

DOI: 10.20103/j.stxb.202306071206

杜波波, 冀超, 王大伟, 刘晓辉, 刘升平, 林克剑. 基于无人机低空遥感影像分析的布氏田鼠冬季洞群空间分布特征及其影响因子. 生态学报, 2025, 45(3): 1494-1502.

Du B B, Ji C, Wang D W, Liu X H, Liu S P, Lin K J. Analysis of spatial distribution characteristics and influencing factors of *Lasiopodomys brandtii* based on unmanned aerial vehicle (UAV) low altitude remote sensing images. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(3): 1494-1502.

基于无人机低空遥感影像分析的布氏田鼠冬季洞群空间分布特征及其影响因子

杜波波¹, 冀超¹, 王大伟^{1,2,3,*}, 刘晓辉³, 刘升平⁴, 林克剑^{1,*}

1 中国农业科学院草原研究所, 农业农村部人工草地生物灾害监测与绿色防控重点实验室, 呼和浩特 010010

2 中国农业科学院西部研究中心, 昌吉 831100

3 中国农业科学院植物保护研究所, 杂草鼠害与草地有害生物防控创新中心, 北京 100193

4 中国农业科学院农业信息研究所, 农业农村部区块链农业应用重点实验室, 北京 100081

摘要: 布氏田鼠是内蒙古典型草原主要害鼠之一。为探明其发生机制, 建立规模化调查技术, 在内蒙古东乌珠穆沁旗草原利用无人机航拍技术采集布氏田鼠冬季栖息地影像。通过拼接、目视解译、格网化(1hm²)分析, 利用遥感数据、地理空间数据等获取格网内生境指标, 采用皮尔逊相关分析和广义加性模型等方法, 探讨了影响布氏田鼠越冬洞群分布的相关生境因子。结果表明: (1) 生长季植被指数对其洞群密度空间分布有一定指示作用, 布氏田鼠喜栖于植被较为低矮的裸露草场(0.1<NDVI<0.18); (2) 9月和10月NDVI与其越冬洞群密度的分布具有较大关系, 其中9月份布氏田鼠洞群主要集中在0.25<NDVI<0.35的区域, 而10月份NDVI与洞群密度呈负相关关系; (3) 布氏田鼠越冬栖息地的选择偏向于海拔相对较高(895m—915m)的西南缓坡(0.3°—1.6°)。研究结果将为布氏田鼠越冬栖息地选择预测提供了参考依据。

关键词: 布氏田鼠; 越冬洞群; 无人机; 广义加性模型; 生境因子

Analysis of spatial distribution characteristics and influencing factors of *Lasiopodomys brandtii* based on unmanned aerial vehicle (UAV) low altitude remote sensing images

DU Bobo¹, JI Chao¹, WANG Dawei^{1,2,3,*}, LIU Xiaohui³, LIU Shengping⁴, LIN Kejian^{1,*}

1 Key Laboratory of Biohazard Monitoring and Green Prevention and Control in Artificial Grassland, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Grassland Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hohhot 010010, China

2 Western Agricultural Research Center, Chinese Academy of Agriculture Science, Changji 831100, China

3 Department of Weed Science, Rodent Biology and Rangeland protection, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China

4 Key laboratory of Agricultural Blockchain Application, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Agricultural Information Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: Brandt's vole (*Lasiopodomys brandtii*) is a common rodent pest in the steppes of Inner Mongolia, China. To explore the potential mechanisms of *Lasiopodomys brandtii* occurrence, and develop effective survey techniques on a large-scale, a field experiment was conducted in the steppes of East Ujimqin Banner. Images were collected using an unmanned

基金项目: 内蒙古自治区科技计划项目(2022YFSJ001); 中国农业科学院北方农牧业科技创新中心项目(BFGJ2022007); 中国农业科学院平台科技创新重大任务(Y2021PT03); “天池英才”引进计划

收稿日期: 2023-06-07; **网络出版日期:** 2024-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangdawei02@caas.cn

aircraft system and stitched from two different habitat plots of Brandt's vole. Each image was divided into 1hm^2 grids, and the numbers of overwintering colonies were identified. Environmental factors and geospatial data were extracted from remote sensing images and the correlation between these factors and colony density was analyzed using *Pearson's* test and a generalized additive model (GAM). The results showed that vegetation ($0.1 < \text{NDVI} < 0.18$) indices can indicate the selection of overwintering colonies in Brandt's vole, with voles preferring sites with sparse and low vegetation to build overwintering colonies. NDVI, especially in September and October, was found to be highly correlated with colony density. High density colonies were mainly found in areas with specific NDVI ranges from 0.25 to 0.35 in September, and there was a significant negative correlation between NDVI and colony density in October. Furthermore, high density colonies were concentrated on southeast slight gradients ($0.3^\circ\text{--}1.6^\circ$) with a relatively high altitude (895m—915m). These findings provide valuable insights for predicting the selection of overwintering colonies and managing Brandt's vole populations in spring.

Key Words: Brandt's vole; overwintering colony; unmanned aerial vehicle (UAV); generalized additive model; habitat factors

啮齿动物包括啮齿目(鼠)和兔形目(兔)动物,物种数量占哺乳动物种类的 40.8%,是生态系统重要组成类群,在草原结构和功能转换中扮演着“双刃剑”的角色^[1-2]。当鼠(兔)种群数量在为害阈值以下时,对草原生态系统物质循环和能量流动具有促进作用,被称为“生态系统工程师”^[3]。但是,当其种群数量急剧增加、超过为害阈值时,会导致草原沙化、退化,降低草原生产能力和生态服务功能,而且传播鼠疫、出血热等烈性疾病,严重威胁人民的健康安全^[4-5]。随着全球气候变化及人类对草原过度开发利用,草原退化面积不断增大,为啮齿动物的种群增长提供了契机,草原鼠害呈现多发、重发势头。自 2007 年以来,我国草原鼠害年均危害面积为 3644.7 万 hm^2 ^[6]。然而,草原面积广阔,鼠害发生面积、发生地点、危害程度难以及时监测与评估,实现鼠害精准预测与有效治理困难。据统计,2019—2021 年草原鼠害年均有效防治面积的比例仅为发生面积的 14%—17%^[6]。如何实现草原鼠害的精准监测,是实现科学有效防治的前提,对保护草原生态系统、保证畜牧业稳定发展等具有重要意义。

传统的草原鼠害监测主要以地面调查为主,如开洞堵洞法、夹捕法、目测法等,以有限的点位数据代表旗县级甚至地市级的鼠害发生水平^[7]。然而,这些方法需要耗费大量人工,难以实现大面积、覆盖式调查,更难保证时效性与连续性,达到快速灾害预警要求^[8]。此外,草原鼠害常表现为斑块化、聚集性分布模式,传统调查方法无法提供准确的大范围内害鼠空间分布数据^[9]。因此,鼠害防治措施只能采取大面积无差别的撒施杀鼠剂。这不但造成低鼠密度区的药物大量浪费、高密度区药物不足,甚至造成鸟类等非靶标动物误食、天敌二次中毒、环境污染等一系列问题^[8, 10]。随着无人机技术的快速发展,利用近地遥感影像取代人工调查,高效调查鼠迹(如鼠洞、土丘)的密度,评估鼠密度和解析空间分布特征,已成为研究趋势。例如,花蕊等基于大疆精灵 3 对高原鼠兔(*Ochotona curzoniae*)洞口、植被光谱进行采集,结合地面调查数据建模,对高原鼠兔危害等级进行划分^[11]。马涛等利用无人机拍摄,分析了大沙鼠(*Rhombomys opimus*)鼠洞分布与坡度、坡向、高程、起伏度等地形参数的关系^[12],以及鼠洞的带状分布特征^[9]。这些研究表明,无人机可以在大范围内实现鼠害发生情况的快速精准监测,也可用于分析鼠害空间分布特征,是一种极具发展潜力的草原鼠害调查技术。同时,还可以通过对鼠害发生区域的生境指标关联分析,揭示草原鼠害发生与生境因子之间的潜在关系^[13-14]。

内蒙古草原是我国重要的畜牧业生产基地和北方生态屏障,鼠害多发高发。局部区域受灾面积超过 70%,对畜牧业发展造成严重影响^[15]。布氏田鼠(*Lasiopodomys brandtii*)是内蒙古东部典型草原区重要害鼠之一,主要分布于锡林郭勒和呼伦贝尔草原。该鼠繁殖能力强,种群数量易迅速增长,尤其是在秋末冬初可形成多达 40 只的大型聚集群来度过严酷的冬季,因其挖掘与储草行为严重破坏植被,成为内蒙古草原重要的鼠害监测对象^[16-18]。之前研究对布氏田鼠栖息地选择的植被特点、地形特点有少量地面调查报道^[19-21],但尚

缺乏利用无人机低空遥感技术对其越冬洞群进行密度评估,及分析空间分布和栖息地选择的报道。因此,本研究选择在布氏田鼠集群完成的初冬季节,利用无人机采集鼠害高发区洞群影像,通过目视解译洞群来评估鼠密度,分析洞群空间分布特征;并根据洞群空间分布位置点提取环境因子,分析与其越冬栖息地选择相关的生境因子,从而探讨无人机技术在布氏田鼠监测预警和精准防治中的应用前景。

1 研究区概况

本研究在内蒙古自治区锡林郭勒盟东乌珠穆沁旗典型草原(117°0′19″—117°3′59″E, 45°38′19″—45°41′1″N)进行。东乌珠穆沁旗隶属内蒙古自治区锡林郭勒盟,地处内蒙古自治区锡林郭勒盟东北部,西麓大兴安岭,东邻兴安盟、通辽市,南连锡林浩特市、西珠穆沁旗,西接阿巴嘎旗,北与蒙古国交界,国境线长达 528.88 km。属于温带大陆性气候,年降水量约 300 mm 主要集中在 6—8 月份,占年降水量的 70%;年蒸发量在 3000 mm 以上,为降水量的 7.5 倍;年平均温度约为 2.8℃,冬季低温寒冷,夏季炎热干燥。

共设置了 2 块样地,相距约 2 km,样地二在样地一的西南方向,每块样地约 3 km²。海拔在 888 m—929 m,地势较为平缓,土壤类型为栗钙土。据中国科学院资源环境科学与数据中心发布的全国植被类型图(<https://www.resdc.cn/>)显示,样地一的植被类型主要以大针茅(*Stipa grandis*)为主,样地二则以冰草(*Agropyron cristatum*)、丛生小禾草为主,大针茅所占比例较小。布氏田鼠越冬洞群周围遍布新翻土壤,在影像图上清晰可见(图 1)。

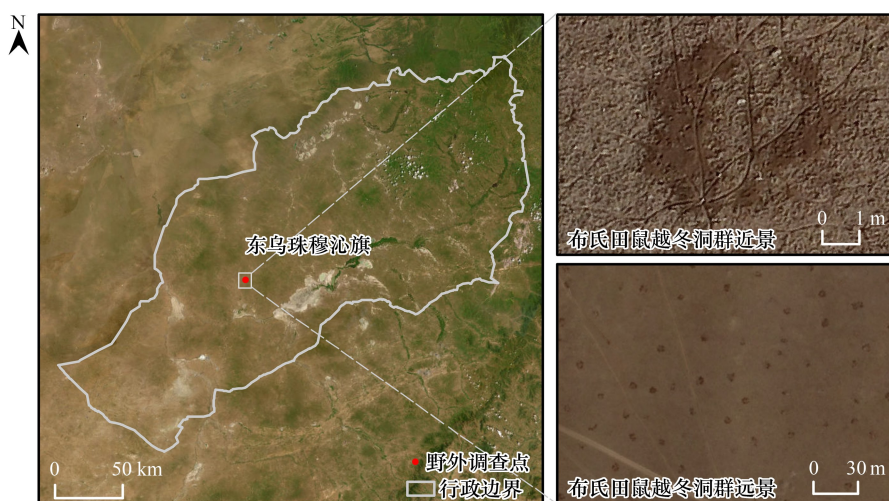


图 1 研究区概况及布氏田鼠越冬洞群

Fig.1 Location of the study area and overwintering colonies of Brandt's vole

2 研究方法

2.1 遥感影像处理与参数提取

2.1.1 卫星遥感数据

Sentinel-2 影像数据源于谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE),影像覆盖 13 个波段,幅宽 290 km,空间分辨率为 10 m,双星重访周期为 5 d^[22]。所用遥感影像包括 2021 年 5—10 月的 Sentinel-2 数据,在 GEE 平台(<https://code.earthengine.google.com/>)进行波段运算获取各时相归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI),在 python 中做最大值拟合获取各月份 NDVI 值。

2.1.2 无人机影像

利用大疆 M300RTK 型多旋翼无人机搭载禅思 P1 镜头采集布氏田鼠洞群影像,传感器有效像素 4500 万,

照片最大分辨率为 8192×5460。数据采集时飞机飞行速度 10m/s,飞行高度为 150m,影像空间分辨率为 2cm。为保证后续拼图精度,将航向重叠率和旁向重叠率都设置为 80%,航拍时间约 4h,拍摄图片 1153 张。利用无人机拼接软件 pix4d 获得研究区布氏田鼠洞群影像(图 1)。

2.1.3 DEM 数据

地面高程数据来自中国科学院地理空间数据云,空间分辨率为 30 m,在 ArcGIS10.5 中计算样地范围内的坡度和坡向。

2.2 广义加性模型

利用 R(4.2.1)mgcv 工程包建立广义加性模型(Generalized additive models, GAM)来探测环境变量和布氏田鼠洞群密度之间的线性或非线性关系^[23—25],采用 3 次样条函数作为平滑函数。根据 Pearson 相关系数,剔除相关性较大的生境指标,降低强共线性导致的模型误差^[26]。采用广义交叉验证方法(Generalized cross validation, GCV)和赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC)对模型质量进行评估,当 GCV 和 AIC 值越小时,模型精度越高,反之模型精度越低^[27]。

2.3 实验设计与数据处理

对洞群影像进行目视解译,统计样地洞群数量。利用地理信息系统软件(ArcGIS10.5)在样地一和样地二分别创建 100m×100m 网格。以无人机影像四至为边界,剔除不满足 100m×100m 的网格单元,计算单位格网内洞群密度。根据布氏田鼠生活习性拟定 9 个环境指标^[13, 28],包括 5 月份 NDVI(bio1)、6 月份 NDVI(bio2)、7 月份 NDVI(bio3)、8 月份 NDVI(bio4)、9 月份 NDVI(bio5)、10 月份 NDVI(bio6)、海拔(bio7)、坡向(bio8)以及坡度(bio9),利用 GAM 分析环境变量和布氏田鼠越冬洞群选址之间潜在的关系。

3 结果与分析

3.1 越冬洞群密度提取与空间分布分析

目视解译结果表明,2 块样地中布氏田鼠越冬洞群数量存在明显差异。样地一有效格网数为 451 个,样地二为 472 个,共计 923 个,其中 730 个(79.1%)格网内含有洞群。样地一中洞群密度均值为 14.59 个/hm²,最大洞群密度为 53 个/hm²,分别是样地二的 2.86 倍(Mann-Whitney U-test: $Z = -12.259, P < 0.001$)和 1.39 倍(38 个/hm²)。洞群密度相对较高的格网(>20 个/hm²)在样地一中占 30.2%,而在样地二中仅占 3.4%,样地二,单位格网内洞群数量集中在 0—20 个,占样地二格网数的 96%(456/472)。空间分析表明,样地一洞群密度高的格网主要集中于样地中间至东北部区域,西部和东南部区域的洞群密度则相对较低;样地二北部和西部区域的洞群密度相对较高,而中部乃至南部大片区域洞群密度偏低。通过叠加全国植被类型图发现,样地一植被类型以大针茅为主,样地二植被类型除了大针茅,还有冰草、丛生小禾草等,且所占比例较高(表 1、图 2)。

3.2 指标提取及相关性分析

3.2.1 格网化分析不同洞群密度参数特征

利用 GIS 统计分析模块获取各网格 5—10 月份的植被指数(NDVI 值)、海拔、坡度、坡向数据,依据洞群密度等级获取对应格网内 9 种生境指标均值(表 2)。在 5—10 月植被指数(bio1—bio6)均呈现下降趋势,在洞群数量大于 20 个的格网内,各月份植被指数均值出现较大幅度下降。从海拔(bio7)来看,随着格网内洞群密度的增加,平均海拔出现上升趋势:洞群密度相对较高(>20 个/hm²)的格网平均海拔>908 m,而密度相对较低格网(<10 个/hm²)的平均海拔<905 m。通过对洞群分布坡向(bio8)的统计,越冬洞群主要集中在南坡,特别是西南阳坡洞群密度相对较高;对坡度(bio9)分析表明,相比于低密度和无洞群格网的低坡度(0.97°—1.03°),洞群密度相对高的格网地势起伏较大,平均坡度在 1.42°—1.54°间变化。

3.2.2 生境指标相关性分析

生境指标与洞群密度的关系分析表明,bio1(5 月 NDVI)和 bio2(6 月 NDVI)相关系数高于 0.7,其余变量

间的相关系数相对较小,说明变量之间不存在强相关性。因此,选择相关系数小于 0.7 的生境指标进行建模,以降低强相关性指标对模型造成的干扰,保证模型的稳定性。

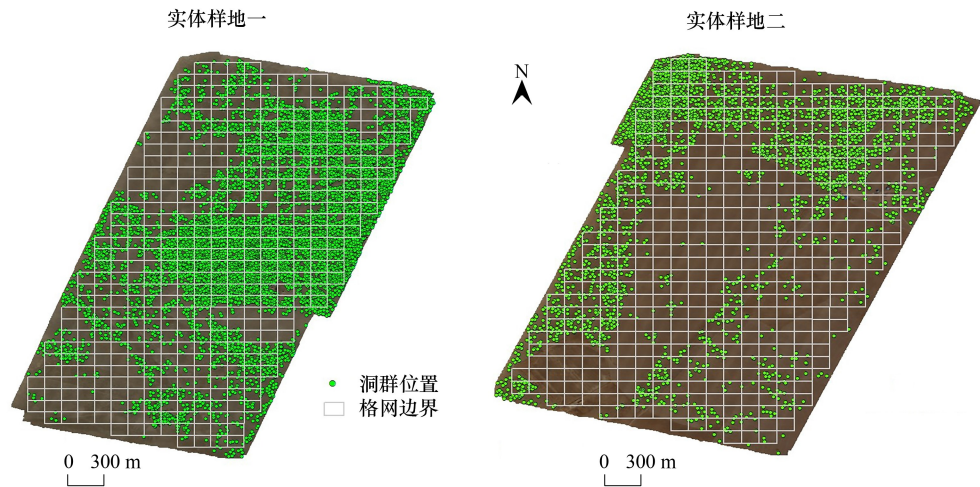


图 2 布氏田鼠越冬洞群目视解译
Fig.2 Visual interpretation of overwintering colonies of Brandt's vole

表 1 样地一和样地二布氏田鼠越冬洞群密度分析

Table 1 Density analysis of overwintering colonies of Brandt's vole in plots One and Two

参数 Parameter	等级 Rank	样地一 Plot One	样地二 Plot Two
植被组成 Vegetation composition		大针茅	大针茅、冰草、丛生小禾草
面积 Area/hm ²		588	614
格网数量 Grids number/个		451	472
洞群数量 The number of colonies/个		6581	2412
格网内洞群平均密度/(个/hm ²) The average density of colonies per grid		14.59	5.11
格网最高洞群密度/(个/hm ²) Maximum density of colonies per grid		53	38
不同洞群密度的格网数量/(个/hm ²) The number of grid in different ranges of colony density	0	51(11.3%)	142(30.1%)
	(0,10]	174(38.6%)	250(53.0%)
	(10,20]	90(20.0%)	64(13.6%)
	(20,30]	68(15.1%)	9(1.9%)
	(30,40]	47(10.4%)	7(1.5%)
	(40,50]	20(4.4%)	/
	>50	1(0.2%)	/

表 2 不同越冬洞群密度下格网内生境指标均值

Table 2 The average value of environmental factors in grids with overwintering colonies in different density

洞群密度等级 Density range	网格数/个 Grids number	bio1	bio2	bio3	bio4	bio5	bio6	bio7	bio8	bio9
0	193	0.1463	0.1805	0.3878	0.4771	0.3457	0.1668	904.65	217.04	1.03
(0,10]	424	0.1479	0.1824	0.3816	0.438	0.3376	0.1652	904.5	203.59	0.97
(10,20]	154	0.1474	0.1743	0.3799	0.4124	0.3254	0.1538	905.47	200.64	1.1
(20,30]	98	0.134	0.1595	0.3665	0.3867	0.3155	0.1389	908.37	181.25	1.54
(30,40]	131	0.1318	0.1539	0.3596	0.377	0.299	0.134	908.25	184.41	1.42
>40	21	0.1251	0.1484	0.3676	0.3639	0.2804	0.1297	908.21	218.14	1.52

bio1—bio6 代表 5—10 月的 NDVI, bio7、bio8 和 bio9 依次为海拔(m)、坡度(°)、坡向(°)

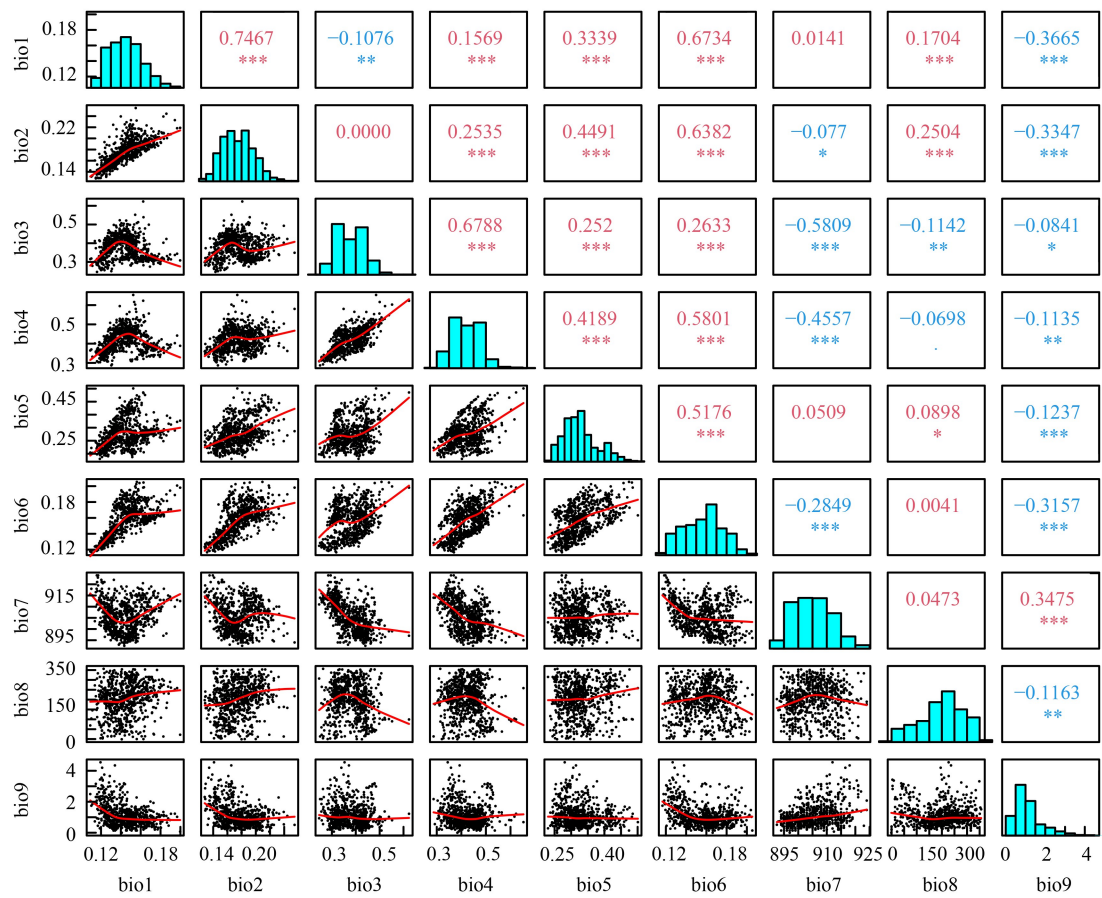


图 3 各指标间皮尔逊相关分析

Fig.3 Pearson correlation analysis between any two parameters

bio1—bio6 依次代表 5—10 月的 NDVI 值,bio7、bio8 和 bio9 依次代表样地内海拔(m)、坡度(°)、坡向(°);对角线表示生境指标的柱状图,散点图表示对角线上 2 个生境指标之间的关系。散点图的横坐标为上方或下方的变量,纵坐标对应左侧或右侧的变量,对角线右上部分为指标之间的相关系数和显著性水平;*: $P<0.05$, **: $P<0.01$, ***: $P<0.001$

3.3 生境因子对布氏田鼠越冬洞群空间格局的影响分析

在保证输出的 GAM 模型中各生境指标均达到显著($P<0.05$)水平的前提下(表 3),参考 GCV 和 AIC 值的大小选定最优模型,最终以洞群密度为因变量,以 bio1、bio5、bio6、bio7、bio8、bio9 为解释变量建模型($R^2 = 0.654$,模型拟合效果最好)。

表 3 布氏田鼠越冬洞群密度与生境指标的 GAM 模型拟合结果

Table 3 Analysis of GAM model between overwintering colonies density and environmental factors

平滑效应项 Smoothing effect term	估计自由度 Estimated degree of freedom	参考自由度 Reference degrees of freedom	F	P
bio1	5.365	6.574	13.384	$<2\times 10^{-16}$ ***
bio5	7.71	8.227	3.154	0.0019 ***
bio6	3.582	4.517	50.489	$<2\times 10^{-16}$ ***
bio7	2.531	3.207	10.547	1.29×10^{-6} ***
bio8	3.349	4.018	2.844	0.02146 *
bio9	1.000	1.000	7.492	0.00635 ***

bio1、bio5、bio6 分别代表 5 月、9 月和 10 月的 NDVI,bio7、bio8 和 bio9 依次代表样地内海拔(m)、坡度(°)、坡向(°)

模型中,6 种生境指标除 bio8 显著($P<0.05$)影响洞群分布外,其他指标都呈极显著($P<0.01$)影响。根据 F 值越大,重要性越强,可以得出 10 月份 bio6(NDVI)对布氏田鼠越冬洞群的空间分布具有极强的预示作用,

其余指标的重要性依次为 bio1(5 月 NDVI)>bio7(海拔)>bio9(坡向)>bio5(9 月 NDVI)>bio8(坡度)。

利用 GAM 模型拟合了 6 种环境变量与洞群密度的关系,分析表明洞群密度除与坡向(bio8)呈显著关系外($P<0.05$),与其他指标都呈极显著($P<0.01$)关系。

与 5 月份 NDVI(bio1)呈显著的非线性正相关,越冬洞群主要分布在 NDVI 介于 0.1—0.18 的区域;与 9 月份 NDVI(bio5)呈极显著非线性关系,洞群主要分布在 $0.25<\text{NDVI}<0.35$ 的区域;与 10 月份 NDVI(bio6)呈极显著负相关关系,洞群集中分布在 $0.12<\text{NDVI}<0.19$ 的区域(图 4)。

海拔(bio7)的变化与洞群密度的变化趋势更接近于直线,洞群集中分布在 895m—915m 的区域。坡向(bio8)对洞群密度的影响程度最低,显著性水平也最低,二者拟合曲线最平缓,洞群主要分布在西坡和南坡,在西南坡更为集中。坡度(bio9)与洞群密度呈显著正相关,主要分布在 0.3° — 1.6° 的缓坡上(图 4)。

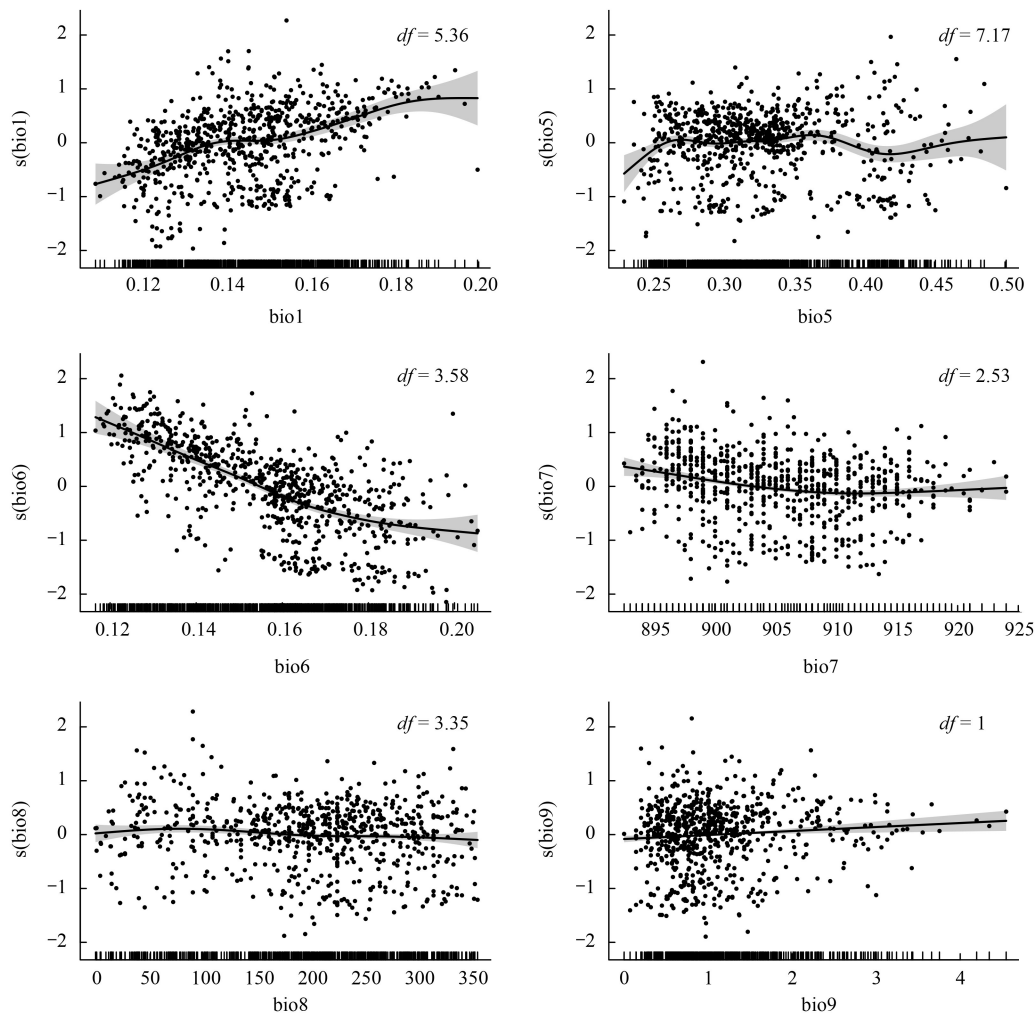


图 4 环境因子对布氏田鼠越冬洞群密度的影响效应分析

Fig.4 Effect analysis of environmental factors on density of overwintering colonyin Brandt's vole

bio1、bio5、bio6 表示 5 月、9 月和 10 月的 NDVI, bio7、bio8 和 bio9 依次代表样地内海拔(m)、坡度($^{\circ}$)、坡向($^{\circ}$);图中横坐标表示环境因子变化值,纵坐标表示环境因子对洞群密度对数值的拟合值;S 表示平滑函数;曲线代表解释变量对布氏田鼠洞群密度对数值的平滑拟合,曲线两侧灰色缓冲区表示拟合值的置信区间。估计自由度越接近 1,拟合曲线越接近直线;自由度越大,拟合曲线越弯曲

4 讨论

4.1 无人机提升了鼠迹调查效率

本研究表明,无人机监测布氏田鼠越冬洞群具有较高的效率。无人机监测鼠害在大沙鼠^[9, 12]、黄兔尾鼠

(*Eolagurus luteus*)^[29]、高原鼠兔^[13]和鼢鼠类^[30]上已有一些研究报道,但在布氏田鼠越冬洞群研究中还是首次。在本研究中,2块调查样地总面积约为6 km²,图像采集与分析时间为3个工作日,合计24 h,日调查与分析能力约为2 km²,这大大提高了调查效率。按传统堵洞开洞法操作,通过人工调查0.25 hm²样方内的24 h开洞数量,即有效洞口数用于鼠密度依据。这种调查方法3—4人为1组,2 d约调查10个样方(0.025 km²),就调查面积而言,效率仅为无人机调查的1/160。在高原鼠兔中也证明无人机的调查效率远高于传统方法,适用于大面积调查^[13]。无人机航拍与智能识别技术结合将进一步提升调查能力,该技术在其他草原鼠种中也有报道^[11,31]。我们已针对布氏田鼠的洞口特征筛选出合适的智能识别算法^[32],这为下一步构建更高效的调查技术奠定了基础。

4.2 植被类型对布氏田鼠越冬栖息地选择的影响

动物栖息地的选择受多种因素影响,如对食物、空间和配偶等资源的需求,逃避捕食风险,适宜的微环境与微气候、人类活动影响等,其目的都是为了维持生存和繁殖的需求^[33]。本研究表明,布氏田鼠在小尺度环境中倾向于集中在大针茅更多的草场区域越冬。之前地面调查也表明,布氏田鼠多栖息于针茅草原,尤其是冷蒿(*Artemisia frigida*)、多根葱(*Allium polyrhizum*)和糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)为优势植物的草场^[34];冷蒿、多根葱是布氏田鼠的喜食植物,而越冬洞群中的冷蒿生殖枝占据了储草量的60—95%,是其冬季栖息地选择的重要原因^[19]。然而,本研究未能同步开展地面植被采集,该结果有待进一步进行地面调查验证。

4.3 地表生物量对布氏田鼠越冬栖息地选择的影响

布氏田鼠越冬洞群高密度区域的植被指数(NDVI)在5—10月始终低于低密度区域,这可能与布氏田鼠喜栖于植被相对低矮的草场或开阔的草地有关。钟文勤等^[20]发现,布氏田鼠喜栖息于植被平均高度在16 cm以下低矮稀疏的环境,否则其种群增长就被显著抑制;蒋永恩等^[21]对中蒙两国316个样点分析,发现布氏田鼠倾向于选择放牧强度高、植被低矮的退化草场。本研究发现6个环境指标除坡度(bio9)与布氏田鼠洞群密度呈线性相关外,其余指标与洞群密度都呈非线性相关。这明确了洞群密度与生境指标之间的相关关系,并进一步分析出了影响布氏田鼠越冬区栖息地选择的主要生境指标的阈值范围。10月份NDVI(bio6)在模型中的重要性最高,此时洞群主要集中在0.12<NDVI<0.19的区域;且随着NDVI的增加,洞群密度出现极显著下降。成年布氏田鼠储草活动范围通常在20—30 m^[35],高密度洞群区田鼠的储草行为可能也是导致该区域NDVI偏低的原因之一。另外,5月份NDVI(bio1)和9月份NDVI(bio5)对布氏田鼠越冬区的选择也具有一定指示作用。洞群高密度区域5月份的NDVI主要集中在0.1—0.18之间,9月份则分布在0.25—0.35。之前研究表明,布氏田鼠最喜欢的植被盖度在15%—20%,低于5%则影响其觅食,而覆盖度和植被高度太高则会限制其行动^[19—20,34]。这些结果说明,NDVI值可以作为布氏田鼠洞群分布监测和预测的重要指标,鼠密度较高区域的NDVI值相对较低,二者呈现负相关关系。

4.4 微地形对布氏田鼠越冬栖息地选择的影响

在越冬洞群高密度区域的海拔高度也更高,这说明布氏田鼠倾向于选择地势较高的岗地作为越冬栖息的主要场所^[34]。微地形的变化会对水热条件进行再分配,影响地表生物量的变化,进而影响啮齿动物对栖息地选择^[9]。布氏田鼠洞群密度会随着海拔(bio7)的增加而逐渐下降,鼠洞洞群主要集中在895—915 m之间。洞群密度与坡向(bio8)密切相关,主要集中在南坡和西南向阳坡上,这可能与冬季寒风的主要风向有关。此外,本研究表明坡度(bio9)与洞群密度呈显著正相关线性关系,洞群主要集中在0.3°—1.6°的缓坡上。这些结果都在一定程度上验证了前人的地面研究^[19, 20, 34]。

5 结论

无人机近地遥感技术可以快速采集布氏田鼠洞群影像,实现大范围内的鼠害监测及空间特征分析。通过对生态因子的分析,主要获得2点结论:1)生长季地表生物量对布氏田鼠越冬栖息地的选址具有一定指示作用,布氏田鼠主要分布在NDVI相对较低的区域;2)微地形是影响布氏田鼠越冬栖息地选址的关键因素,布氏

田鼠喜欢在平均海拔相对较高(895m—915m)、面向南坡或西南的缓坡(0.3°—1.6°)上栖息越冬。

参考文献(References):

- [1] Burgin C J, Colella J P, Kahn P L, Upham N S. How many species of mammals are there? *Journal of Mammalogy*, 2018, 99(1): 1-14.
- [2] Shuai L Y, Wang L Q, Yang Y P, Zhang F S. Effects of density dependence and climatic factors on population dynamics of *Cricetulus barabensis*: a 25-year field study. *Journal of Mammalogy*, 2020, 101(2): 507-514.
- [3] Wilson M C, Smith A T. The pika and the watershed: the impact of small mammal poisoning on the ecohydrology of the Qinghai-Tibetan Plateau. *AMBIO*, 2015, 44(1): 16-22.
- [4] 郭正刚, 王倩, 陈鹤. 我国天然草地鼠害防控中的问题与对策. *草业科学*, 2014, 31(1): 168-172.
- [5] 高宏伟, 周艳秋, 满都呼, 付和平, 李明, 包永红. 基于 MapGIS 和植被数量指标的啮齿动物群落模拟专家系统的设计与实现. *中国草地学报*, 2022, 44(1): 87-94.
- [6] 花立民, 柴守权. 中国草原鼠害防治现状、问题及对策. *植物保护学报*, 2022, 49(1): 415-423.
- [7] 郭永旺, 王登. 鼠害管理技术. 北京: 中国农业出版社, 2018.
- [8] 刘晓辉. 中国鼠害防控需求的差异、矛盾、挑战与对策. *植物保护学报*, 2022, 49(1): 407-414.
- [9] 马涛, 郑江华, 温阿敏, 陈梦, 刘忠军. 基于 UAV 低空遥感的荒漠林大沙鼠洞群覆盖率及分布特征研究—以新疆古尔班通古特沙漠南缘局部为例. *生态学报*, 2018, 38(3): 953-963.
- [10] 李华宇, 董建国, 赵亚冰, 周波, 田葆萍, 陈宏卫, 常菁华. 草原大面积灭鼠对草原鸟类数量变化的影响. *中国地方病防治杂志*, 2013, 28(2): 114-115.
- [11] 花蕊, 周睿, 包达尔罕, 董克池, 唐庄生, 花立民. 基于旋翼无人机低空遥感的高原鼠兔危害等级划分技术研究. *草业学报*, 2022, 31(4): 165-176.
- [12] 马涛, 郑江华, 温阿敏, 陈梦, 穆晨. 基于无人机低空遥感的荒漠林大沙鼠洞分布与地形的关系—以新疆古尔班通古特沙漠南缘局部为例. *林业科学*, 2018, 54(10): 180-188.
- [13] 徐凯, 吕志岗, 张卓然, 王永鲜, 袁帅, 武晓东, 付和平. 乌拉特荒漠草原啮齿动物群落特征及物种空间生态位. *草原与草业*, 2020, 32(2): 32-37.
- [14] 郭乾伟, 袁帅, 杨素文, 纪羽, 付和平, 武晓东, 张卓然, 马崇勇, 金国. 布氏田鼠种群密度对不同放牧方式及植被变化的响应. *草原与草业*, 2020, 32(3): 34-39.
- [15] 旭日干. 内蒙古动物志 第五卷 哺乳纲(啮齿目 兔形目). 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 2016.
- [16] 周延林, 侯希贤, 董维惠, 杨玉平. 布氏田鼠种群动态预测初报. *中国媒介生物学及控制杂志*, 1991, 2(4): 245-248.
- [17] 朱相兵, 毕玉革, 刘浩, 皮伟强, 张锡鹏, 邵宇龙. 基于高光谱遥感的荒漠草原鼠洞识别方法研究. *土壤通报*, 2020, 51(2): 263-268.
- [18] 张知彬, 王祖望. 农业重要害鼠的生态学及控制对策. 北京: 海洋出版, 1998.
- [19] 施大钊. 低数量期布氏田鼠在不同季节中对生境的选择及影响因素的研究. *兽类学报*, 1986, 4(6): 287-296.
- [20] 钟文勤, 周庆强, 王广和, 孙崇璐, 周丕义, 刘文智, 贾永平. 布氏田鼠鼠害生态治理方法的设计及其应用. *兽类学报*, 1991, 11(3): 204-212.
- [21] 蒋永恩, Enkhbold. Nanj, Nyamdorj. Batsaikhan, 王登, 易津, 乌仁其木格, 单丽燕, 杜桂林, 施大钊. 布氏田鼠栖息地特征的研究. *草地学报*, 2012, 20(1): 179-182.
- [22] 谷祥辉, 张英, 桑会勇, 翟亮, 李少军. 基于哨兵 2 时间序列组合植被指数的作物分类研究. *遥感技术与应用*, 2020, 35(3): 702-711.
- [23] 李丽霞, 郜艳晖, 周舒冬, 邹宗峰, 张琰. 广义加性模型及其应用. *中国卫生统计*, 2007, 24(3): 243-244.
- [24] Li R Y, Xu L, Bjørnstad O N, Liu K K, Song T, Chen A F, Xu B, Liu Q Y, Stenseth N C. Climate-driven variation in mosquito density predicts the spatiotemporal dynamics of dengue. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116(9): 3624-3629.
- [25] Xu L, Liu Q Y, Stige L C, Ben Ari T, Fang X Y, Chan K S, Wang S C, Stenseth N C, Zhang Z B. Nonlinear effect of climate on plague during the third pandemic in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(25): 10214-10219.
- [26] 张西阳, 宁曦, 莫雅茜, 桂端, 刘建昌, 陈红英, 吴玉萍. 基于广义可加模型的珠江口中华白海豚栖息地偏向性研究. *四川动物*, 2015, 34(6): 824-831.
- [27] 欧阳芳, 戈峰. 基于广义可加模型的昆虫种群动态非线性分析及 R 语言实现. *应用昆虫学报*, 2013, 50(4): 1170-1177.
- [28] 李培先, 郑江华, 倪亦非, 吴建国, 吾买尔·吾守, 艾合买江·阿吉, 那松曹克图. 阿尔金山草地鼠害发生区及鼠荒地面积遥感估算. *新疆农业科学*, 2016, 53(7): 1346-1355.
- [29] 轩俊伟, 郑江华, 倪亦非, 穆晨. 基于动力三角翼平台的草原鼠害遥感监测研究. *中国植保导刊*, 2015, 35(2): 52-55.
- [30] 赵晓庆, 杨贵军, 杨浩, 徐波, 王艳杰. 基于无人机遥感数据的内蒙古草原鼠洞数字化检测. *第四届中国草业大会论文集*, 2016, 257-265.
- [31] 崔博超, 郑江华, 刘忠军, 马涛, 沈江龙, 赵雪迷. 无人机遥感影像的 YOLOv3 鼠洞识别技术. *林业科学*, 2020, 56(10): 199-208.
- [32] Du M Z, Wang D W, Liu S P, Lv C Y, Zhu Y P. Rodent hole detection in a typical steppe ecosystem using UAS and deep learning. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 992789.
- [33] Johnson D H. The comparison of usage and availability measurements for evaluating resource preference. *Ecology*, 1980, 61(1): 65-71.
- [34] 内蒙古锡林郭勒盟卫生防疫站. 布氏田鼠的生态研究. *动物学报*, 1975, 21(1): 30-39.
- [35] 施大钊. 越冬前布氏田鼠(*Microtus brandti*) 储草行为与储草种类选择的研究. *草地学报*, 1997, 5(1): 20.