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for MaxEnt ecological niche models [J]. Methods in Ecology and Evolution, 2014, 5(11): 1198-1205.
- [26] TANNER E P, ELMORE R D, FUHLENDORF S D, *et al.* Extreme climatic events constrain space use and survival of a ground-nesting bird [J]. Global Change Biology, 2017, 23(5): 1832-1846.
- [27] 王志成, 王艳, 康宇坤, 等. 青藏高原喜马拉雅旱獭潜在分布区对气候变化的响应 [J]. 草原与草坪, 2025, 45(3): 168-178.
- WANG Z C, WANG Y, KANG Y K, *et al.* Potential distribution area of Himalayan marmots in the Qinghai-Tibetan Plateau to climate change [J]. Grassland and Turf, 2025, 45(3): 168-178.
- [28] ZHOU R, HUA R, TANG Z S, *et al.* Daily and seasonal activity patterns of plateau pikas (*Ochotona curzoniae*) on the Qinghai-Tibet Plateau, China, and their relationship with weather condition [J]. Animals, 2023, 13(10): 1689.
- [29] 杨丽艳, 宋梅玲, 王玉琴, 等. 青海省果洛州高原鼠兔宜生区分布及其对气候变化的响应 [J]. 草地学报, 2024, 32(6): 1902-1912.
- YANG L Y, SONG M L, WANG Y Q, *et al.* The distribution of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) in Guoluo Prefecture, Qinghai Province and its response to climate change [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(6): 1902-1912.
- [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] 曹晓云, 周秉荣, 周华坤, 等. 气候变化对青藏高原植被生态系统的影响研究进展 [J]. 干旱气象, 2022, 40(6): 1068-1080.
- CAO X Y, ZHOU B R, ZHOU H K, *et al.* Research progress on the impact of climate change on vegetation ecosystem in the Tibetan Plateau [J]. Journal of Arid Meteorology, 2022, 40(6): 1068-1080.
- [32] QU J P, LIU M, YANG M, *et al.* Effects of fertility control in plateau pikas (*Ochotona curzoniae*) on diversity of native birds on Tibetan Plateau[J]. 兽类学报, 2015, 35(2): 164-169.
- QU J P, LIU M, YANG M, *et al.* Effects of fertility control in plateau pikas (*Ochotona curzoniae*) on diversity of native birds on Tibetan Plateau[J]. Acta Theriologica Sinica, 2015, 35(2): 164-169.
- [33] LI W J, KNOPS J M H, ZHOU X, *et al.* Anchoring grassland sustainability with a nature-based small burrowing mammal control strategy [J]. Journal of Animal Ecology, 2023, 92(7): 1345-1356.
- [34] QU J P, LIU M, YANG M, *et al.* Effects of fertility control in plateau pikas (*Ochotona curzoniae*) on diversity of native birds on Tibetan Plateau[J]. 兽类学报, 2015, 35(2): 164-169.
- QU J P, LIU M, YANG M, *et al.* Effects of fertility control in plateau pikas (*Ochotona curzoniae*) on diversity of native birds on Tibetan Plateau[J]. Acta Theriologica Sinica, 2015, 35(2): 164-169.
- [35] HARRIS R B, ZHOU J K, JI Y Q, *et al.* Evidence that the Tibetan fox is an obligate predator of the plateau pika: Conservation implications [J]. Journal of Mammalogy, 2014, 95(6): 1207-1221.
- [36] ZHANG C J, KANG Y K, YAO B H, *et al.* Increased availability of preferred food and decreased foraging costs from degraded grasslands lead to rodent pests in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2022, 10: 971429.
- [37] DORMANN C F, ELITH J, BACHER S, *et al.* Collinearity: A review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance[J]. Ecography, 2013, 36(1): 27-46.
- [38] ZHANG J J, JIANG F, LI G Y, *et al.* The four antelope species on the Qinghai-Tibet Plateau face habitat loss and redistribution to higher latitudes under climate change [J]. Ecological Indicators, 2021, 123:107337.
- [39] MORRISON S F, HIK D S. Demographic analysis of a declining pika *Ochotona collaris* population: Linking survival to broad-scale climate patterns via spring snowmelt patterns [J]. Journal of Animal Ecology, 2007, 76:899-907.