

DOI: 10.5846/stxb202109152593

金苗, 姚志诚, 石锐, 白云峰, 高惠, 滕丽微, 刘振生. 贺兰山西坡啮齿动物生境选择及种间关系. 生态学报, 2022, 42(18): 7676-7684.

Jin M, Yao Z C, Shi R, Bai Y F, Gao H, Teng L W, Liu Z S. Habitat selection and interspecific relationship of rodent in the west slope of Helan Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(18): 7676-7684.

贺兰山西坡啮齿动物生境选择及种间关系

金 苗¹, 姚志诚², 石 锐³, 白云峰⁴, 高 惠⁵, 滕丽微^{1,6}, 刘振生^{1,6,*}

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 桓仁满族自治县自然资源事务服务中心, 本溪 117000

5 青岛农业大学动物科技学院, 青岛 266109

6 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:为明确对贺兰山西坡啮齿动物生境选择起关键作用的主要环境因子,探讨各鼠种之间的相互作用如何影响鼠种的生境选择,选取地理因子(海拔、坡度、坡向)、植被因子(植被盖度、植被高度、灌木/乔木高度)和其他因子(距水源距离、距道路距离、距灌木/乔木距离)等 9 种生境因子,利用资源选择函数模型和 logistic 回归模型对啮齿动物生境选择和种间关系进行分析。结果表明,在贺兰山西坡,捕获数量最多的 6 种啮齿动物对的生境选择存在差异,大林姬鼠(*Apodemus peninsulae*)偏好高海拔、多灌木(乔木)的生境;子午沙鼠(*Meriones meridianus*)偏好海拔较低的半荒漠稀疏生境,对道路和人为干扰不回避;灰仓鼠(*Cricetulus migratorius*)偏好距水源较远、多灌木(乔木)、距道路较近的生境;阿拉善黄鼠(*Spermophilus alaschanicus*)偏好低海拔、植被丰富的生境;短尾仓鼠(*Cricetulus eversmanni*)偏好高海拔、距道路较近的生境;社鼠(*Niviventer niviventer*)偏好海拔较高、坡度较大、距水源较远的生境。鼠种间的相互关系主要呈现回避或随机关系。研究结果有助于了解啮齿动物分布的变化及种群动态规律,可为贺兰山生物资源保护,区域性鼠害的预测、预报和综合治理提供基础资料和科学依据。

关键词:啮齿动物;生境选择;种间关系;资源选择函数模型

Habitat selection and interspecific relationship of rodent in the west slope of Helan Mountain

JIN Miao¹, YAO Zhicheng², SHI Rui³, BAI Yunfeng⁴, GAO Hui⁵, TENG Liwei^{1,6}, LIU Zhensheng^{1,6,*}

1 College of Wildlife Resources, 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 Huanren Natural Resources Affairs Service Center, Benxi 117000, China

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

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

Abstract: To identify the main environmental factor that plays a key role in habitat selection of rodents in the western slope of Helan Mountains, and to explore how the interaction among rodent species affect habitat selection, we selected geographic factors (altitude, gradient, slope direction), vegetation factors (vegetation coverage, vegetation height, height of shrubs/arbores) and other factors (distance from the water, away from the road distance, distance from shrubs/arbores) to analyze the habitat selection and interspecific relationship of rodents by resource selection function model and logistic

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:2021-09-15; **采用日期:**2021-12-29

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

regression models. The results showed that there were significant differences in the habitat selection among six captured rodent species. *Apodemus peninsulae* preferred high-altitude habitats covered with dense shrubs/arbores. *Meriones meridianus* preferred sparsely vegetated semi-desert habitats at lower altitude, and did not avoid the road and human disturbance. *Cricetulus migratorius* preferred habitats which were far away from water, covered with dense shrubs/arbores and close to roads. *Spermophilus alaschanicus* preferred the low-altitude habitats where are rich in vegetation. *Cricetulus eversmanni* preferred the high altitude habitats close to roads. *Niviventer niviventer* preferred habitats with higher altitudes, higher slopes and far from water. The relationship between rodent species is mainly avoidance or random. Our study is contributing to understand the changes of rodent distribution and population dynamics. It can provide basic data and scientific basis for protecting biological resources, predicting and forecasting rodents damage, and comprehensive management of the regional damage that caused by rodent in Helan Mountains.

Key Words: rodents; habitat selection; interspecific relationship; resource selection function model

生境广义上是指动物的活动场所,许多生物学者认为每种动物都有其对应的特定的生存环境,即动物为了自身的生存及繁衍,在自然环境中不断进化、适应和选择的一类环境。动物的生境选择因子包括栖息地中的海拔、水源、获得的必要食物,种间竞争以及人为干扰等,因此在进化中动物会评估生境的质量,优先趋向选择适合度和繁殖成功率高的生境类型^[1-4]。

种群间的相互关系是各个种群在不同环境中相互影响相互作用形成的,种间相互关系有竞争、捕食、寄生、共生等类型。在不同的生境中,啮齿动物对不同的干扰条件的适应性不同^[5-6],在环境条件或生境资源的变动下,随着动物食性的变化会导致生态位的变化。此外,生境的变化对动物的生态位和种间关系都有一定的影响^[7]。本文的研究结果有助于了解贺兰山啮齿动物的动态分布并为贺兰山鼠害防治提供基础资料^[8-9]。

1 研究地概况

贺兰山西坡位于阿拉善左旗境内,保护区总面积为 67710 hm²,西坡较为平缓。山脉总体为东北—西南走向,主峰海拔高达 3556 m,是内蒙古境内最高的山峰。由于深居内陆,贺兰山具有典型的温带大陆性气候特征^[10]。山脚与山顶的气候差异较大,降水稀少,主要集中在 7、8 月份,主要的生境类型有山地荒漠和荒漠草原生境、山地草原灌丛生境、山地疏林灌丛生境、山地针叶林/林缘生境、亚高山草甸灌丛生境。本次的研究地域位于内蒙古阿拉善荒漠区,具有典型的温带荒漠和干旱脆弱生态系统,啮齿动物的分布具有明显的区域性分布。分布在贺兰山的啮齿动物主要有:阿拉善黄鼠(*Spermophilus alaschanicus*)、大林姬鼠(*Apodemus peninsulae*)、子午沙鼠(*Meriones meridianus*)、灰仓鼠(*Cricetulus migratorius*)、短尾仓鼠(*Cricetulus eversmanni*)和社鼠(*Niviventer niviventer*)等^[11]。

2 调查方法

在 2013 年的春、夏、秋、冬 4 个季节,采用铗日法,选取位于贺兰山北部、中部和南部的 8 条典型沟道进行布铗,所选沟道覆盖了贺兰山西坡所有植被类型。选用标准中型铁板鼠铗,以新鲜花生米拌花生油为诱饵,从每条沟道的沟口沿沟道向上,每条沟道在不同生境布设 2—4 条样线,每条样线 50 铗,铗距 5 m,行距 20 m,每日清查铗子时对诱饵进行更换,并对捕获成功的铁铗烟熏处理,消除异味后重新布铗。持续置铗 3—4 d,保证每种植被带的鼠铗布设数量不少于 500 个铗日并尽量保证每种类型植被带中的铗日数相同。记录捕获啮齿动物的日期、种类、海拔、温度等信息。

2.1 数据采集

根据现有的生境研究方法并结合贺兰山保护区现状,采用样方法,把捕获的地方设为样方中心,样方大小为 1m×1m。将样方内生态因子分为三类,即地形因子(海拔、坡度、坡向)、植被因子(植被盖度、植被高度、灌

木/乔木高度)、其他因子(距水源距离、距道路距离、距灌木/乔木的距离)共 9 种^[12]。描述如下:

海拔 (Altitude, A):GPS 记录海拔高度(m)。

坡度 (Slope, S):两个点的高程差与其水平距离的百分比(%)。

坡向 (Slope aspect, Sa):阴坡($0\pm 22.5^\circ$);半阴坡($45\pm 22.5^\circ$)、($90\pm 22.5^\circ$)、($315\pm 22.5^\circ$);半阳坡($135\pm 22.5^\circ$)、($225\pm 22.5^\circ$)、($270\pm 22.5^\circ$);阳坡($180\pm 22.5^\circ$);平坡(0°)。

植被盖度 (Vegetation cover, Vc):样方中植被的平均盖度(%)。

植被高度 (Vegetation height, Vh):样方中植被的平均高度(cm)。

距水源距离 (Distances to water, Dw):样方中心距离最近水源的垂直距离(m)。

距道路距离 (Distances to road, Dr):样方中心到道路的垂直距离(m)。

灌木(乔木)高度 (Shrub/arbor height, Sah):样方中灌木(或乔木)平均高度(m)。

距灌木/乔木的距离 (Distance to shrub/arbor, Dsa):样方中心到最近灌木(或乔木)距离(m)。

2.2 数据处理和分析

(1) 鼠种的生境选择

对在不同生境因子下鼠类生境选择的分析运用资源选择函数。由于对生境的喜好一般受到多种因素的影响,如人为干扰、温度等,所以资源选择函数是一个包含了不止一个变量的线性对数模型: $\omega(x) = \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k)$,其中 x 代表了不同的独立生境变量, β 表示选择系数。则物种对生境的选择概率为 $T(x) = \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k) / [1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k)]$ 。当 $T(x)$ 的取值为 1 或 0 时,表示选择或不选择,选择系数 β 可由 logistic 回归系数估计^[13-14]。

为了控制各个变量之间的自相关性,使用 Spearman 检验对所有的生境变量进行相关性分析。当两变量之间相关系数绝对值 <0.5 时,认为没有自相关现象,删除相关系数 >0.5 的因子,只保留其中具有更重要生物学意义的变量^[15-16]。

所有的数据处理和分析在 SPSS 20 中进行分析。应用 logistic 模型对每个样本进行预测,得到在每个样本的环境条件下每种鼠出现的概率。用受试者工作特征曲线(ROC)对模型进行精度检验,并以 AUC 值(ROC)曲线与横坐标围成的面积作为模型预测能力的准确性指标,AUC 值越大,环境变量与预测物种之间的相关性也越大,模型预测效果越高。AUC 值为 0.5—0.7 时模型的预测效果一般,0.7—0.9 时预测效果中等,大于 0.9 时预测效果优秀^[17]。

(2) 鼠种的种间关联度分析及种间关系

种间关联系数反映物种间对生境需求的相似性,关联系数越高,关联度越高,则鼠种对生境选择越相似。种间关联度系数计算公式^[18]为:

$$v = \frac{ad - bc}{\sqrt{(a+b)(c+d)(a+c)(b+d)}}$$

其中: v —种间的关联系数, a —同时出现 X 种、 Y 种的样地数, b —仅出现 X 种的样地数, c —仅出现 Y 种的样地数, d — X 种和 Y 种均未出现的样地数。 v 值的变化范围是-1 到 1,种间关联系数 v 小于 0 时,鼠种呈负关联;种间关联系数 v 大于 0 时,鼠种呈正关联; v 为-1,则表明鼠种的关联度最低; v 为 1,鼠种的关联度最高^[19]。

利用卡方检验判断种间关联度是否达到显著水平,显著水平 $\alpha = 0.05$ 。将从生境选择中得到各种鼠出现的概率加入到 logistics 回归模型中,并进一步实用逐步法筛选变量,得到新的模型。选择 95%置信区间来确定鼠种的相互关系,若在 95%置信区间的值为正值则表现为正选择,即共存关系;若为负值则表现为负选择,即回避关系;若 0 在 95%置信区间之内,说明两个鼠种为随机关系^[20-22]。

3 研究结果

在贺兰山西坡共布设有效铗日 23 091 个,捕获啮齿动物 246 只,隶属 2 目 5 科 9 属 13 种,分属 8 个二级

生态地理分布型,总捕获率为 1.07%。其中,大林姬鼠和阿拉善黄鼠是贺兰山西坡的优势鼠种^[23]。捕获种类最多的地点集中在哈拉乌沟,共捕获 11 种;捕获种类最少的地点是雪岭子沟和甘树湾沟,各有 2 种。灰仓鼠、社鼠和短尾仓鼠在 5 种生境中均有捕获,而五趾跳鼠(*Allactaga sibirica*)、东方田鼠(*Microtus fortis*)和高山鼠兔(*Ochotona alpina*)均只在 1 种生境中被捕获(表 1)。从海拔来看,捕获数量和种类最多的为中等海拔区域,而低海拔和高海拔捕获数量都较低。

表 1 各鼠种在不同生境下的分布
Table 1 Distribution of rodents in different habitats

鼠种 Rodent species	山地荒漠和 荒漠草原生境 Mountain desert and desert steppe	山地草原 灌丛生境 Mountain steppe and shrub	山地疏林 灌丛生境 Mountain forest shrubs	山地针叶林/ 林缘生境 Mountain coniferous/ forest edge	亚高山草甸 灌丛生境 Subalpine meadow and shrub
子午沙鼠 <i>Meriones meridianus</i>	*	*	×	×	×
阿拉善黄鼠 <i>Spermophilus alashanicus</i>	*	*	×	×	*
大林姬鼠 <i>Apodemus peninsulae</i>	*	*	*	*	×
社鼠 <i>Niviventer confucianus</i>	*	*	*	*	*
灰仓鼠 <i>Cricetulus migratorius</i>	*	*	*	*	*
长尾仓鼠 <i>Cricetulus longicaudatus</i>	*	*	×	*	×
短尾仓鼠 <i>Allocrietulus evermanni</i>	*	*	*	*	*
五趾跳鼠 <i>Allactaga sibirica</i>	*	×	×	×	×
褐家鼠 <i>Rattus norvegicus</i>	*	*	×	×	×
花鼠 <i>Tamias sibiricus</i>	*	×	×	*	×
黑线仓鼠 <i>Cricetulus barabensis</i>	*	*	*	×	×
高山鼠兔 <i>Ochotona alpina</i>	×	×	×	×	*
东方田鼠 <i>Microtus fortis</i>	×	×	×	*	×

* 代表该物种发现在此类生境中;×代表没有发现在此类生境中

3.1 生境选择

本研究选取捕获数量较多的 6 种鼠进行生境选择研究,分别为子午沙鼠、灰仓鼠、阿拉善黄鼠、短尾仓鼠、大林姬鼠和社鼠。用 Spearman 检验来分析影响生境选择的关键因子,排除 ν 大于 0.5 的因子。数据显示,只有距灌木/乔木距离以及灌木/乔木高度大于 0.5,删掉其中一个,保留灌木/乔木高度用于后续的 logistics 模型分析(表 2)。

表 2 生境因子的 Spearman 相关系数矩阵
Table 2 Spearman correlation coefficient of habitat factors

生境因子 Habitat factors	海拔 Altitude (A)	植被高度 (Vh)	植被盖度 (Vc)	灌木(乔木) 高度 (Sah)	距灌木/乔木 的距离 (Dsa)	坡向 (Sa)	坡度 (S)	距水源距离 (Dw)
植被高度 Vegetation height (Vh)	0.0085							
植被盖度 Vegetation cover (Vc)	0.4256 **	0.3028 **						
灌木(乔木)高度 Shrub/arbor height (Sah)	-0.0923	0.0847	-0.0613					
距灌木/乔木的距离 Distance to shrub/arbor (Dsa)	-0.1422 *	0.1104	-0.0974	0.95 **				
坡向 Slope aspect (Sa)	-0.2099 **	0.1094	0.0475	-0.0297	-0.0455			
坡度 Slope (S)	0.2346 **	-0.1055	0.0257	0.0615	0.0326	0.3947 **		
距水源距离 Distances to water (Dw)	0.1163	-0.2142 **	0.2008 **	-0.0868	-0.0795	-0.061	-0.0845	
距道路距离 Distances to road (Dr)	0.1361 *	0.1107	0.3642 **	0.0586	0.0151	0.1133	0.0106	0.1213

** : $P < 0.01$ * : $P < 0.05$

对各鼠种 logistic 模型结果进行筛选,得出各鼠种的生境选择变量(表 3)。大林姬鼠为海拔和灌木(乔木)高度,子午沙鼠为海拔和距道路距离,灰仓鼠为灌木(乔木)高度、距水源距离和距道路距离,短尾仓鼠为海拔和距道路距离,社鼠为海拔、坡度和距水源距离,阿拉善黄鼠为海拔、植被盖度、灌木(乔木)高度和距道路距离。

表 3 6 个鼠种 logistic 模型筛选出的变量

Table 3 Habitat variables extracted from logistic model among 6 rodent species

鼠种 Rodent species	生境因子 Habitat factors	回归系数 Estimate	置信区间 95% CI	AIC
大林姬鼠 <i>A. peninsulae</i>	常数项	-1.3624±0.1828	-1.7382—-1.0184	218.25
	<i>Sah</i>	0.3814±0.1557	0.0775—0.7104	
	<i>A</i>	0.5012±0.2538	0.0195—1.021	
	<i>Vc</i>	-0.3306±0.2052	-0.7426—0.0669	
	<i>Vh</i>	0.267±0.163	-0.0609—0.5923	
子午沙鼠 <i>M. meridianus</i>	常数项	-16.8967±8.6305	-36.8151—-8.6467	82.83
	<i>A</i>	-2.3770±0.5447	-3.5653—-1.4039	
	<i>S</i>	-0.6933±0.5192	-1.8901—0.1889	
	<i>Dr</i>	-27.1506±18.1286	-68.9756—-3.6389	
社鼠 <i>N. confucianus</i>	常数项	-1.7412±0.2902	-2.43093—-1.2773	193.26
	<i>A</i>	0.7347±0.3139	0.1479—1.3881	
	<i>Vh</i>	-0.4193±0.2455	-0.9476—0.017	
	<i>S</i>	0.9276±1.1402	3.9404—0.0817	
	<i>Dw</i>	0.5434±0.1795	0.2011—0.9094	
	<i>Dr</i>	-0.2748±0.1889	-0.6892—0.0695	
灰仓鼠 <i>C. migratorius</i>	常数项	-2.4120±0.3034	-3.0977—-1.8792	141.24
	<i>A</i>	0.5765±0.3536	-0.083—1.3177	
	<i>Vh</i>	-0.4416±0.3403	-1.2022—0.1403	
	<i>Sah</i>	0.5462±0.2077	0.168—1.0503	
	<i>Dw</i>	0.3515±0.1681	0.0124—0.6806	
	<i>Dr</i>	-1.1522±0.4970	-2.4164—-0.3213	
短尾仓鼠 <i>A. eversmanni</i>	常数项	-2.3156±0.2694	-2.8953—-1.829	144.27
	<i>A</i>	1.2440±0.3986	0.5143—2.0899	
	<i>S</i>	-0.4563±0.2556	-0.9954—0.0127	
	<i>Dw</i>	-0.3909±0.2776	-1.0776—0.0712	
	<i>Dr</i>	-0.9639±0.3325	-1.6673—-0.3419	
阿拉善黄鼠 <i>S. alashanicus</i>	常数项	-1.9881±0.5429	-3.3573—-1.2534	168.02
	<i>A</i>	-1.4868±0.2976	-2.1034—-0.9292	
	<i>Vc</i>	0.7268±0.2401	0.2678—1.2167	
	<i>Sah</i>	-2.6573±2.5139	-8.9492—-0.4215	
	<i>Dr</i>	1.7697±0.3108	1.1932—2.4195	

ROC 曲线预测结果表明,子午沙鼠的 AUC 值为 0.9067,资源选择函数模型拟合效果优秀。表明子午沙鼠偏好选择海拔较低、距离道路较近的生境类型。阿拉善黄鼠的 AUC 值为 0.8669,拟合效果中等。表明阿拉善黄鼠偏好海拔较低、植被盖度较高、灌木(乔木)高度较低、距离道路较远的生境类型。其他鼠种 ROC 预测结果为大林姬鼠(0.6829)、灰仓鼠(0.7281)、短尾仓鼠(0.7099)及社鼠(0.7681),拟合效果均一般。可见,大林姬鼠偏好选择灌木(乔木)高度较高、海拔较高的生境类型;灰仓鼠偏好选择灌木(乔木)高度较高、距离水源比较远、距离道路比较近的生境类型;短尾仓鼠选择海拔较高、距离道路比较近的生境类型;社鼠则选择海拔较高、坡度较大、距离水源比较远的生境类型。

3.2 种间关联度分析

78 对鼠种对中,种间关联系数 v 为负值的有 20 对 (25.64%),为负关联; v 在 0—0.25 范围内的有 38 对 (48.72%); v 在 0.25—0.5 之内的有 9 对 (11.54%); $v \geq 0.5$ 的有 11 对 (14.10%)。由 v 值的占比可以得出,大部分鼠类之间存在关联性(表 4)。其中,高山鼠兔-大林姬鼠的关联度最小,褐家鼠-子午沙鼠的关联度最大。

检验后的结果显示(表 5),种间关联度差异显著的鼠种 17 对 ($P<0.05$),差异极显著的鼠种 15 对 ($P<0.01$)。种间关联系数可以反映鼠种种间对生境需求的相似性,种间关联度系数为负值的有 14 对 (17.95%),种间关联系数 v 为正值的有 18 对 (23.08%),表明贺兰山西坡啮齿动物有 18%左右的鼠对选择不同生境,23%左右的鼠对选择相似生境。

3.3 鼠种种间相互关系

将各鼠种出现的概率加入 logistic 回归模型中,并进一步使用逐步法筛选变量,得到最终模型。6 个鼠种间相互关系见表 6。

在 95%的置信区间内,子午沙鼠与短尾仓鼠 (−46.5697—−9.357) 为负值表现出回避关系,与灰仓鼠 (−30.4572—0.8816) 表现出随机关系;阿拉善黄鼠与子午沙鼠 (−8.2966—0.8217) 表现出随机关系,与大林姬鼠 (−28.8689—−7.821)、灰仓鼠 (−44.1799—−8.7034)、短尾仓鼠 (−39.2936—−0.4165)、社鼠 (−16.3162—−0.9644) 均表现出回避关系。其中阿拉善黄鼠 (−28.8689—−7.821) 与大林姬鼠 (−3.9946—−0.5214) 为相互回避关系,阿拉善黄鼠 (−16.3162—−0.9644) 与社鼠 (−8.213—−2.275) 也为相互回避关系。

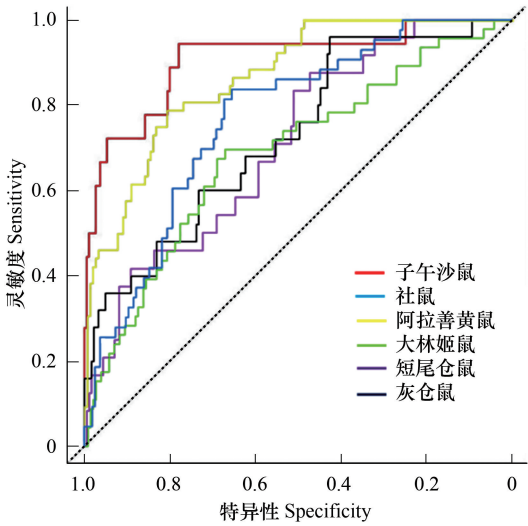


图 1 6 个鼠种资源选择函数 ROC 曲线
Fig.1 ROC curve of 6 radent species resource selection function

表 4 各鼠种种间关联度系数
Table 4 The interspecific correlation coefficient of different rodents

鼠种 Rodent species	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	−0.408											
3	0.667	−0.408										
4	0.408	0.25	0.612									
5	0	0	0	0								
6	0	0	0	0	0							
7	0.167	0.612	0.667	0.408	0	0						
8	0	0	0	0	0	0	0					
9	−0.167	0.408	0.167	−0.408	0	0	−0.167	0				
10	−0.167	0.408	0.167	0.612	0	0	0.667	0	−0.667			
11	0.667	0.408	1	0.612	0	0	0.667	0	0.167	0.167		
12	−0.612	0.25	−0.408	−0.25	0	0	0.408	0	−0.408	0.612	−0.408	
13	0.408	−1	−0.408	−0.25	0	0	−0.612	0	−0.408	−0.408	−0.408	−0.25

1 阿拉善黄鼠 *S. alashanicus*;2 大林姬鼠 *A. peninsulae*;3 子午沙鼠 *M. meridianus*;4 五趾跳鼠 *A. sibirica*;5 灰仓鼠 *C. migratorius*;6 短尾仓鼠 *A. eversmanni*;7 长尾仓鼠 *C. longicaudatus*;8 社鼠 *N. confucianus*;9 黑线仓鼠 *C. barabensis*;10 花鼠 *T. sibiricus*;11 褐家鼠 *R. norvegicus*;12 东方田鼠 *M. fortis*;13 高山鼠兔 *O. alpine*

表 5 鼠对种间关联度显著性差异

Table 5 Significant differences of rodent pairs

显著性 Significant	鼠对 Pairs of rodents
$P < 0.05$	阿拉善黄鼠-大林姬鼠;阿拉善黄鼠-五趾跳鼠;阿拉善黄鼠-高山属兔;大林姬鼠-子午沙鼠;大林姬鼠-黑线仓鼠;大林姬鼠-花鼠;大林姬鼠-褐家鼠;子午沙鼠-东方田鼠;子午沙鼠-高山属兔;五趾跳鼠-长尾仓鼠;五趾跳鼠-黑线仓鼠;长尾仓鼠-东方田鼠;黑线仓鼠-东方田鼠;黑线仓鼠-高山属兔;花鼠-高山属兔;褐家鼠-东方田鼠;褐家鼠-高山属兔
$P < 0.01$	阿拉善黄鼠-东方田鼠;大林姬鼠-长尾仓鼠;子午沙鼠-五趾跳鼠;五趾跳鼠-花鼠;五趾跳鼠-褐家鼠;长尾仓鼠-高山属兔;花鼠-东方田鼠
$P < 0.001$	阿拉善黄鼠-子午沙鼠;阿拉善黄鼠-褐家鼠;大林姬鼠-高山属兔;子午沙鼠-长尾仓鼠;子午沙鼠-褐家鼠;长尾仓鼠-花鼠;长尾仓鼠-褐家鼠;黑线仓鼠-花鼠

表 6 各鼠种间相互关系的 logistic 回归结果

Table 6 Logistic regression results of relationships among 6 rodent species

鼠种 Rodent species	因子 Ecological factors	回归系数 Estimate	置信区间 95% CI	AUC
灰仓鼠 <i>C. migratorius</i>	常数项	0.0987±0.6500	-1.1935—1.3837	0.7976
	A	1.4789±0.5560	0.3974—2.6082	
	Vh	-0.8263±0.3852	-1.6885—-0.1744	
	Dr	-1.3836±0.6158	-2.6751—-0.2143	
	短尾仓鼠	-4.5439±3.0558	-10.9265—1.2456	
	社鼠	-6.2257±2.1365	-10.9273—-2.4193	
	阿拉善黄鼠	-3.4746±1.9405	-7.9496—0.1231	
大林姬鼠 <i>A. peninsulae</i>	常数项	-0.6803±0.2249	-3.0247—-0.2459	0.6928
	子午沙鼠	-2.3505±1.8166	-6.5847—0.7747	
	阿拉善黄鼠	-2.0751±0.8700	-3.9946—-0.5214	
社鼠 <i>N. confucianus</i>	常数项	1.9273±1.0689	0.0035—4.2062	0.7763
	S	0.3703±0.1913	0.0—0.756	
	大林姬鼠	-8.8540±3.5102	-16.5192—-2.7316	
	子午沙鼠	-8.6108±4.6916	-19.4687—-1.3763	
	阿拉善黄鼠	-4.9364±1.4921	-8.213—-2.275	
子午沙鼠 <i>M. meridianus</i>	常数项	-14.9863±8.6302	-34.9286—-4.1163	0.9211
	S	-1.2006±0.5441	-2.4643—-0.2926	
	Dr	-33.4189±19.1765	-77.4617—-8.6202	
	灰仓鼠	-10.676±8.5092	-30.4572—0.8816	
	短尾仓鼠	-25.5915±9.531	-46.5697—-9.357	
短尾仓鼠 <i>A. eversmanni</i>	常数项	-1.7739±0.3811	-2.5206—-0.9996	0.7088
	A	1.4460±0.4392	0.6390—2.3739	
	S	-0.4430±0.2542	-0.9785—-0.024	
	Dr	-1.2590±0.4104	-2.1182—-0.4977	
	灰仓鼠	-4.6755±2.9909	-11.7377—-0.2318	
阿拉善黄鼠 <i>S. alashanicus</i>	常数项	7.9096±2.8533	3.5256—12.9266	0.8958
	A	2.1285±1.4019	-0.5892—4.9441	
	Dr	-2.6524±1.4190	-5.5429—0.0591	
	大林姬鼠	-17.0741±5.3731	-28.8689—-7.821	
	子午沙鼠	-3.4823±2.3024	-8.2966—0.8217	
	灰仓鼠	-24.1048±9.3613	-44.1799—-8.7034	
	短尾仓鼠	-17.8454±9.8984	-39.2936—-0.4165	
	社鼠	-8.0726±3.8922	-16.3162—-0.9644	

4 讨论

贺兰山西坡为山地荒漠草原或灌丛生境,海拔低的地区降水量少,较为干旱,从 6 种啮齿动物生境选择的结果中可以看出,子午沙鼠喜干旱型生境^[2],所以仅在此类生境中出现。大林姬鼠是典型的森林鼠种,因此会选择在灌木(乔木)多的生境出现。由于灰仓鼠适应性强,在贺兰山西坡的山地森林、草原灌丛、荒漠、草甸等生境中均有分布,因此捕获的范围较为广泛。但灰仓鼠的资源选择模型显示,其选择距水源较远、距道路较近的生境,可能是灰仓鼠喜干旱,对水源要求低,距人类活动区域较近的原因。短尾仓鼠和社鼠的生境选择的结果较为相似,均在海拔约 2000 m 的区域活动^[19],对人为干扰及道路不存在回避关系。但短尾仓鼠偏好海拔较高、距离道路较近的生境,社鼠选择海拔较高、坡度较大的生境。阿拉善黄鼠在各海拔梯度均有捕获样本,但上述结果表明,阿拉善黄鼠的海拔回归系数大于植被盖度,这说明海拔对其生境选择的结果影响更大,这也与在低海拔地区捕获的个体数量大于高海拔地区这一情况相吻合。阿拉善黄鼠作为分布在贺兰山区域的啮齿动物优势种,其在同一垂直分布带表现为食物资源越丰富,阿拉善黄鼠种群数量越大,并且喜好低海拔的灌丛生境活动,可以有利于其观察外界环境动态,能使其更早做出预警并增加其存活率。此外,阿拉善黄鼠胆小、机警,会选择回避距道路距离较近和人为干扰较多的生境,也是其多出现于低海拔、植被盖度多、灌木(乔木)高度较低的原因^[24-25]。

由于食物竞争、栖息地竞争、活动范围及数量等原因,鼠类利用竞争排斥原理来选择不同的生态位以减少种间竞争,其种间关系表现为共存、回避或随机关系^[26-27]。结果显示,阿拉善黄鼠与大林姬鼠、社鼠均存在双向回避关系,即在 95% 的置信区间内,阿拉善黄鼠与大林姬鼠、社鼠的双向 logistic 回归结果均呈负值。同时,资源选择模型的结果显示阿拉善黄鼠更偏好选择海拔低的生境,大林姬鼠喜爱较高的灌丛(乔木),社鼠多选择坡度大、海拔高的生境。可能是由于大林姬鼠与阿拉善黄鼠均是贺兰山西坡的优势种,其种群分布区域较广、数量较多;其次,三鼠种的食性存在差异。阿拉善黄鼠是植食性动物,大林姬鼠以吃种子为主,社鼠食性较为复杂,多以果实、种子为主;三鼠种的活动节律各不相同。阿拉善黄鼠是昼间活动的冬眠动物,社鼠多在夜间活动,大林姬鼠昼夜都活动也不冬眠^[28]。灰仓鼠单向回避社鼠,由于两鼠种食性、活动时间均相同,但社鼠种群在贺兰山西坡的分布范围广、数量多^[29],这种情况下会对灰仓鼠产生食物竞争压力,因此呈现对社鼠的单向回避关系。

在测定鼠种之间的关联系数时,发现阿拉善黄鼠、褐家鼠及子午沙鼠的相关性很高,三鼠种生境选择相似,同时高关联性导致其对草原等生境危害加剧,也成为多种鼠类传染病的主要宿主。虽然在贺兰山西坡褐家鼠的种群数量不高,暂不构成单一威胁,但其他两鼠种数量较大,所以在治理鼠害时,应参考种间关联程度进行有针对性的防治^[30]。本研究中,ROC 曲线预测结果显示大林姬鼠(0.6829)、灰仓鼠(0.7281)、短尾仓鼠(0.7099)及社鼠(0.7681)的 AUC 值较低,模型预测效果一般,可能与样本数量少有关,需要在以后研究中提高样本量并对研究方法进行相应改进。

参考文献(References):

- [1] 覃雪波,曾朝辉. 中新天津生态城夏季不同生境中啮齿动物群落与环境因子的关系. 兽类学报, 2011, 31(4): 380-386.
- [2] 王利清,武晓东,付和平,甘红军,杨玉平. 阿拉善地区不同植被生境中鼠类栖息地选择的特性. 中国草地学报, 2012, 34(1): 37-42.
- [3] Padié S, Morellet N, Hewison A J M, Martin J L, Bonnot N, Cargnelutti B, Chamaillé-Jammes S. Roe deer at risk: teasing apart habitat selection and landscape constraints in risk exposure at multiple scales. *Oikos*, 2015, 124(11): 1536-1546.
- [4] 王金亮,陈姚. 3S 技术在野生动物生境研究中的应用. 地理与地理信息科学, 2004, 20(6): 44-47.
- [5] 牛翠娟,娄安如,孙儒泳,李庆芬. 基础生态学(第二版). 北京:高等教育出版社, 2007.
- [6] 李建丰,田明义,古德就,孙江华. 葛藤主要节肢动物类群种间关联的研究. 华南农业大学学报:自然科学版, 2004, 25(2): 48-51.
- [7] 岳闯,郭乾伟,张卓然,李鑫,满都呼,袁帅,付和平,武晓东,金国,刘建文,李永善. 内蒙古典型草原布氏田鼠营养生态位及其种间关系. 兽类学报, 2020, 40(5): 424-434.
- [8] 向锁玉,孙希,吴忠道. 中国鼠疫的疫情及防治进展. 中国热带医学, 2020, 20(5): 486-490.

- [9] 苏闯, 马文红, 张芯毓, 苏云, 闵永恩, 张晋元, 赵利清, 梁存柱. 贺兰山西坡主要山地灌丛群落的基本特征. 植物生态学报, 2018, 42(10): 1050-1054.
- [10] 沈希, 高子厚. 啮齿类动物种群生态学与鼠疫关系的研究进展. 中国人兽共患病学报, 2018, 34(12): 1151-1154.
- [11] 张福顺. 不同干扰条件下荒漠啮齿动物种群和群落动态研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.
- [12] 刘铸, 徐艳春, 戎可, 金志民, 马建章. 啮齿动物分子系统地理学研究进展. 生态学报, 2014, 34(2): 307-315.
- [13] 邹红菲, 高忠斯, 吴庆明, 黄华智, 李全亮, 陶蕊, 杨宇博. 应用资源选择函数研究丹顶鹤的巢址选择. 野生动物学报, 2018, 39(3): 566-572.
- [14] 李宏群, 廉振民, 陈存根. 应用资源选择函数对褐马鸡冬季夜栖地选择的研究. 四川动物, 2008, 27(6): 1082-1085.
- [15] McLane A J, Semeniuk C, McDermid G J, Marceau D J. The role of agent-based models in wildlife ecology and management. Ecological Modelling, 2011, 222(8): 1544-1556.
- [16] Wagenmakers E J. How many parameters does it take to fit an elephant? Journal of Mathematical Psychology, 2003, 47(5/6): 580-586.
- [17] Leshowitz B. Comparison of ROC curves from one- and two-interval rating-scale procedures. Journal of the Acoustical Society of America, 1969, 46(2B): 399-402.
- [18] 张金屯. 数量生态学. 北京: 科学出版社, 2004.
- [19] 武晓东, 阿娟, 付和平. 内蒙古阿拉善荒漠啮齿动物群落结构及其多样性研究. 草地学报, 2003, 11(4): 312-316.
- [20] 陈文文, 刘三峡, 钟杰, 江广华, 周友兵, 陈芳清, 谢宗强. 神农架林区 5 种林型中社鼠脏器的重量. 四川动物, 2012, 31(6): 945-949.
- [21] 钟文勤, 周庆强, 孙崇璐. 内蒙古白音锡勒典型草原鼠类群落的空间配置及其结构研究. 生态学报, 1981, 1(1): 12-21.
- [22] 袁帅, 武晓东, 付和平, 杨泽龙, 张福顺, 张晓东. 不同干扰下荒漠啮齿动物群落多样性的多尺度分析. 生态学报, 2011, 31(7): 1982-1992.
- [23] 石锐, 滕丽微, 张致荣, 高惠, 刘鹏, 庞博, 燕永彬, 刘振生. 贺兰山西坡鼠种内脏重量与海拔梯度关系研究. 林业科技, 2019, 44(2): 16-19.
- [24] 潘世秀, 孟秀祥, 冯金朝, 周宜君, 徐宏发. 小型林间独栖反刍动物栖息地选择研究进展. 浙江林学院学报, 2007, 24(3): 357-362.
- [25] 谭孟雨, 隋璐璐, 张尚明玉, 刘振生, 高惠, 滕丽微, 张明睿, 颜文斌. 内蒙古贺兰山国家级自然保护区荒漠沙蜥春秋季节生境选择. 生态学报, 2019, 39(18): 6889-6897.
- [26] Sachot S, Perrin N, Neet C. Winter habitat selection by two sympatric forest grouse in western Switzerland; implications for conservation. Biological Conservation, 2003, 112(3): 373-382.
- [27] 李宗智, 刘振生, 米书慧, 吴建平, 滕丽微. 白山原麝国家级自然保护区獐春夏生境选择. 生态学报, 2021, 41(4): 1625-1633.
- [28] Blanco-Fontao B, Fernández-Gil A, Obeso J R, Quevedo M. Diet and habitat selection in Cantabrian Capercaillie (*Tetrao urogallus cantabricus*): ecological differentiation of a rear-edge population. Journal of Ornithology, 2010, 151(2): 269-277.
- [29] Quevedo M, Bañuelos M J, Sáez O, Obeso J R. Habitat selection by Cantabrian capercaillie *Tetrao urogallus cantabricus* at the edge of the species' distribution. Wildlife Biology, 2006, 12(3): 267-276.
- [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.