DOI: 10.5846/stxb202103050603

陈俊达, 姚志诚, 石锐, 高惠, 刘振生.基于 MAXENT 模型的贺兰山西坡啮齿动物生境适宜性评价.生态学报,2022,42(10):4209-4216.
Chen J D, Yao Z C,Shi R,Gao H,Liu Z S.Habitat suitability assessment of rodents on the west slope of the Helan Mountain based on MAXENT model.Acta Ecologica Sinica,2022,42(10):4209-4216.

基于 MAXENT 模型的贺兰山西坡啮齿动物生境适宜性评价

陈俊达[1],姚志诚[2],石 锐[3],高 惠[4],刘振生[1,5,*]

1 东北林业大学野生动物与自然保护地学院,哈尔滨 150040

2 淄博市林业保护发展中心,淄博 255020

3 黑龙江民族职业学院,哈尔滨 150040

4 青岛农业大学动物科技学院,青岛 266109

5 国家林业和草原局野生动物保护学重点实验室,哈尔滨 150040

摘要:贺兰山因其拥有独特的植物垂直分布带而十分适宜啮齿动物生存,但自保护区生态恢复以来并未见有研究评价啮齿动物在贺兰山的生境适宜性,使得其分布现状未知。使用 GIS 技术和 MAXENT 模型对内蒙古贺兰山国家级自然保护区 6 种主要啮齿动物进行生境适宜性状况评价及预测,探究啮齿动物在贺兰山的分布现状。结果表明:影响 6 种啮齿动物的主要环境因子为海拔、坡度和距矿区距离,海拔越高、坡度越大及距矿区距离越近均使啮齿动物生存适宜性降低;两两鼠种生境适宜面积叠加发现,大林姬鼠和阿拉善黄鼠适宜生境重叠面积最大(261.37 km^2),短尾仓鼠和子午沙鼠的适宜生境重叠面积最小(19.00 km^2);6 种主要鼠种均适宜的生境面积交集仅有 17.14 km^2,占贺兰山总面积的 0.47%,6 种主要鼠种均不适宜的生境面积有 2985.23 km^2,占贺兰山总面积的 81.21%。研究表明,啮齿动物栖息地距矿区距离仍是影响其适宜生境的重要因素之一,建议相关部门加强对废弃矿区采取措施,改善保护区啮齿动物生境质量。

关键词:啮齿动物;MAXENT 模型;生境;适宜性评价;贺兰山

Habitat suitability assessment of rodents on the west slope of the Helan Mountain based on MAXENT model

CHEN Junda[1], YAO Zhicheng[2],SHI Rui[3],GAO Hui[4],LIU Zhensheng[1,5,*]

1 *College of Wildlife and Protected Area, Northeast Forestry University, Harbin* 150040, *China*

2 *Zibo Center of Forestry Protection and Development, Zibo* 255020, *China*

3 *Heilongjiang Vocational College For Nationalities, Harbin* 150040, *China*

4 *College of Animal Science and Technology, Qingdao Agricultural University, Qingdao* 266109, *China*

5 *Key Laboratory of Conservation Biology, National Forestry and Grassland Administration, Harbin* 150040, *China*

Abstract: Helan Mountain is very suitable for rodents to survive because of its unique vertical distribution zone of plants. However, since the ecological restoration of the protected area, no research has been seen to evaluate the habitat suitability of rodents in Helan Mountain, making its distribution status unknown. Evaluation of species' habitat suitability is an important part of wildlife research. In recent years, more and more models and technologies including the continuous development of Geographic Information System (GIS) have been applied to the study of habitat suitability. We investigated six different species in the west slope of Helan Mountain in order to research the habitat suitability of the rodents by GIS and

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31870512, 32071649, 32070519);中央高校基本科研业务费资助项目(2572014CA03)

收稿日期:2021-03-05; **网络出版日期**:2022-01-11

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhenshengliu@163.com

MAXENT model. The results showed that the main environmental factors that affected rodents were altitude, slope and distance from the mining area. Habitats with high altitude was not suitable for rodents to survive. We found that the largest overlapping area of suitable habitats of each was dedicated by *Apodemus peninsulae* and *Spermophilus alashanicus* (261.37 km^2), and the smallest one was *Allocricetulus eversmanni* and *Meriones meridianus* (19.00 km^2). The intersection area which was suitable for all six species was only 17.14 km^2, occupying 0.47% of the region of Helan Mountain; on the country, the unsuitable habitat that all six species was 2985.23 km^2 (accounting for 81.21% of the total area of Helan Mountain). According to the research, the distance from habitats to a mining area is still one of the most important environmental factors affecting the rodents' suitable habitats. It is recommended to continue to implement measures such as restricting mining areas and advocating residents around the reserve to promote the quality of rodents' habitats in the Helan Mountain.

Key Words: rodents; MAXENT; habitat; suitability assessment; Helan Mountain

生境是动物个体、种群和群落完成生命过程的空间[1]。良好的生活条件可以促进动物大量繁殖,形成高密度种群,这样的生境则为适宜生境;反之,动物可以生活和繁殖但不能形成较高密度的生境则为可居住生境或不适宜生境[2]。对野生动物的生境适宜性评价可以分析研究区域内动物与环境因子之间的联系,探究适合物种生存的分布区域,明确其生境特征和潜在地理分布区,了解生存需求,为有关部门对野生动物进行生态管理提供可靠依据,影响其生存发展。

内蒙古贺兰山国家级自然保护区位于贺兰山西坡区域,阿拉善左旗境内[3],分布 6 种主要啮齿动物,其中优势种 2 种:阿拉善黄鼠(*Spermophilus alashanicus*)、大林姬鼠(*Apodemus peninsulae*);普通种 4 种:灰仓鼠(*Cricetulus migratorius*)、短尾仓鼠(*Allocricetulus eversmanni*),子午沙鼠(*Meriones meridianus*)和社鼠(*Niviventer confucianus*)[4]。贺兰山独特的地势地貌,植被带垂直分布差异明显,为啮齿动物群落结构和分布提供良好条件。石锐等对贺兰山西坡啮齿动物群落多样性、消化道形态及环境因子展开大量研究[4—6]。对于啮齿动物在宁夏的区系研究最初在 1985 年展开,但因在贺兰山的调查难度大、植被复杂多样等原因未能顺利进行。自贺兰山保护区成立以来,保护区植被恢复良好,垂直分布带差异显著,十分适合各啮齿动物在不同植被带分布,由于目前没有对啮齿动物在贺兰山的种群动态及种间竞争等方面的研究,使其生境适宜性评价成为空缺。本研究结合野外实地调查与最大熵(MAXENT)模型对啮齿动物在贺兰山的生境适宜性进行评价,为贺兰山生物资源保护、区域性鼠害预测、预报及治理提供科学依据。

早在 20 世纪 70 年起就有对野生动物生境适宜性评价的研究,近年来随着 3S 技术的不断发展,越来越多的模型和技术投入应用于生境适宜性评价中,对野生动物在大尺度上进行生境研究成为热点[7]。钟雪等[8]使用最大熵模型(MAXENT)在白水河国家级自然保护区对藏酋猴进行生境适宜性评价,表明白水河保护区为这一珍稀灵长类动物提供优质生存条件。高惠等[9]运用 MAXENT 模型对岩羊在贺兰山地区进行生境适宜性研究,说明了岩羊在贺兰山东、西坡分布差异性及人为干扰因素对岩羊种群造成的影响。朱宇静等[10]利用 MAXENT 模型结合 ArcGIS 对川金丝猴进行栖息地评价,说明了川金丝猴偏好生境,调整白河国家级自然保护区现有功能区划,改善川金丝猴栖息地质量。除以上研究外,更多研究利用 MAXENT 模型对野生动物进行生境适宜性评价预测,并得出相关影响物种的主要生境因子,对野生动物保护管理提出重要建议,研究准确度高且效果显著。

本研究利用贺兰山西坡 6 种啮齿动物的出现点及收集到的环境因子数据,运用 GIS 技术和 MAXENT 模型预测了啮齿动物在整个贺兰山的潜在适宜性生境分布,明确了影响啮齿动物分布格局的环境因子,进而分析啮齿动物在贺兰山受人为干扰的程度,为贺兰山啮齿动物研究打下基础。

1　研究方法

1.1　研究区概况

研究地区为贺兰山国家级自然保护区。贺兰山位于银川平原与阿拉善高原之间,坐落于宁夏回族自治区与内蒙古自治区交界处[11]。地理坐标处于 N38°21′—39°22′, E105°49′—106°42′, 山脉海拔 2000—3500 m(主峰敖包疙瘩海拔 3556 m),处于北温带草原向荒漠过渡地带,属于阴山山系,是一条非常重要的自然地理分界线[12]。贺兰山具有典型的大陆性气候特征,全年干旱少雨,年平均降雨量 200—400 mm,年平均蒸发量 2000 mm,年均无霜期 170 d[13]。贺兰山以山脊为界共分为两部分:贺兰山东坡,贺兰山西坡,分别为宁夏贺兰山国家级自然保护区和内蒙古自治区贺兰山国家级自然保护区[14](图 1)。

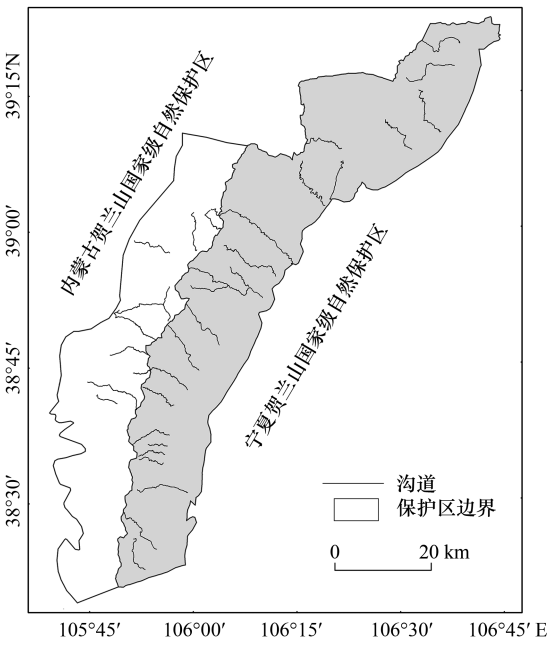

图 1　研究区域示意图

Fig.1　Study area in He1an Mountain National Nature Reserve, China

1.2　研究模型

研究利用 MAXENT 模型对啮齿动物在贺兰山的生境适宜性进行评价。MAXENT 模型可以在明确某一物种分布地理位置的基础上,将周围区域的环境因子作为限制物种分布的条件,建立两者关系,得出在此条件下最大熵分布,从而推测物种的适宜分布区域[15—16]。MAXENT 模型只需物种少量“出现点”即可得到较精确的数据,并自动生成 ROC 曲线进行预测自检[17—18],因此广泛应用于物种生境适宜性评价中。常见的物种生境评价研究尺度较大[19],而 MAXENT 模型是应用物种出现坐标点及环境因子数据预测该物种潜在生境分布[20],相较于机理模型和回归模型,生态位模型所需数据更精确,可信度更高[21]。

1.3　数据采集

2013 至 2014 年,在贺兰山西坡选取 8 条典型沟道,分 4 个季节采用铗日调查法,用 GPS 对啮齿动物出现点进行定位,并记录动物名称、周围环境因子等。筛选出 6 种啮齿动物共 183 个地理坐标点,分别为阿拉善黄鼠 52 个、大林姬鼠 46 个、灰仓鼠 25 个、短尾仓鼠 24 个、子午沙鼠 18 个、社鼠 18 个。

环境因子数据主要分为地形因子、植被因子、其他数据 3 个部分。地形因子包括海拔、坡向和坡度,从国际科学数据服务平台网站(http://datamirror.csdb.cn)下载分辨率 30 m×30 m 的数字高程模型(Digital Elevation Model,DEM)图获得。植被因子分为灌丛、草地、荒漠、针叶林、阔叶林和高山草甸 6 种类型,利用 ERDAS 软件下载 2017 年贺兰山卫星遥感影像(由宁夏贺兰山国家级自然保护区提供)获取贺兰山植被分布图。其他环境因子包括距护林点距离、距道路距离、距矿区距离和距水源距离等,提取自贺兰山矢量化电子地图(1:50000)。

统一环境因子图层边界和坐标点像元大小(30 m×30 m),将坐标点转换成 MAXENT 3.4.1 软件要求的 csv 格式文件,将环境因子数据转化成 ASCII 格式文件,导入 ArcGIS 10.5 中。

1.4　模拟方法

提取 75%的啮齿动物出现坐标点进行建模,剩余 25%坐标点用于验证,并用刀切法(Jackknife)检验各环境因子的重要性,输出结果为 Logistic 格式。(图 2)模型预测结果采用受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve,ROC 曲线)[22]进行检验。评价标准为:ROC 曲线与横坐标所围面积(AUC 值)在 0.5—0.6

为失败;0.6—0.7 为较差;0.7—0.8 为一般;0.8—0.9 为良好;0.9—1.0 为优秀[23]。利用最大约登指数将啮齿动物生境适宜图划分为适宜和不适宜两个等级,分别得到贺兰山区域 6 种啮齿动物生境适宜性分布等级图。

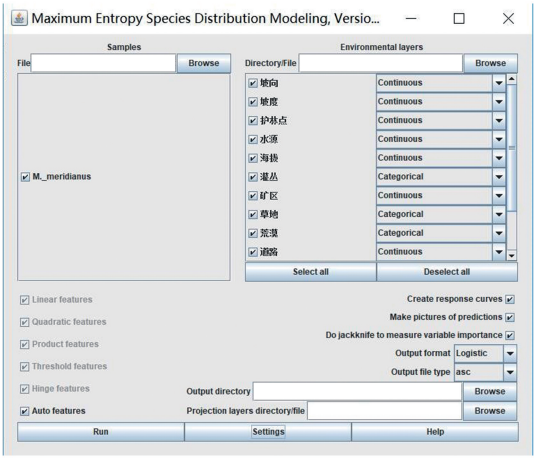

图 2 MAXENT 软件运行

Fig.2 Running the model of MAXENT

2 研究结果

2.1 MAXENT 预测结果检测

6 种啮齿动物 ROC 曲线结果显示,各物种训练集与验证集 AUC 值分别为:阿拉善黄鼠(0.990,0.931);大林姬鼠(0.984,0.950);短尾仓鼠(0.996,0.988);灰仓鼠(0.995,0.983);社鼠(0.977,0.945);子午沙鼠(0.971,0.967),表明 MAXENT 结果均为优秀,所建模型可用于 6 种鼠种生境适宜性评价。其中以敏感度为纵坐标,特异性为横坐标表示(图 3)。

2.2 啮齿动物分布与环境因子的关系

利用刀切法,分析影响 6 种啮齿动物生境选择的 13 个环境因子的重要性,分别得出对 6 种鼠种影响累积贡献率,从大到小排列各环境因子,前 3—5 个环境因子之和刚好大于 80%的即为重要环境因子。如影响阿拉善黄鼠的主要环境因子有海拔、坡度、据矿区距离和距水源距离,其他环境因子百分比之和不足 20%,由此得出各鼠种影响力次之的环境因子(表 1)。

表 1 各鼠种与重要环境因子关系

Table 1 Relationship between the important environmental factors and each species

鼠种 Species	海拔 Altitude/%	坡度 Sloe/%	距矿区距离 Distance from mining area/%	距灌丛距离 Distance from shrubs/%	距草地距离 Distance from grass/%	距护林点距离 Distance from buildings/%	距水源距离 Distance from water source/%
阿拉善黄鼠 *Spermophilus alashanicus*	27.50	23.90	24.80				10.30
大林姬鼠 *Apodemus peninsulae*	44.30	24.80	13.30				
短尾仓鼠 *Allocricetulus eversmanni*	36.50	26.60	10.70	13.30			
灰仓鼠 *Cricetulus migratorius*	40.40	25.50	8.40	13.90			
社鼠 *Niviventer confucianus*	47.50	13.60	12.20	10.30			
子午沙鼠 *Meriones meridianus*	10.50	19.50	27.50		20.50	13.40	

2.3 啮齿动物生境适宜性分布

根据 MAXENT 模型中的最大约登指数,分别找到 6 种啮齿动物的最佳中断点(阿拉善黄鼠:0.167;大林姬鼠:0.094;短尾仓鼠:0.393;灰仓鼠:0.272;社鼠:0.142;子午沙鼠:0.512),并划分生境适宜性类别,“0”为不适宜,“1”为适宜。将输出文件 ASCII 导入 ArcGIS 10.5 中,计算各鼠种生境的适宜面积,分别得到各鼠种生境适宜性评价图(图 4)及各鼠种生境适宜面积评价表(表 2)。

其中,阿拉善黄鼠和大林姬鼠分布海拔范围最广(1400—2800 m),子午沙鼠偏低(1400—2300 m),短尾仓鼠、灰仓鼠、社鼠偏高(1700—2800 m),但均未见在海拔 2800 m 以上有分布;各鼠种适宜坡度均在 0—40°之间。

2.4 贺兰山 6 种啮齿动物生境重叠评价

在 ArcGIS 10.5 中两两加权叠加 6 鼠种生境适宜图,结果显示:大林姬鼠和阿拉善黄鼠重叠的适宜生境面积最大(261.37 km^2);短尾仓鼠和子午沙鼠重叠的适宜生境面积最小(19.00 km^2);大林姬鼠和社鼠重叠的适

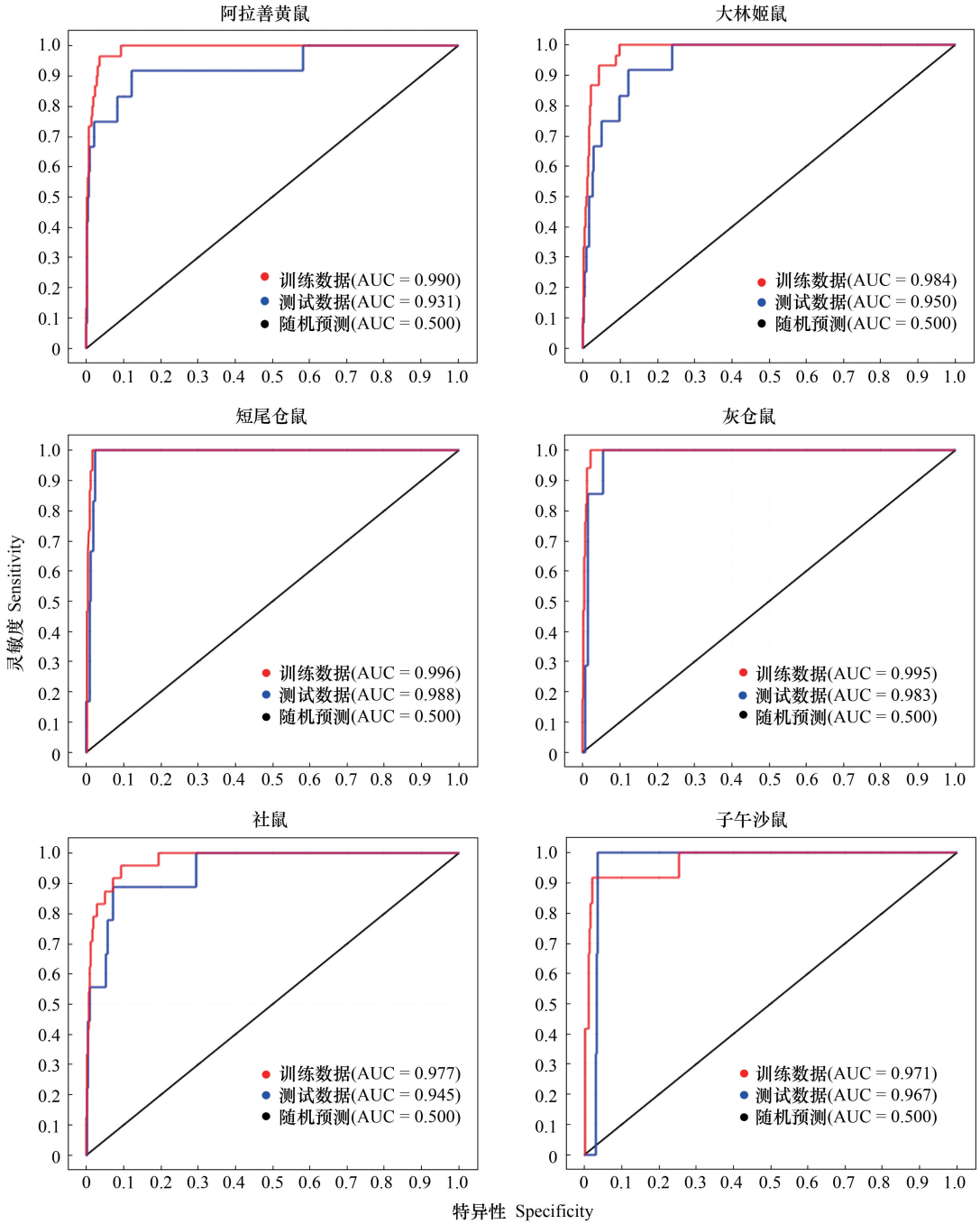

图 3　各鼠种 ROC 曲线验证结果

Fig.3　ROC curve verification of the each species

ROC: 受试者工作特征曲线; AUC: 曲线下面积

宜生境面积为 248.80 km^2;大林姬鼠和灰仓鼠重叠的适宜生境面积为 175.92 km^2。阿拉善黄鼠和社鼠、灰仓鼠的适宜生境重叠面积也较大,均为 160.00 km^2左右(表 3)。

将 6 鼠种生境适宜图在 ArcGIS 10.5 中加权叠加(图 5),统计生境重叠面积(表 4)。在贺兰山区域内的 6 种啮齿动物中,各鼠种适宜生境面积并集大小为 252.74 km^2;各鼠种适应生境面积交集仅有 17.14 km^2,占贺兰山总面积的 0.47%。6 种啮齿动物均不适宜的生境面积为 2985.23 km^2,占贺兰山总面积 81.21%。

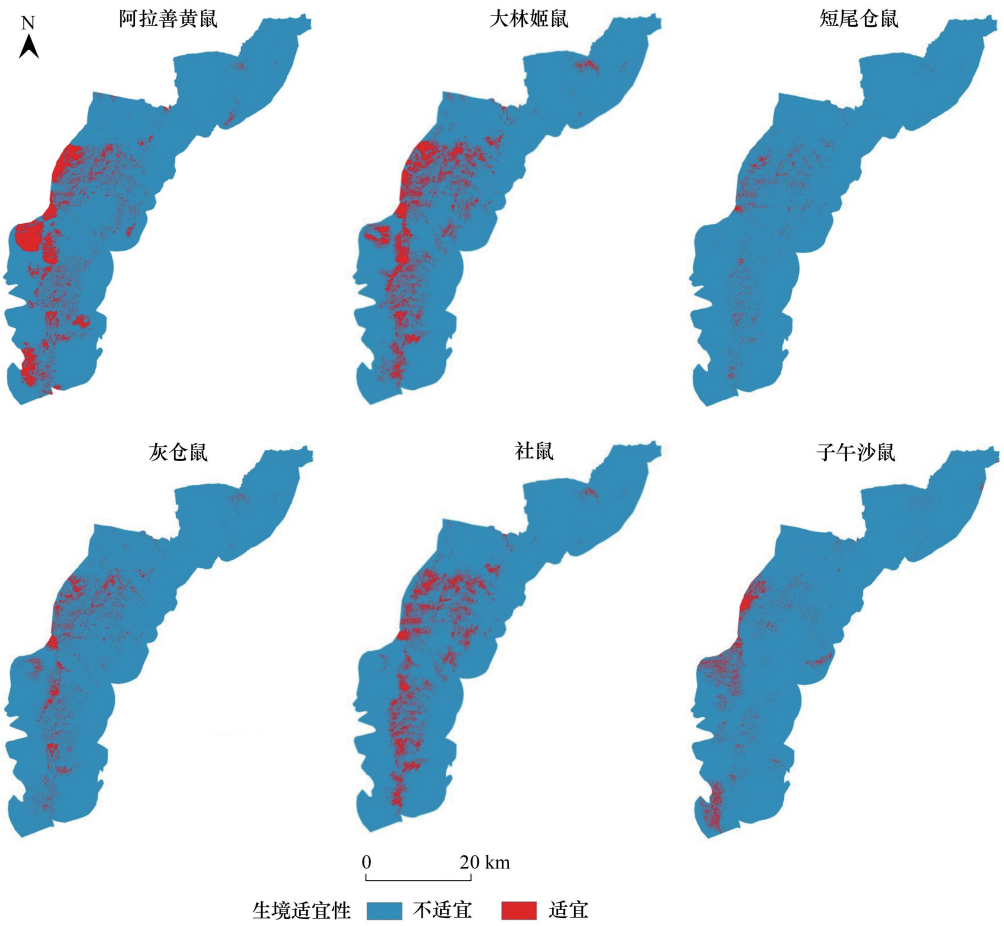

图 4 各鼠种生境适宜性评价图

Fig.4 Evaluation map of habitat suitability of each species

表 2 各鼠种生境适宜面积统计

Table 2 Statistics of suitable habitat areas for each species

鼠种 Species	适宜生境面积 Suitable habitat area/km^2	适宜生境占总面积百分比 Percentage of suitable habitat area to total area/%	不适宜生境面积 Unsuitable habitat area/km^2
阿拉善黄鼠 *Spermophilus alashanicus*	418.71	11.39	3257.26
大林姬鼠 *Apodemus peninsulae*	432.2	11.76	3243.76
短尾仓鼠 *Allocricetulus eversmanni*	80.32	2.19	3595.64
灰仓鼠 *Cricetulus migratorius*	189.64	5.16	3486.32
社鼠 *Niviventer confucianus*	321.48	8.75	3354.48
子午沙鼠 *Meriones meridianus*	162.39	4.42	3513.57

表 3 各鼠种间重叠生境面积统计/km^2

Table 3 Suitable habitat overlapping area of each species

种类 Species	短尾仓鼠	子午沙鼠	大林姬鼠	灰仓鼠	阿拉善黄鼠
短尾仓鼠 *Allocricetulus eversmanni*					
子午沙鼠 *Meriones meridianus*	19.00				
大林姬鼠 *Apodemus peninsulae*	77.35	74.97			
灰仓鼠 *Cricetulus migratorius*	70.68	57.34	175.92		
阿拉善黄鼠 *Spermophilus alashanicus*	69.33	128.52	261.37	160.71	
社鼠 *Niviventer confucianus*	72.25	35.14	248.80	126.41	161.65

表 4　6 种鼠种适宜生境重叠面积/km^2

Table 4　Overlapping area of suitable habitat of all species

代号 Code	面积 Area	代号 Code	面积 Area	代号 Code	面积 Area
0	2985.2262	3	88.5114	6	17.1369
1	252.7353	4	72.3375		
2	201.9258	5	58.0887		

代码 0—6 含义为:0:非适宜生境;1:6 种啮齿动物生境并集面积;2:任意 2 种啮齿动物生境重叠面积;3:任意 3 种啮齿动物生境重叠面积;4:任意 4 种啮齿动物生境重叠面积;5:任意 5 种啮齿动物生境重叠面积;6:6 种啮齿动物生境交集面积

3　讨论

本研究在宏生境尺度下,利用 MAXENT 模型探究环境因子对啮齿动物在整个贺兰山分布的影响[24]。除直接观察自然生境因子外,本研究加入人为干扰因素评价,如距护林点距离和距矿区距离等。通过结果也可印证,自然因素与人为干扰因素共同影响啮齿动物在贺兰山地区的分布格局。从结果上看,各鼠种 AUC 值均为优秀,影响 6 种啮齿动物的环境因子主要为海拔,坡度。此外,人为干扰对啮齿动物分布仍产生重要影响,如距矿区距离。近年来保护区内矿区虽已废弃,但由于开采所造成的环境破坏依然存在,并影响着啮齿动物在贺兰山的分布。

从各鼠种分布海拔上看,较高海拔(2800—3500m)没有鼠种分布,说明贺兰山高海拔地区不适宜大多数啮齿动物生存;从坡度上看,贺兰山东坡比西坡更加陡峭,由于坡度作为影响啮齿动物分布的重要因素之一,坡度越大啮齿动物分布越少;自保护区成立以来矿区陆续撤离保护区,但贺兰山东坡矿区面积始终远大于西坡,这可能也说明了啮齿动物在贺兰山西坡的分布面积明显大于东坡的原因。

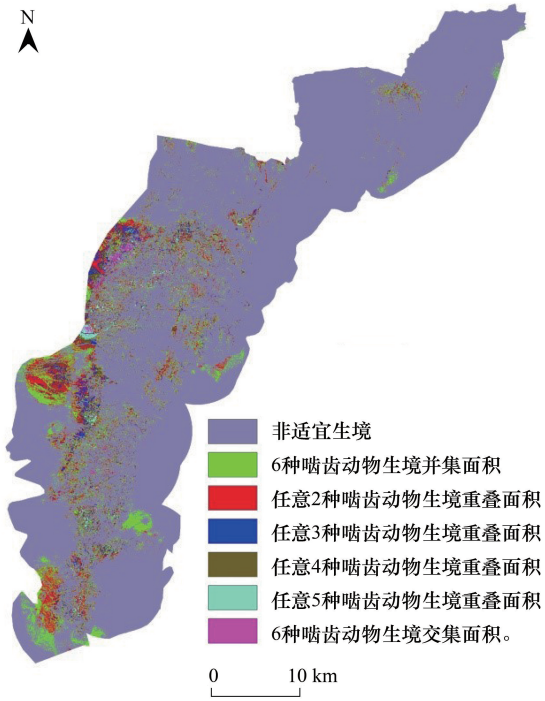

图 5　6 鼠种适宜生境重叠图

Fig.5　Suitable habitat overlapping area of all species

同域物种的生境研究,对于认识物种共存、竞争关系具有重要意义[25]。Widick 等利用 MAXENT 模型对更格卢鼠(*Dipodomys Spectabilis*)进行景观、气候变量的预测,将加州地松鼠(*Ground Squirt*)作为模拟竞争对手,探究生态位重叠面积变化[26]。Trinidad 等利用 MAXENT 模型结合环境因子分析巴塔哥尼亚 14 种棉鼠的潜在分布模型[27]。苏军虎等采用 MAXENT 模型及可持续生境模型预测了高原鼢鼠在 2050 年适宜生境面积及草地退化程度变化[28]。本研究通过加权叠加生境适宜图,揭示啮齿动物在贺兰山的分布格局。两个鼠种适宜生境重叠面积越大,表明两鼠种对生境需求越相似,那么这两个鼠种间竞争关系也越明显。大林姬鼠和阿拉善黄鼠适宜生境重叠面积最大(261.37 km^2),占阿拉善黄鼠在贺兰山适宜生境的 62.42%,占大林姬鼠在贺兰山适宜生境的 60.47%,由于二者的适宜生境分布格局相似,存在生存竞争。然而,基于刀切法分析结果,两鼠种主要生境因子相同(海拔、坡度和距矿区距离),但阿拉善黄鼠海拔分布范围(1300 m 以上)要更广于大林姬鼠(1 500 m);坡度方面,阿拉善黄鼠最适坡度(0—30°)与大林姬鼠最适坡度(0—40°)也存在差异,这些差异可能就是阿拉善黄鼠和大林姬鼠在适宜生境大面积重叠的情况下仍能稳定共存的原因之一[29—31]。

通过对贺兰山 6 种啮齿动物的生境适宜面积分析表明,6 鼠种均不适宜生境面积占贺兰山总面积的 81.21%,表明贺兰山大部分区域没有啮齿动物分布,虽其地理地貌满足啮齿动物的生存需求但从研究结果看

啮齿动物群落并未在贺兰山广泛分布。自保护区建立以来,随管理力度的加强,采取了如限制放牧等一系列保护措施,使得生境得以恢复[32]。从本研究结果来看,矿区依然是影响啮齿动物生境适宜性的重要环境因子之一。保护区应继续针对矿产业出台相应措施,加强保护区周围居民宣传教育工作,以对啮齿动物在贺兰山区域生境适宜性发展有积极作用。

参考文献(References):

[1] Grinnell J. Field tests of theories concerning distributional control. The American Naturalist, 1917, 51(602): 115-128.

[2] 甘肃农业大学. 草原保护学(第一分册)草原啮齿动物学. 北京: 农业出版社, 1984.

[3] 牛达生. 贺兰山概况及其在西夏以前的情况. 宁夏史志, 2005, (3): 37-40.

[4] 石锐, 李宗智, 高惠, 庞博, 燕永彬, 滕丽微, 刘振生. 内蒙古贺兰山啮齿动物群落多样性及其与环境因子关系. 兽类学报, 2019, 39(6): 651-661.

[5] 石锐, 张致荣, 高惠, 李俊乐, 庞博, 燕永彬, 滕丽微, 刘振生. 内蒙古贺兰山啮齿动物种类组成及海拔梯度分布研究. 野生动物学报, 2019, 40(2): 273-278.

[6] 石锐, 刘鹏, 滕丽微, 庞博, 燕永彬, 刘振生. 贺兰山西坡啮齿动物消化道形态比较研究. 野生动物学报, 2019, 40(3): 617-621.

[7] 徐卫华, 欧阳志云, 李宇, 刘建国. 基于遥感和 GIS 的秦岭山系大熊猫生境评价. 遥感技术与应用, 2006, 21(3): 238-242.

[8] 钟雪, 王彬, 胡大明. 基于 MaxEnt 模型的藏酋猴生境适宜性评价——以四川白水河国家级自然保护区为例. 西华师范大学学报: 自然科学版, 2020, 41(3): 227-234.

[9] 高惠. 贺兰山岩羊生境适宜性评价研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.

[10] 朱宇静, 李沂韦, 俞丹莉, 孙治宇, 金贵祥, 夏万才, 黎大勇. 基于 MaxEnt 模型的川金丝猴栖息地评价——以白河国家级自然保护区为例. 普洱学院学报, 2020, 36(6): 1-4.

[11] 孙嘉, 赵唱, 孟德怀, 米书慧, 李宗智, 滕丽微, 刘振生. 贺兰山马麝冬季生境选择. 野生动物学报, 2020, 41(3): 573-579.

[12] 王小明. 宁夏贺兰山国家级自然保护区综合科学考察. 银川: 阳光出版社, 2011.

[13] 刘振生, 李新庆, 王小明, 李志刚, 胡天华, 翟昊. 贺兰山岩羊(*Pseudois nayaur*)集群特征的季节变化. 生态学报, 2009, 29(6): 2782-2788.

[14] 骆颖. 贺兰山岩羊(*Pseudois nayaur*)和马鹿(*Cervus elaphus alxaicus*)的食性及生境选择比较研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.

[15] Phillips S J, Dudík M, Schapire R E. A maximum entropy approach to species distribution modeling//Proceedings of the Twenty-first International Conference on Machine Learning. Banff: Association for Computing Machinery, 2004: 83-83.

[16] 邢丁亮, 郝占庆. 最大熵原理及其在生态学研究中的应用. 生物多样性, 2011, 19(3): 295-302.

[17] Stachura-Skierczyńska K, Tumiel T, Skierczynski M. Habitat prediction model for three-toed woodpecker and its implications for the conservation of biologically valuable forests. Forest Ecology and Management, 2009, 258(5): 697-703.

[18] Haegeman B, Etienne R S. Entropy maximization and the spatial distribution of species. The American Naturalist, 2010, 175(4): E74-E90.

[19] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. Science, 1988, 240(4857): 1285-1293.

[20] Leshowitz B. Comparison of ROC curves from one-and two-interval rating-scale procedures. The Journal of the Acoustical Society of America, 1969, 46(2B): 399-402.

[21] 杨维康.《3S 技术与中国野生动物生境评价》出版. 兽类学报, 2012, 32(1): 47-47.

[22] Soberón J. Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species. Ecology Letters, 2007, 10(12): 1115-1123.

[23] 刘振生, 高惠, 滕丽微, 苏云, 王晓勤, 孔芳毅. 基于 MAXENT 模型的贺兰山岩羊生境适宜性评价. 生态学报, 2013, 33(22): 7243-7249.

[24] Johnson D H. The comparison of usage and availability measurements for evaluating resource preference. Ecology, 1980, 61(1): 65-71.

[25] 徐雨, 王彬, 窦亮, 冉江洪, 刘世荣, 岳汉秋, 杨柳, 宗建伟, 李彦娇, 李八斤. 三种同域高山鸡形目鸟类的生境选择. 四川动物, 2017, 36(3): 258-265.

[26] Widick I V, Bean W T. Evaluating current and future range limits of an endangered, keystone rodent (*Dipodomys ingens*). Diversity and Distributions, 2019, 25(7): 1074-1087.

[27] Barlett T R, Martin G M, Laguna M F, Abramson G, Monjeau A. Climatic constraints and the distribution of Patagonian mice. Journal of Mammalogy, 2019, 100(6): 1979-1991.

[28] Su J H, Aryal A, Nan Z B, Ji W H. Climate change-induced range expansion of a subterranean rodent: implications for rangeland management in Qinghai-Tibetan Plateau. PLoS One, 2015, 10(9): e0138969.

[29] Qi D W, Hu Y B, Gu X D, Li M, Wei F W. Ecological niche modeling of the sympatric giant and red pandas on a mountain-range scale. Biodiversity and Conservation, 2009, 18(8): 2127-2141.

[30] Steinmetz R, Garshelis D L, Chutipong W, Seuaturien N. The shared preference niche of sympatric asiatic black bears and sun bears in a tropical forest mosaic. PLoS One, 2011, 6(1): e14509.

[31] 和梅香, 陈俪心, 罗概, 古晓东, 王戈, 冉江洪. 凉山山系大熊猫和黑熊适宜生境预测及重叠分析. 生物多样性, 2018, 26(11): 1180-1189.

[32] 王小明, 刘振生, 李新庆, 李志刚. 贺兰山雄性岩羊种群两个时期生命表的比较. 动物学研究, 2005, 26(5): 467-472.