



研究论文 ORIGINAL PAPERS

春秋季节狍三维栖息地
选择和营养策略研究林梦飞¹, 张涛涛¹, 于兵¹, 季晓宇¹, 韦瑞涛¹,
黄保祥¹, 郝元朔², 关艳辉³, 郭世贤³, 包衡^{1,4,*}, 姜广顺^{1,4,5*}

- (1. 东北林业大学野生动物与自然保护地学院, 哈尔滨 150040;
2. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040;
3. 黑龙江小北湖国家级自然保护区管理局, 宁安 157400;
4. 国家林业和草原局猫科动物研究中心 (东北林业大学), 哈尔滨 150040;
5. 东北亚生物多样性研究中心 (东北林业大学), 哈尔滨 150040)

稿件运行过程

收稿日期: 2025-01-14

修回日期: 2025-02-05



关键词: 狍;

季节性变化;
无人机激光雷达;
三维栖息地选择;
营养策略

Keywords: Siberian roe deer (*Capreolus pygargus*);
Seasonal variation;
UAV LiDAR;
Three-dimensional habitat selection;
Nutritional strategy

中图分类号: Q958.1

文献标志码: A

文章编号:

2310-1490(2026)-02-0198-10

DOI: 10.12375/ysdwxb.202501006

摘要

狍(*Capreolus pygargus*)是我国温带森林生态系统中常见的有蹄类动物,适宜的栖息地和营养策略对其生存与繁殖至关重要。近年来,利用无人机搭载激光雷达技术探究野生动物的三维栖息地结构和食物资源选择模式已成为动物生态学研究的前沿。本研究于2023年10月—2024年4月,利用无人机搭载激光雷达获取森林的垂直和水平结构信息,结合红外自动触发相机监测狍的空间分布,并通过地面植被样方调查获取不同季节中狍可摄取食物的资源分布情况,量化其营养空间分布。在此基础上,采用广义可加模型(GAM)分析不同季节狍栖息地选择如何受三维栖息地结构、营养空间分布的协同影响。结果表明:狍在春秋季节的栖息地选择模式存在显著差异。春季,狍偏好选择中等单木数量的阳坡;而秋季则偏好选择垂直复杂度指数较高、单木数量较少的阳坡。在营养策略上,狍春季偏好选择碳水化合物含量较高的区域,而秋季则偏好选择蛋白质资源丰富的区域。本研究通过应用无人机激光雷达技术及营养生态学理论,突破了传统二维分析无法全面表征栖息地复杂性的局限,揭示了三维栖息地结构下野生动物的营养选择策略,对于野生动物的精准保护和管理具有重要科学价值。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF1305000);国家自然科学基金青年科学基金项目(32100392)

第一作者简介: 林梦飞(1998—),男,硕士研究生;主要从事野生动物保护与利用研究。E-mail: 1350990796@qq.com

* 通信作者: 包衡, E-mail: baoheng1990@163.com; 姜广顺, E-mail: jgshun@126.com

Study on the Three-Dimensional Habitat Selection and Nutritional Strategy of Siberian Roe Deer in Spring and Autumn

LIN Mengfei¹, ZHANG Taotao¹, YU Bing¹, JI Xiaoyu¹, WEI Ruitao¹, HUANG Baoxiang¹,
HAO Yuanshuo², GUAN Yanhui³, GUO Shixian³, BAO Heng^{1,4*}, JIANG Guangshun^{1,4,5*}

(1. College of Wildlife and Protected Area, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;

2. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;

3. Heilongjiang Xiaobeihu National Nature Reserve Administration, Ning'an 157400, China;

4. Feline Research Center of National Forestry and Grassland Administration, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;

5. Northeast Asia Biodiversity Research Center, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: The Siberian roe deer (*Capreolus pygargus*) is a common ungulate species, and its habitat and dietary selection strategies play an important role in its growth and reproduction. Recently, investigating habitat and food resource selection patterns of wildlife within a three-dimensional spatial structure is a frontier topic in ecology, offering significant scientific value for fine-scale conservation and management. From October 2023 to April 2024, this study utilized unmanned aerial vehicle (UAV) LiDAR technology to acquire vertical and horizontal forest structure information, monitored the spatial distribution of Siberian roe deer was monitored using camera-trapping, and ground-based vegetation sampling was conducted to investigate the distribution of food resources accessible to Siberian roe deer across different seasons. By quantifying the nutritional spatial distribution for Siberian roe deer, generalized additive models (GAM) were employed to analyze how habitat selection in different seasons was influenced by the synergistic effects of three-dimensional habitat structure and nutritional spatial distribution. The results revealed significant seasonal differences in Siberian roe deer habitat selection. In spring, Siberian roe deer select sunny slopes with a moderate number of individual trees, while in autumn, they choose sunny slopes with a higher vertical complexity index and a smaller number of individual trees. Regarding nutritional strategies, Siberian roe deer preferred areas with higher carbohydrate availability in spring and higher protein availability in autumn. By integrating UAV LiDAR technology and nutritional ecology theory, this study overcomes the limitations of traditional two-dimensional analyses, which cannot fully capture habitat complexity, and reveals the nutritional strategies of wildlife within three-dimensional habitats. The findings provide valuable scientific insights for the precise conservation and management of wildlife.

野生动物生存在三维的栖息地环境中,其栖息地选择受森林三维结构特征的显著影响。动物对森林垂直和水平结构的异质性具有高度响应能力,有研究表明哺乳动物对反映森林垂直和水平特征的协变量最为敏感,并倾向于主动选择结构更为复杂的生境^[1-2]。其中,垂直结构体现了垂直植被剖面中的层次分布,而水平结构则反映了植被在森林水平维度上的空间格局^[3]。但是传统方法在测量三维结构时存在明显局限,难以高效、精细地获取森林三维结构数据,且需要耗费大量的人力物力。激光雷达

(light detection and ranging, LiDAR)作为一种相对较新的主动遥感技术,通过发射和接收高频、短脉冲的激光信号,能够以高密度点云的形式描述环境或物体三维特征和结构,实现了从树枝到景观尺度的多级空间范围内森林三维结构信息的准确捕捉^[4]。搭载在小型无人机上的激光雷达因灵活性和低成本优势在近些年发展得更迅速^[5],在描述野生动物栖息地特征和结构方面具有巨大潜力^[6-7]。通过无人机激光雷达可以量化森林垂直和水平结构的差异,并衍生出一系列三维结构指标,如垂直复杂度指数

(vertical complexity index, VCI)^[8]、叶面积指数(leaf area index, LAI)^[9]、冠层覆盖率(canopy cover, CC)和间隙率(gap fraction, GF)等,从而为在三维空间尺度上研究野生动物栖息地选择提供重要的技术支撑。

野生动物栖息地选择不仅依赖于三维栖息地环境,也高度依赖于食物资源的可获得性与质量,后者同样是决定动物栖息地选择和种群分布的关键因素^[10-11]。野生动物通过摄取适宜的营养资源来维持个体生长^[12]、繁衍和存活^[13]。森林环境的异质性直接影响着食物资源的空间分布,而不同食物资源在营养组成上存在显著差异,特定营养素的摄入量和机体需求之间的匹配程度,会深刻影响动物的生理表现及其在变化环境中资源的分配策略。研究表明,野生动物不仅根据能量需求选择食物,还会在食物中寻找特定的营养资源优先获取特定的营养成分以满足生理需求^[14]。例如,马达加斯加的冕狐猴(*Propithecus diadema*)在资源匮乏时倾向选择高蛋白食物,而在食物充足季节则更多摄入富含碳水化合物和脂肪的食物^[15];加拿大艾伯塔省中西部的棕熊(*Ursus arctos*)在秋季主要以高碳水化合物的浆果和水果为食,而在春季则优先摄取高蛋白质的食物,如有蹄类动物和植物根茎,通过动态调整宏量营养素的摄入比例来应对季节性的营养需求变化^[16]。因此,在精细空间尺度上准确描述动物的三维栖息地结构,并同步量化食物资源质量、数量的空间分布,对于揭示驱动野生动物栖息地选择和营养资源选择内在机制十分重要。

狍(*Capreolus pygargus*)属于鲸偶蹄目(Cetartiodactyla)鹿科(Cervidae)狍属(*Capreolus*)^[17],是东北虎(*Panthera tigris altaica*)的主要猎物之一^[18],也是中国东北林区数量较多的中型林栖有蹄类动物,在温带森林生态系统中发挥着重要的生态作用。动物的营养资源选择策略受多种因素调控,包括食物可获得性、营养成分、摄食效率^[19]及营养空间分布格局。本研究应用无人机激光雷达技术,结合红外相机监测种群分布和地面植被样方调查食物资源,量化春秋两季狍的三维栖息地结构和营养空间分布,并围绕以下3个科学问题展开:(1)春秋两季三维栖息地结构是否存在显著差异?(2)春秋两季营养空间分布是否存在显著差异?(3)春秋两季狍的三维栖息地选择和营养策略是否存在差异?通过回答以上问题,旨在揭示三维栖息地结构与营养资源如何协同影响狍的季

节性栖息地选择策略。

1 材料与方法

1.1 研究区概括

本研究在黑龙江小北湖国家级自然保护区及其周边区域(44° 03' 16"—44° 20' 26"N, 128° 27' 14"—128° 49' 32"E)(以下简称“小北湖保护区”)展开。该保护区位于黑龙江省张广才岭中段^[20],南北长28 km,东西宽17 km,总面积为20 834 hm²,其中核心区7 318 hm²、缓冲区6 903 hm²、实验区6 613 hm²。小北湖保护区属于牡丹江上游重要的火山地貌湿地生态系统,火山口及其周边地区生长着红松针阔叶混交林,属森林与陆生野生动物类型的保护区。全区海拔为360~1 260 m,平均海拔为810 m,其主要保护对象是以东北虎为主的野生动物及其栖息地。

1.2 数据采集

1.2.1 红外相机数据

在小北湖保护区内按照2 km × 2 km的网格架设了100台自动红外相机陷阱(2020年一至今),相机优先布设在网格内野生动物频繁活动的兽径及土道旁,以最大限度地提高捕获率^[21],相机镜头方向避开日出与日落方位,以避免强光直射导致照片模糊,相机架设完成后记录相机点经纬度坐标。为监测狍的空间分布,同时保持数据源的空间一致性,本研究从中选取了40个与植被样方及无人机激光雷达监测区相匹配的相机位点进行分析(图1)。基于2020—2022年累积的监测数据,提取每年3—5月(春季)和9—11月(秋季)的相机数据,用以分析狍春、秋两季的栖息地利用模式。由于个别相机数据不完整,为保障数据可靠性予以剔除,最终春季和秋季的实际样本量分别为30、38个。

1.2.2 植被样方调查数据

为量化狍的食物资源分布,以40个有效相机位点为中心设置了植被调查样方。样方设置为30 m × 30 m,记录样方4角的经纬度坐标后,对样方内乔木(树高>2 m,胸径≥5 cm)的种类和数量进行普查。在此基础上,于每个大样方的4角和中心位置各设置一个2 m × 2 m的小样方,记录狍能够觅食的最高高度到地面的灌木(高度0.5~2.0 m,胸径<5 cm)种类和数量、草本(高度<0.5 m)种类和数量等信息。记录完信息后采集植物样本并称鲜质量,装入

档案袋中,再记录植物名称、采集地点、样本质量、档案袋自重和采集时间等信息。调查时间为2020年

10月(秋季)和2021年4月(春季),以确保与后续分析的季节相对应。植被样方空间分布见图1。

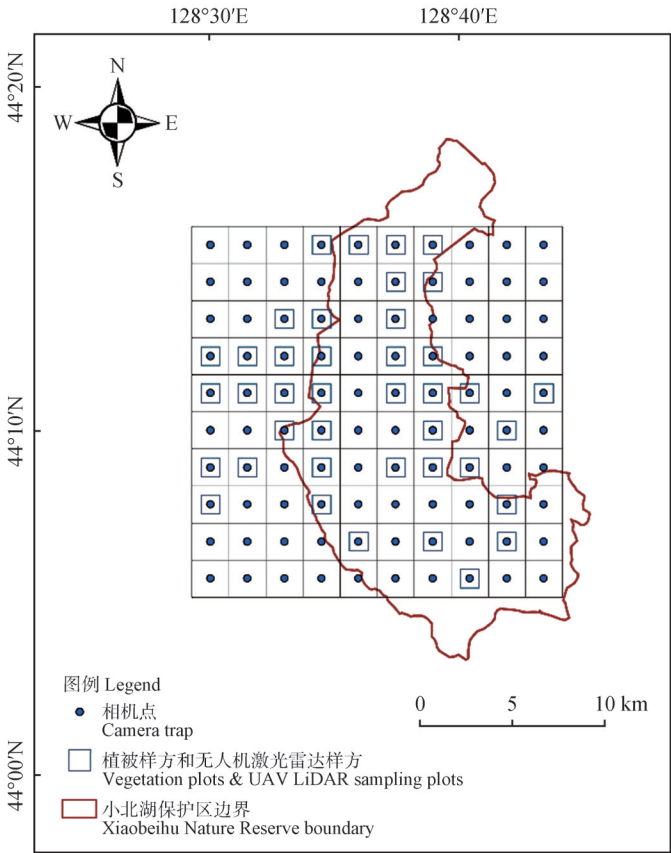


图1 研究区各类样方的空间分布

Figure 1 Spatial distribution of various sampling plots in the study area

1.2.3 无人机激光雷达数据

为获取高精度的森林三维结构信息,分别在2023年10月(秋季)和2024年4月(春季)采用飞马无人机D2000S搭载D-LiDAR500传感器,采集无人机激光雷达数据。数据采集时参数设置见表1。激光雷达飞行区域尺寸为500 m×500 m,每个季节在植被样方上方采集40个样方,面积为1 000 hm²。样方的空间分布见图1。

1.3 数据处理

1.3.1 红外相机数据处理

狍的种群密度采用随机相遇模型(random encounter model, REM)进行估算。该模型基于气体碰撞理论,假设动物的移动和相机的探测均是随机的,在一段时间内的捕获频率与种群密度、动物活动范围和相机探测范围相关,无需标记或辨别个体,即可利用相机捕获率来估计物种密度^[22-23]。公式为

表1 无人机激光雷达数据采集参数

Table 1 UAV LiDAR data acquisition parameters

参数 Parameter	描述 Description
飞行高度 Flight height	90 m
飞行速度 Flight speed	8 m/s
平均点云密度 Average point cloud density	476 points/m ²
航线间距 Flight line spacing	42 m
旁向重叠率 Side overlap ratio	76%
回波数 Number of returns	3

$$D_i = \frac{y_i}{t} \frac{\pi}{v_i r (2 + \theta)}。$$

式中: D_i 为目标物种*i*的密度(只/km²),即每单位面积内的个体数量; t 为相机监测时长(d); y_i 为每次取

样 t 时长物种 i 的独立事件数(次); v_i 为物种 i 的每日移动速度,即日活动距离(km/d); r 为红外相机的监测半径(km); θ 为红外相机的架设监测角度($^{\circ}$)。其中,物种的日活动距离参考文献[24],以确保估算结果的可靠性和可用性。

1.3.2 植被样方数据处理

将在植被样方中采集的植物样本转移至实验室进行营养成分分析。粗蛋白含量采用凯氏定氮法测定,使用FOSS Kjelttec 8400分析仪(FOSS,丹麦),通过样品消化、蒸馏和滴定等步骤计算氮含量并换算为粗蛋白含量。粗脂肪含量采用索氏抽提法测定,使用索氏提取器(BUCHI,瑞士),称取0.5 g干燥样品,以乙醚为溶剂,萃取后经挥发、烘干及冷却处理后再次称质量,通过质量差计算脂肪含量,实验过程设置空白对照以校正结果。碳水化合物含量采用纤维分析法计算^[25],使用ANKOM 2000i全自动纤维分析仪(ANKOM Technology,美国)依次测定植物样本的中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)、酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)和酸性洗涤木质素(acid detergent lignin, ADL)含量,进而计算得出碳水化合物含量。

根据前期暴食性研究成果^[26],将本研究所记录的植物鉴定到属水平,并选取在暴食食物组成中贡献度前60%的植物物种进行分析。尽管后40%的植物物种可能在某些特殊环境或时间段内(如在资源

稀缺的季节)对獾有重要的补充作用,但从统计学和研究的可行性角度考虑,前60%的植物物种已能覆盖獾所需的关键营养需求,因此后40%的植物物种对总体研究结果的影响相对较小,故未选取。结合植被样方中统计的各植物物种中的蛋白质、脂肪和碳水化合物的含量,以及植被样方中统计的各植物物种数量,计算獾在各样方内的可利用营养资源总量,量化獾营养空间分布。

1.3.3 无人机激光雷达数据处理

对原始激光雷达点云进行拼接、去噪等预处理,并按植被样方的四角坐标裁取30 m $\times$ 30 m的尺寸,以保证激光雷达数据和植被样方在位置上保持一致。基于预处理后的点云,利用R语言中的lidR包生成数字高程模型(digital elevation model, DEM)和数字表面模型(digital surface model, DSM),后者减去前者得到冠层高度模型(canopy height model, CHM)。在此基础上,采用局部最大值滤波算法进行树冠探测,并结合区域生长算法进行单木分割,统计样方内的单木数量、最大树高、平均树高及平均冠幅面积。此外,对原始点云进行高度归一化并计算样方内点云的垂直复杂度指数、叶面积指数、间隙率及植被覆盖度,通过DEM地形数据提取样方内的坡度、坡向及海拔等地形因子。最后得到三维森林结构因子及其方法描述^[27](表2)。

表2 无人机激光雷达提取的三维森林结构因子

Table 2 Three-dimensional forest structure factors derived from UAV LiDAR

指标名称 Index name	描述 Description
垂直复杂度指数 Vertical complexity index, VCI	基于信息熵的森林垂直结构复杂性量化指标,值越高表明垂直分层越复杂
叶面积指数 Leaf area index, LAI	单位地面面积上叶片的总面积,值越高,植被越密集
间隙率 Gap fraction, GF	地面上未被植被覆盖区域的比例,通常用来衡量植被覆盖的稀疏程度,值越高,地面暴露的面积越大,冠层越稀疏
植被覆盖度 Canopy cover, CC	地面被植被覆盖的比例,值越高,冠层越密集,植被覆盖程度越高
灌木占比 Shrub fraction, SF	植被中低矮灌木层的覆盖比例,即点云高度低于1.7 m的点在整个空间中的占比
森林覆盖率 Forest coverage, FC	植被中高大乔木在整个植被中的覆盖比例,即点云高度高于10 m的点在整个空间中的占比,可反映森林的结构和成熟度
单木数量 Number of trees	样方内树木的总株数
最大树高 Maximum tree height	样方内最高树木的高度
平均树高 Average tree height	样方内所有树木的平均高度
平均冠幅面积 Average canopy area	样方内所有树冠的平均投影面积
坡度 Slope	样方内的平均地形坡度
坡向 Aspect	样方坡面的平均朝向
海拔 Elevation	样方的平均海拔

2 结果

2.1 春秋季三维栖息地结构差异

春秋季的三维栖息地结构参数比较结果显示,垂直复杂度指数在秋季高于春季,表明秋季森林的垂直分层结构更加复杂;单木数量在春季显著高于秋季;灌木占比在秋季低于春季;间隙率在秋季显著

低于春季;而平均冠幅面积在秋季显著高于春季。此外,森林覆盖率、叶面积指数和植被覆盖度均在秋季显著提升,反映出秋季植被具有高覆盖、多层次的特点。相较之下,海拔、坡度和坡向等地形属性在季节间无明显变化,平均树高和最大树高亦未随季节变化出现显著差异(图2)。

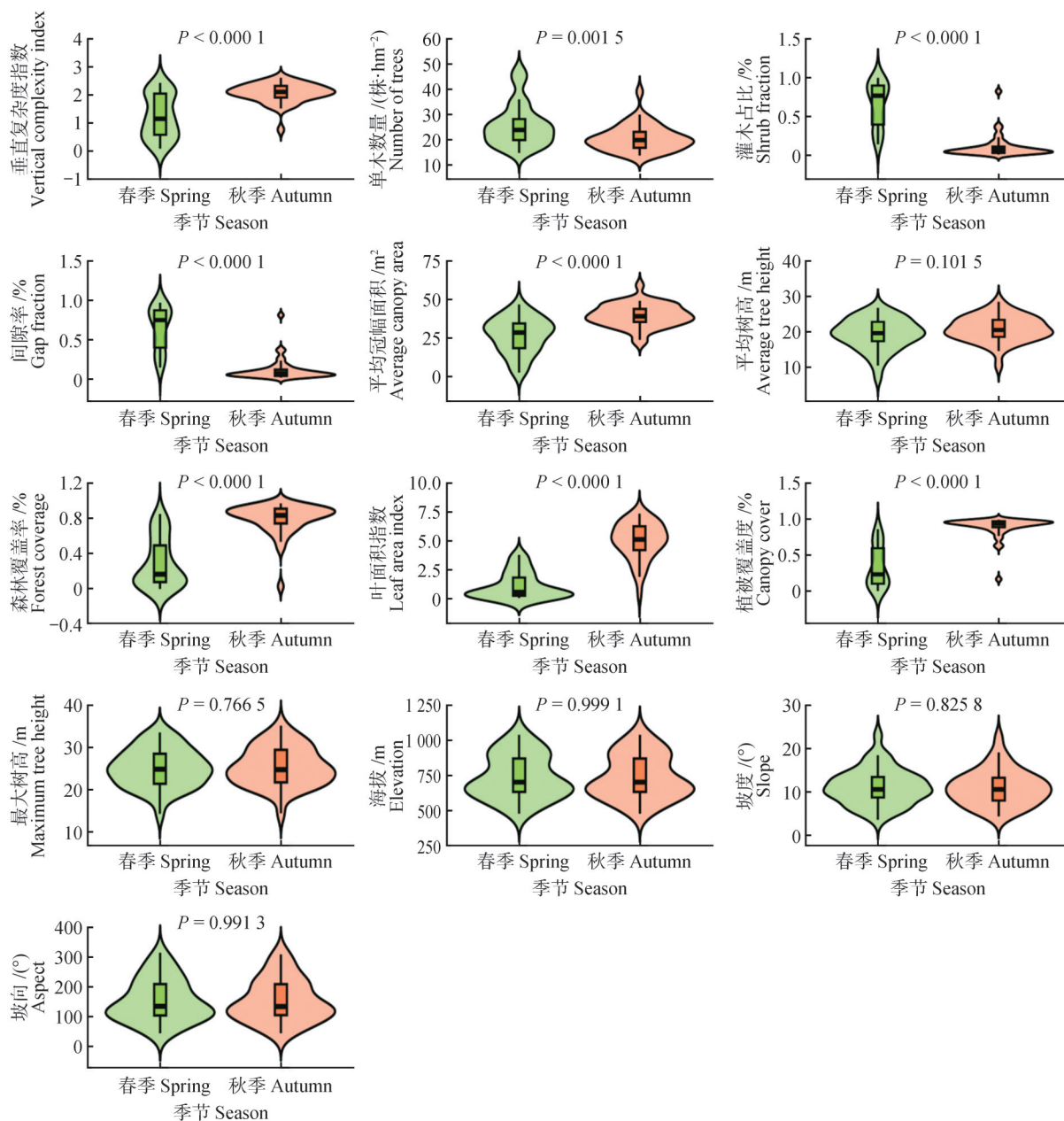


图2 基于无人机激光雷达提取的孢春秋季三维栖息地结构因子的差异

Figure 2 Comparison of three-dimensional habitat structure differences of Siberian roe deer between spring and autumn in data acquired by UAV LiDAR

2.2 春秋季营养空间分布差异

对春秋两季孢可利用的3种主要营养成分(蛋白质、碳水化合物与脂肪)进行归一化处理,其空

间分布表现出明显的季节性差异(图3)。小提琴图直观显示,3种营养资源的可获得性在秋季均高于春季。具体而言,秋季孢可利用的蛋白质营养资源分

布范围更宽,尤其在较高值区更为分散,波动性高于分布集中且近似对称的春季。碳水化合物的分布在春季呈明显偏态,而至秋季其数值范围显著扩大,整

体水平提升。脂肪含量在秋季同样表现出更宽的分 布范围和更高的数值集中区间,与春季相对集中的 分布形成对照。

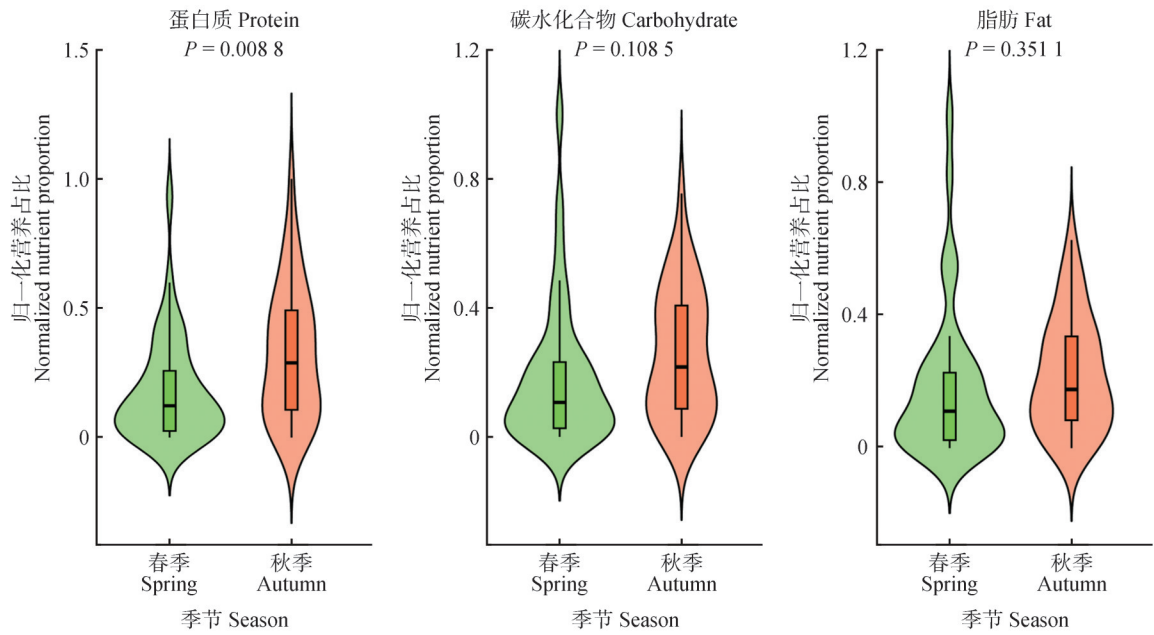


图3 春秋季孢可利用营养空间归一化后分布差异

Figure 3 Comparison of normalized nutritional of available nutritional space for Siberian roe deer between spring and autumn

2.3 春秋季孢三维栖息地选择与营养策略

结合春秋季孢的三维栖息地结构数据和营养空间分布数据得到春秋季孢的三维栖息地选择和营养策略。结果表明:春季影响孢三维栖息地选择和营养策略的主要因子为单木数量、坡向、海拔和碳水化

合物($R^2 = 0.41$, $AIC = 430.88$),秋季影响孢三维栖息地选择和营养策略的主要因子为垂直复杂度指数、单木数量、坡向和蛋白质($R^2 = 0.47$, $AIC = 371.96$)。两个季节的最优GAM模型及其参数见表3,其中秋季模型具有更高的拟合优度与更低的AIC值。

表3 运用广义可加模型(GAM)获得不同季节下三维栖息地结构和营养空间分布对孢的协同影响的最优模型

Table 3 Optimal model of the synergistic effects of three-dimensional habitat structure and nutrient spatial distribution on Siberian roe deer in different seasons using generalized additive model (GAM)

季节 Season	最优模型 The optimal model	样本量 Sample size	K	R ²	AIC
春季 Spring	孢物种密度 = 单木数量 + 坡向 + 海拔 + 碳水化合物	30	4	0.41	430.88
秋季 Autumn	孢物种密度 = 垂直复杂度指数 + 单木数量 + 坡向 + 蛋白质	38	4	0.47	371.96

GAM分析表明,孢物种密度显著受三维栖息地结构和营养因子的协同调控。各季节驱动因子及其响应模式如图4所示。春季(图4(a)),孢物种密度主要受单木数量(偏好中密度)、坡向(偏好阳坡)、海拔(显著正相关)和碳水化合物(显著正相关)的极显著影响($P < 0.001$),同时随海拔升高趋于稳定。秋季(图4(b)),栖息地结构作用明显,孢偏好垂直复杂度适中且单木数量较低的阳坡生境;营养需求则由春季的碳水化合物转向蛋白质,与后者呈极显著非线性正相关($P < 0.001$)。

3 讨论

3.1 孢三维栖息地结构的季节差异

本研究表明,孢三维栖息地结构在春秋两季存在显著差异。秋季的垂直复杂度指数、平均冠幅面积、森林覆盖率、叶面积指数和植被覆盖度均显著高于春季,这些差异可能源于秋季植物生长的成熟期特征,包括叶片和枝叶等覆盖物的显著增加。森林垂直结构复杂性的提高会增加生态位空间,从而促进植物多样性^[28-29],这不仅为孢提供了更丰富的微

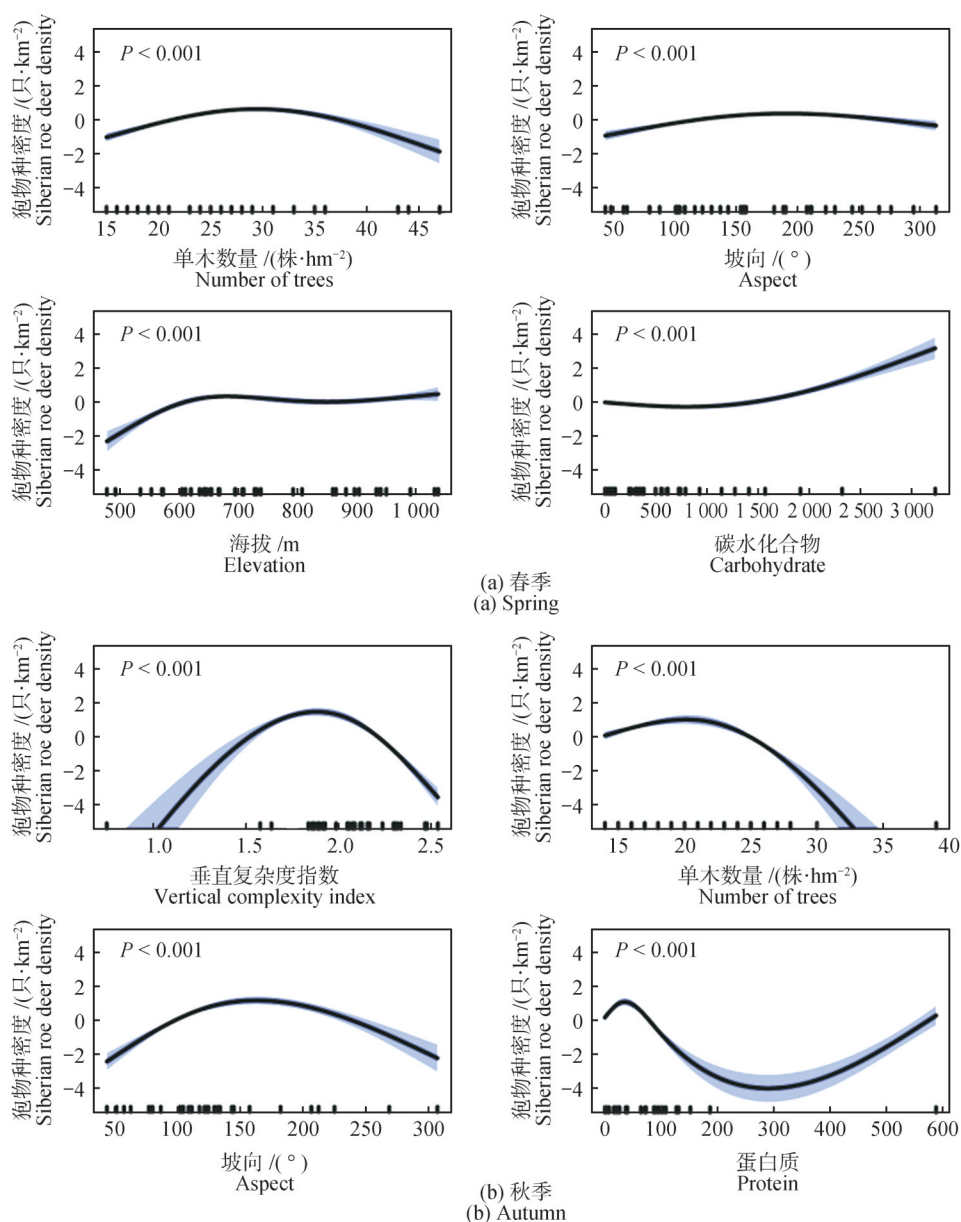


图4 基于广义可加模型的春季(a)与秋季(b)三维栖息地结构和营养空间分布对狍的协同影响

Figure 4 Synergistic effects of three-dimensional habitat structure and nutrient spatial distribution on Siberian roe deer in spring (a) and in autumn (b) based on a generalized additive model

生境和营养资源,也增强了其躲避天敌的隐蔽条件。这些结构复杂性的增强可能是秋季狍倾向选择更加复杂垂直生境的主要原因,这些区域有助于满足其适应季节性行为的需求,如食物储备和能量积累。另一方面,地形属性如海拔、坡度和坡向未随季节变化而发生显著变化,这与地形要素相对稳定的自然属性相符。值得注意的是,春季单木数量增加可能与秋季较高的冠层覆盖对下层小型树木的遮蔽效应有关,春季较高的间隙率可能与秋季落叶后至春季新叶尚未完全展叶有关,这进一步反映了季节性植被特征^[30]。

3.2 狍三维栖息地营养空间的季节差异

本研究发现,狍可利用的蛋白质、碳水化合物和脂肪3种营养资源的空间分布在春秋两季存在显著差异。秋季所有营养资源的整体水平和分布范围均显著高于春季,表明秋季为狍提供了更丰富的营养资源^[31]。这一趋势与三维栖息地结构反映出的秋季植被覆盖度较高、植被生物量更大的特征是一致的。春季草本植物和灌木处于生长期,植被覆盖度低,导致食物资源相对匮乏;而秋季植被经过生长期的积累,不仅草本和灌木生物量显著增加,种子等高能量食物资源也更为充足。通过三维栖息地结构参数的

变化也能间接反映出季节性食物资源分布变化带来的营养空间分布的趋势,即秋季营养资源更为丰富。例如,较高的叶面积指数和平均冠幅面积反映了更高的植物生物量及资源多样性,这直接反映在营养空间分布的差异上,这些都为狍的营养策略提供了支持。

3.3 狍三维栖息地选择与营养策略的季节差异

本研究结果表明,三维栖息地结构是驱动狍季节性栖息地选择的关键因素,但其选择模式存在显著的季节差异。春季,狍倾向选择中等树木密度的阳坡。此类生境光照充足,促进了草本植物和嫩枝的生长,从而为狍提供了丰富的碳水化合物资源。此外,中等树木密度的栖息地结构也为其提供了必要的隐蔽性^[32-34]。秋季时,狍的选择策略转变为偏好选择树木数量较少但垂直复杂度较高的阳坡。这种结构可能通过增加林下光照来提升下层植被的多样性与生物量,进而为狍提供更充足的蛋白质营养。此外,此类生境在提供遮蔽的同时可能还具有更好的保温效应,更适合狍在秋季进行能量储备^[35-37]。在营养策略上,春季,狍表现出对高碳水化合物的偏好,而在秋季则表现出对高蛋白质食物的偏好。这一差异可能与季节性代谢需求和营养资源可获得性的变化密切相关^[37-38]。春季草本植物和嫩芽等高碳水化合物的营养资源有助于狍快速补充能量,以支持其活动和繁殖期的高能量需求;而秋季高蛋白质食物,如树叶和果实更为丰富,对高蛋白质营养的摄入直接支持了狍的体质量增长和越冬能量储备。这种栖息地选择与营养策略的季节性协同,充分反映了狍对环境资源变化的适应性行为机制。

4 结论

本研究通过无人机激光雷达技术与营养生态学方法,量化了以往研究难以描述的三维栖息地结构特征,揭示了狍栖息地选择及营养策略的季节性协同机制。结果表明,春季狍倾向选择中等郁闭度的阳坡以获取丰富的碳水化合物,而秋季则偏好垂直结构复杂、林木稀疏的阳坡来满足其蛋白质需求。本研究采用的研究框架与方法,为探究其他森林野生动物的三维生态位及适应性策略提供了可借鉴的方法。

致谢:感谢黑龙江小北湖国家级自然保护区管理局工作人员对本次外业调查及其他工作提供的所

有帮助和支持!

参考文献:

- [1] MÜLLER J, BAE S, RÖDER J, *et al.* Airborne LiDAR reveals context dependence in the effects of canopy architecture on arthropod diversity[J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, 312: 129-137.
- [2] DEERE N J, GUILLERA-ARROITA G, SWINFIELD T, *et al.* Maximizing the value of forest restoration for tropical mammals by detecting three-dimensional habitat associations[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(42): 26254-26262.
- [3] TOIVONEN J, KANGAS A, MALTAMO M, *et al.* Assessing biodiversity using forest structure indicators based on airborne laser scanning data[J]. *Forest Ecology and Management*, 2023, 546: 121376.
- [4] GUO Q H, SU Y J, HU T Y, *et al.* Lidar boosts 3D ecological observations and modelings: A review and perspective[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2021, 9(1): 232-257.
- [5] GUO Q H, SU Y J, HU T Y, *et al.* An integrated UAV-borne lidar system for 3D habitat mapping in three forest ecosystems across China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(8/9/10): 2954-2972.
- [6] DAVIES A B, ASNER G P. Advances in animal ecology from 3D-LiDAR ecosystem mapping[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2014, 29(12): 681-691.
- [7] SIMONSON W D, ALLEN H D, COOMES D A. Applications of airborne lidar for the assessment of animal species diversity[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2014, 5(8): 719-729.
- [8] VAN EWIJK K Y, TREITZ P M, SCOTT N A. Characterizing forest succession in central Ontario using lidar-derived indices[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2011, 77(3): 261-269.
- [9] LI Y M, GUO Q H, TAO S L, *et al.* Derivation, validation, and sensitivity analysis of terrestrial laser scanning-based leaf area index[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2016, 42(6): 719-729.
- [10] BASTILLE-ROUSSEAU G, FORTIN D, DUSSAULT C. Inference from habitat-selection analysis depends on foraging strategies[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2010, 79(6): 1157-1163.
- [11] WETERINGS M J A, MOONEN S, PRINS H H T, *et al.* Food quality and quantity are more important in explaining foraging of an intermediate-sized mammalian herbivore than predation risk or competition[J]. *Ecology and Evolution*, 2018, 8(16): 8419-8432.
- [12] HOUSE C M, JENSEN K, RAPKIN J, *et al.* Macronutrient balance mediates the growth of sexually selected weapons but not genitalia in male broad-horned beetles[J]. *Functional Ecology*, 2016, 30(5): 769-779.
- [13] RAPKIN J, JENSEN K, ARCHER C R, *et al.* The geometry of

- nutrient space-based life-history trade-offs: Sex-specific effects of macronutrient intake on the trade-off between encapsulation ability and reproductive effort in decorated crickets [J]. *The American Naturalist*, 2018, 191(4): 452–474.
- [14] JOHNSON C A, RAUBENHEIMER D, CHAPMAN C A, *et al.* Macronutrient balancing affects patch departure by guerezas (*Colobus guereza*) [J]. *American Journal of Primatology*, 2017, 79(4): e22495.
- [15] IRWIN M T, RAHARISON J L, RAUBENHEIMER D R, *et al.* The nutritional geometry of resource scarcity: effects of lean seasons and habitat disturbance on nutrient intakes and balancing in wild sifakas [J]. *PLoS One*, 2015, 10(6): e0128046.
- [16] COOGAN S C P, RAUBENHEIMER D, STENHOUSE G B, *et al.* Macronutrient optimization and seasonal diet mixing in a large omnivore, the grizzly bear: A geometric analysis [J]. *PLoS One*, 2014, 9(5): e97968.
- [17] 魏辅文, 杨奇森, 吴毅, 等. 中国兽类名录(2024版) [J]. 兽类学报, 2025, 45(1): 1–16.
- WEI F W, YANG Q S, WU Y, *et al.* Catalogue of mammals in China (2024) [J]. *Acta Theriologica Sinica*, 2025, 45(1): 1–16.
- [18] 顾佳音. 中国东北虎种群现状、冬季猎物选择及运动特征研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
- GU J Y. The status of current population and distribution, winter prey selection and movement characteristics of Amur tigers (*Panthera tigris altaica*) in China [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017.
- [19] SCHOENER T W. Theory of feeding strategies [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1971, 2: 369–404.
- [20] 张文韬. 野化过程中成体和亚成体梅花鹿肠道微生物和粪便代谢物的动态研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023.
- ZHANG W T. Dynamics of gut microbiota and fecal metabolites in adult and sub-adult sika deer during rewilding training [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2023.
- [21] KARANTH K U, SRIVATHSA A, VASUDEV D, *et al.* Spatio-temporal interactions facilitate large carnivore sympatry across a resource gradient [J]. *Proceedings Biological Sciences*, 2017, 284(1848): 20161860.
- [22] ROWCLIFFE J M, FIELD J, TURVEY S T, *et al.* Estimating animal density using camera traps without the need for individual recognition [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2008, 45(4): 1228–1236.
- [23] YANG H T, DOU H L, BANIYA R K, *et al.* Seasonal food habits and prey selection of Amur tigers and Amur leopards in north-east China [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 6930.
- [24] 余雯. 东北虎栖息地哺乳动物群落结构和功能动态维持机制研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2024.
- SHE W. Maintenance mechanism of mammal community structure and function dynamics in the habitat of the Amur tiger (*Panthera tigris altaica*) [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2024.
- [25] 宫爽. 可食植物分布对野猪 (*Sus scrofa*) 栖息地选择影响研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022.
- GONG S. Study on the influence of edible plants distribution on habitat selection of wild boar (*Sus scrofa*) [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2022.
- [26] 齐琦. 食物营养空间异质性对狍季节性栖息地选择的影响 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023.
- QI Q. Effects of spatial heterogeneity of food nutrition on seasonal habitat selection of roe deer (*Capreolus pygargus*) [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2023.
- [27] ROUSSEL J R, AUTY D, COOPS N C, *et al.* lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 251: 112061.
- [28] POULSEN J R, KOERNER S E, MIAO Z W, *et al.* Forest structure determines the abundance and distribution of large lianas in Gabon [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2017, 26(4): 472–485.
- [29] COVERDALE T C, DAVIES A B. Unravelling the relationship between plant diversity and vegetation structural complexity: A review and theoretical framework [J]. *Journal of Ecology*, 2023, 111(7): 1378–1395.
- [30] QUIGLEY M F, PLATT W J. Composition and structure of seasonally deciduous forests in the americas [J]. *Ecological Monographs*, 2003, 73(1): 87–106.
- [31] 齐琦, 包衡, 姜广顺. 冬春季狍取食营养策略及影响因素研究 [J]. 野生动物学报, 2023, 44(1): 46–55.
- QI Q, BAO H, JIANG G S. Feeding nutrition strategies and the underlying factors of Siberian roe deer in winter and spring [J]. *Chinese Journal of Wildlife*, 2023, 44(1): 46–55.
- [32] JASIŃSKA K D, JACKOWIAK M, GRZY J, *et al.* Habitat-related differences in winter presence and spring-summer activity of roe deer in warsaw [J]. *Forests*, 2021, 12(8): 970.
- [33] PETTORELLI N, GAILLARD J M, DUNCAN P, *et al.* Population density and small-scale variation in habitat quality affect phenotypic quality in roe deer [J]. *Oecologia*, 2001, 128(3): 400–405.
- [34] ZINI V, WÄBER K, DOLMAN P M. Habitat quality, configuration and context effects on roe deer fecundity across a forested landscape mosaic [J]. *PLoS One*, 2019, 14(12): e0226666.
- [35] CIACH M, FRÖHLICH A. Ungulates in the city: Light pollution and open habitats predict the probability of roe deer occurring in an urban environment [J]. *Urban Ecosystems*, 2019, 22(3): 513–523.
- [36] GAUDRY W, SAÏD S, GAILLARD J M, *et al.* Partial migration or just habitat selection? Seasonal movements of roe deer in an Alpine population [J]. *Journal of Mammalogy*, 2015, 96(3): 502–510.
- [37] WANG J F, XU K, YAO S, *et al.* Temporal niche partitioning among sympatric wild and domestic ungulates between warm and cold seasons [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 10570.
- [38] KÖNIG A, HUDLER M, DAHL S A, *et al.* Response of roe deer (*Capreolus capreolus*) to seasonal and local changes in dietary energy content and quality [J]. *Animal Production Science*, 2020, 60(10): 1315–1325.