

# 湖北大老岭林麝活动节律及种群估计

## ——基于红外相机监测

邹明江<sup>1</sup> 钱前<sup>1</sup> 彭刚志<sup>2</sup> 彭洪林<sup>2</sup> 高新章<sup>2</sup> 余长蓉<sup>2</sup>

曹荣军<sup>2</sup> 朱兆午<sup>2</sup> 周友兵<sup>1</sup> 陈邦清<sup>2\*</sup>

1 三峡大学生物与制药学院 宜昌 443002; 2 宜昌三峡大老岭自然保护区管理局 宜昌 443000

**摘要:** 林麝 (*Moschus berezovskii*) 为我国国家一级重点保护野生动物, 近年来受人类活动干扰与栖息地破碎化影响, 野外种群数量持续下降。为全面了解林麝在湖北大老岭国家级自然保护区的活动节律与种群密度, 本研究于 2019 年 6 月至 2024 年 10 月在该区域共布设 763 个红外相机位点, 累计工作天数达 91 247 d。采用核密度估计法和重叠系数 ( $\Delta$ ) 评估林麝与同域鲸偶蹄目动物的时间生态位重叠, 并利用随机相遇模型估算其种群密度。结果表明: (1) 本次监测共记录到 68 616 次独立事件, 其中林麝的独立有效照片数为 481 张, 相对多度指数 ( $I_{RA}$ ) 为 2.15; (2) 林麝的日活动节律呈多峰型, 活动高峰分别出现在 17:00 ~ 18:00 时、23:00 ~ 24:00 时及 03:00 时左右。重叠分析显示, 林麝与同域分布的 5 种鲸偶蹄目动物日活动节律均存在显著差异 ( $P < 0.001$ ), 其中与中华鬣羚 (*Capricornis milneedwardsii*)、野猪 (*Sus scrofa*) 的日活动节律为中度重叠, 与毛冠鹿 (*Elaphodus cephalophus*)、中华斑羚 (*Naemorhedus griseus*) 以及小鹿 (*Muntiacus reevesi*) 的日活动节律为高度重叠。昼夜节律分析表明, 林麝各月份的昼行性指数差异显著 ( $P < 0.001$ ), 在 8 月和 10 月表现为昼行性 ( $\beta > 0.54$ ), 其余月份呈夜行性 ( $\beta < 0.54$ ); (3) 林麝在各月份 ( $P < 0.001$ ) 和季节 ( $P < 0.001$ ) 活动强度均存在显著差异, 其中冬季总体活动强度最高, 11 月为活动高峰, 春季活动强度缓慢下降, 随后 6 月出现小幅上升, 8 ~ 10 月活动强度较低, 林麝在春夏季和夏冬季的日活动节律无显著差异, 其余季节的日活动节律变化均存在显著差异 ( $P < 0.05$ ); (4) 随机相遇模型估算的大老岭林麝种群密度为 0.11 ~ 0.17 ind/km<sup>2</sup>。基于连续 5 年红外相机监测, 本研究系统揭示了林麝在大老岭的活动节律与种群密度特征, 并指出其与同域鲸偶蹄目动物存在显著时间生态位分化, 研究结果可为该保护区林麝的长期监测与精细化管理提供科学依据。

**关键词:** 林麝; 红外相机; 活动节律; 湖北大老岭; 种群密度

**中图分类号:** Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2026) 01-28-14

**基金项目** 大老岭自然保护区重点保护野生动物专项调查与监测项目;

\* 通信作者, E-mail: 380464642@qq.com;

**第一作者简介** 邹明江, 男, 硕士研究生; 研究方向: 动物生态学; E-mail: zoumingjiang2022@163.com。

收稿日期: 2025-01-07, 修回日期: 2025-05-28 DOI: 10.13859/j.cjz.202625001 CSTR: 32109.14.cjz.202625001

## Activity rhythms and population estimation of *Moschus berezovskii* in Dalaoling, Hubei

—Based on camera-trapping monitoring

ZOU Ming-Jiang<sup>1</sup> QIAN Qian<sup>1</sup> PENG Gang-Zhi<sup>2</sup> PENG Hong-Lin<sup>2</sup> GAO Xin-Zhang<sup>2</sup>  
YU Chang-Rong<sup>2</sup> CAO Rong-Jun<sup>2</sup> ZHU Zhao-Wu<sup>2</sup> ZHOU You-Bing<sup>1</sup> CHEN Bang-Qing<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> College of Biological & Pharmaceutical Sciences, China Three Gorges University, Yichang 443002;

<sup>2</sup> Administration Bureau of Dalaoling Nature Reserve in Yichang Three Gorges, Yichang 443000, China

**Abstract: [Objectives]** The Forest Musk Deer (*Moschus berezovskii*) is a first-class nationally protected species in China. Due to human disturbance and habitat fragmentation, its wild population has been declining. Although this species is present in the Dalaoling National Nature Reserve, the research on *M. berezovskii* remains in its early stages, with a lack of in-depth studies on its activity rhythms and a comprehensive assessment of its population dynamics. This study aims to systematically analyze the activity patterns of *M. berezovskii* using infrared camera trap technology, assess the temporal overlap of its activity rhythms with those of five sympatric ungulate species, and also estimate its population density. **[Methods]** We deployed 763 infrared camera trap sites across the Dalaoling National Nature Reserve from June 2019 to October 2024, which resulted in 91 247 camera trap days (Fig. 1). A total of 68 616 independent events were recorded, including 481 valid independent photos of *M. berezovskii*. Activity rhythms were analyzed via kernel density estimation (KDE) to identify activity peaks. The temporal niche overlap coefficient ( $\Delta$ ) with sympatric ungulates was calculated, and the population density was estimated via the random encounter model (REM). In addition, *t*-tests were conducted to analyze differences in the monthly and seasonal activity intensity of *M. berezovskii* and compare diurnal activity indices across the 12 months. All data and statistical analyses were performed in R (version 4.3.0). **[Results]** During the monitoring period, a total of 68 616 independent events were recorded, yielding 481 valid independent photos of *M. berezovskii*, resulting in a relative abundance index ( $I_{RA}$ ) of 2.15—the lowest among sympatric ungulate species in the Dalaoling National Nature Reserve. The daily activity pattern of *M. berezovskii* was clearly multimodal, with pronounced peaks at 17:00 ~ 18:00, 23:00 ~ 24:00, and around 03:00 (Fig. 3a). Coefficients of overlap analysis showed that its activity rhythm differed from those of all five sympatric ungulate species (Figs. 3b ~ f,  $P < 0.001$ ): overlap was moderate with Chinese Serow (*Capricornis milneedwardsii*) and Wild Boar (*Sus scrofa*), but high with Tufted Deer (*Elaphodus cephalophus*), Chinese Goral (*Naemorhedus griseus*), and Reeves's Muntjac (*Muntiacus reevesi*). Day-night rhythm analysis indicated significant monthly variation in the diurnality index  $\beta$  (Fig. 4,  $\chi^2 = 54.03$ ,  $df = 11$ ,  $P < 0.001$ ). The species was diurnal in August and October ( $\beta > 0.54$ ) and nocturnal in all other months ( $\beta < 0.54$ ). Activity intensity differed across months (Fig. 5,  $G = 80.45$ ,  $df = 11$ ,  $P < 0.001$ ) and seasons ( $G = 61.82$ ,  $df = 3$ ,  $P < 0.001$ ). The species exhibited the highest overall activity in winter with a pronounced peak in November. The intensity declined gradually through spring, rose modestly in June, and remained low from August to October. Daily activity rhythms showed no significant difference between spring and summer or between summer and winter, whereas all other seasonal comparisons revealed significant

variations (Fig. 6,  $P < 0.05$ ). Application of the REM placed the *Moschus berezovskii* population in Dalaoling National Nature Reserve at 0.11 ~ 0.17 ind/km<sup>2</sup>, with the 2020 estimate representing the lowest density recorded during the study period (Table 2). **[Conclusion]** For the first time, this study systematically analyzes the activity rhythms and population density of *M. berezovskii* in the Dalaoling area. The results reveal significant temporal niche differences in activity rhythms between *M. berezovskii* and other ungulate species in the region. These findings enhance our understanding of the activity mechanisms of *M. berezovskii* in Dalaoling and provide a foundational reference for future monitoring and management efforts in the reserve.

**Key words:** *Moschus berezovskii*; Camera-trapping; Activity rhythm; Dalaoling in Hubei; Population density

在漫长的演化历程中, 野生动物通过与环境的相互作用, 逐步改变其行为模式与生理特征。具体表现为昼夜活动节律调控、季节性迁徙策略、种间资源竞争机制以及反捕食行为模式等典型适应策略 (Seri et al. 2018)。这些行为优化机制能够使动物在最大化资源利用效率的同时提升生存概率, 从而确保种群在动态生态环境中的稳定。

红外相机技术在生态学研究具有重要价值, 尤其适用于研究夜行性哺乳动物或生活在难以接近区域的物种 (贾晓东等 2014, 肖治术 2019)。与传统观察方法相比, 红外相机具有非侵入性、长时间监测能力、成本低、对环境干扰小以及抗环境变化能力强等多重优势。因此, 红外相机广泛应用于野外监测、种群估算、栖息地特征分析、个体识别以及行为模式和活动节律的研究 (李晟等 2014)。在麝属 (*Moschus*) 的研究中, 例如大别山保护区安徽麝 (*M. anhuiensis*, 熊子翔等 2024) 和贺兰山地区马麝 (*M. chrysogaster*, 张致荣 2023), 该技术也被广泛应用。目前, 大老岭国家级自然保护区内对林麝 (*M. berezovskii*) 的研究尚处于初步阶段, 缺乏对其活动节律的深入研究及种群动态的全面评估。

林麝因其麝香的药用价值长期受到人类高度关注, 其隶属于鲸偶蹄目 (Cetartiodactyla) 麝科 (Moschidae) 麝属 (魏辅文等 2022)。林麝在我国分布广, 全国 13 个省、自治区都有分布 (王涓等 2006), 其中四川、陕西的数量相

对较多 (高耀亭 1986)。该物种在国际 IUCN 红色名录中列为濒危级 (Endangered, EN) 物种, 也是我国一级重点保护野生动物, 并在《中国脊椎动物红色名录》中列为极危 (Critically Endangered, CR) 级别 (蒋志刚等 2021)。本研究采用红外相机监测技术, 系统分析了大老岭国家级自然保护区内林麝的活动节律, 并评估其与同域分布的 5 种鲸偶蹄目动物在日活动节律上的重叠程度。此外, 采用随机相遇模型 (random encounter model, REM) 估算了林麝的种群密度, 旨在为该区域林麝的研究与保护管理提供科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区域概况

大老岭国家级自然保护区 (以下简称大老岭保护区, 30°52'35" ~ 31°07'24" N, 110°51'08" ~ 111°00'26" E, 海拔 960 ~ 2 005 m) 位于湖北省西南部, 地处大巴山系东端的荆山余脉, 毗邻长江三峡西陵峡左岸及三峡大坝库首地带, 是长江中下游地区的重要水源涵养地和生态屏障。保护区总面积 14 225 hm<sup>2</sup>, 其中核心区 5 127 hm<sup>2</sup>, 缓冲区 4 410 hm<sup>2</sup>, 实验区 4 598 hm<sup>2</sup> (葛继稳和王虚谷 2014)。区域内属亚热带湿润季风气候, 受南北向山脉阻隔影响, 区域气候表现出明显的垂直气候梯度, 四季分明, 雨量充足 (沈泽昊等 2000)。本研究根据大老岭当地的实际情况, 分别把 3 ~ 5 月、6 ~ 8 月、9 ~ 11 月和 12 月至翌年 2 月划分为春季、夏季、

秋季和冬季。该保护区以森林生态系统为主，优势群落包括马尾松 (*Pinus massoniana*) 林、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 林、栓皮栎 (*Quercus variabilis*) 林和青冈栎 (*Cyclobalanopsis glauca*) 林等 (甘娟等 2015)。2010 年科考数据显示，栖息于林间的陆生脊椎动物共有 92 科 266 属 418 种，其中包括林麝、小灵猫 (*Viverricula indica*) 等国家一级重点保护野生动物，以及猕猴 (*Macaca mulatta*)、豹猫 (*Prionailurus bengalensis*)、中华斑羚 (*Naemorhedus griseus*)、中华鬣羚 (*Capricornis milneedwardsii*) 和毛冠鹿 (*Elaphodus cephalopus*) 等国家二级重点保护野生动物 (彭洪林等 2023)。

## 1.2 红外相机布设

本研究将大老岭保护区划分为  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  的网格，并于 2019 年 6 月至 2024 年 10 月期间，综合地形、海拔、植被分布与可达性，在各网

格内合理布设红外相机 (图 1)。布设过程中借助 GPS 定位，在动物活动频繁处 (如兽道、水源地、足迹密集区) 安装 1~3 台红外相机，相邻 2 台相机的间距不小于 500 m，并将相机固定在距离地面 80~120 cm 高度的树干上，确保视野无遮挡。安装完成后，现场详细记录布设日期、经纬度与海拔、生境类型、干扰类型及强度、兽迹等信息。所有相机拍摄模式统一设置为 3 张连拍加 10 s 视频，照片分辨率  $6480 \times 4860$  像素，视频规格 1080 P，触发灵敏度调至“中”，并同步校准相机时间与经纬度 (彭洪林等 2023)。布设完成后，平均每 3 个月更换一次电池和内存卡，回收监测数据。

## 1.3 数据处理

回收后的红外相机数据经整理后，采用 R 语言 (版本 4.3.0) (R Core Team 2023) 中的 fileSnapshot 函数，提取照片和视频文件的拍摄日期、拍摄时间、文件路径等基础信息。物种

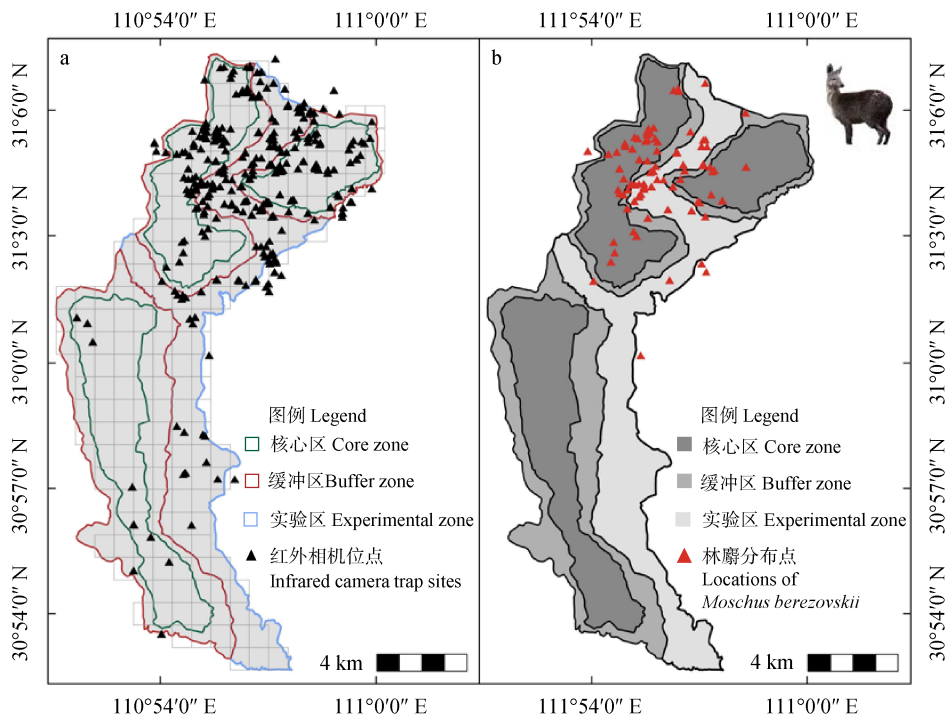


图 1 红外相机位点及拍摄到林麝的位点分布

Fig. 1 Locations of infrared camera trap sites and detection sites of *Moschus berezovskii*

a. 2019 至 2024 年在老岭保护区布设的红外相机位点；b. 拍摄到林麝的相机位点。

a. Infrared camera traps deployed in Dalaoling National Nature Reserve during 2019 to 2024; b. Sites with records of *M. berezovskii*.

鉴定主要由人工识别, 鉴定标准参照《中国兽类野外手册》(Smith 和解焱 2009) 和《中国兽类分类与分布》(魏辅文等 2022), 物种名称与分类体系以《中国兽类名录(2021版)》(魏辅文等 2021) 为准。为避免同一动物个体触发相机连续拍摄造成的重复, 若同一相机在 30 min 内多次拍到相同物种, 则仅将时间相隔超过 30 min 的记录视为独立事件, 并以该时段的最大观测数量作为该物种的记录数 (O'Brien et al. 2003)。

**1.3.1 相对多度分析** 相对多度指数 (relative abundance index,  $I_{RA}$ ) (Li et al. 2010) 是一种量化目标物种在研究区域内相对占比的常用指标, 广泛应用于生物多样性研究、野生动物监测和生态系统评价。它通常用于反映动物与监测相机之间的活动关系, 计算公式为:  $I_{RA} = 100 (\sum_{i=1} N_i / \sum_{i=1} D_i)$ , 式中,  $I_{RA}$  为相对多度指数,  $D_i$  为相机位点  $i$  的拍摄天数,  $N_i$  为相机位点  $i$  拍摄到物种的有效照片数。在实际应用中, 通常以每 100 个相机日 (camera-day) 为基准进行标准化计算, 即将所获得的独立有效照片数折算至以“每 100 个相机日”为单位, 以便在监测条件不一致的不同区域或不同时间段之间进行有效比较 (陈立军等 2019a)。

**1.3.2 核密度分析** 林麝的日活动节律数据属于以 24 h 为周期的时间数据。对于这类循环数据的分析, 主要采用非参数核密度估计 (kernel density estimation) 法 (Ridout and Linkie 2009)。在 R (4.3.0 版本) 软件的 activity 包中执行数据处理与运算: 先将独立有效照片的拍摄时间 (时:分:秒) 转化为 0~1 之间的小数, 再进一步转换为弧度数据 (radians), 以便进行核密度估计。导入 overlap 包, 使用 densityPlot() 函数生成单物种的核密度曲线图, 并通过 adjust 参数调节曲线的平滑度 (陈立军等 2019b)。

为了量化林麝与保护区内同属于鲸偶蹄目的野猪 (*Sus scrofa*)、毛冠鹿、小鹿 (*Muntiacus reevesi*)、中华斑羚和中华鬣羚在日活动节律上的差异程度以及林麝在不同季节的日活动节律

变化, 需要进一步计算其重叠系数 (coefficient of overlapping,  $\Delta$ )。重叠系数的取值范围为 [0, 1],  $\Delta = 0$  表示二者活动时间无重叠,  $\Delta = 1$  表示完全重叠。重叠系数的模拟值受样本量的影响, 根据模拟结果, 其预测值取决于比较组中样本数较少的一组, 如果较小样本数少于 50 个记录时, 以最小值积分法计算的重叠系数  $\Delta_1$  的预测值最优, 而当较小样本数大于 75 时, 以样本点密度比值计算的重叠系数  $\Delta_4$  的预测值表现最好 (Mulekar and Mishra 2000, Schmid and Schmidt 2006, Ridout and Linkie 2009)。根据重叠系数的值将重叠程度分为三个等级, 即当  $\Delta \leq 0.50$  时为轻度重叠, 当  $0.50 < \Delta < 0.80$  时为中度重叠, 当  $\Delta \geq 0.80$  时为高度重叠 (田成 2020)。

**1.3.3 昼夜活动差异** 昼行性指数  $\beta$  (diurnal-nocturnal index, DNI) 用于评估林麝的活动是昼行性还是夜行性 (宛新荣等 2002):  $\beta = D_i / N_i$ , 式中,  $i$  为一天 24 h 按照每 2 h 为一个时段划分的 12 个时段 (如 0:01~2:00 时、2:01~4:00 时、4:01~6:00 时……, 以此类推),  $D_i$  代表林麝在白天时段 (6:00~18:00 时) 出现的独立有效照片数,  $N_i$  表示所有时段内拍摄到的林麝独立有效照片总数。当  $\beta$  的估算值等于 13/24 (约等于 0.54), 表明林麝活动不存在显著的昼夜性差异;  $\beta > 13/24$ , 表明林麝以昼行性为主;  $\beta < 13/24$ , 表明林麝以夜行性为主。

**1.3.4 月、季节活动强度** 以月/季节活动强度指数 (monthly or seasonal activity intensity index,  $I_{MAI}$  或  $I_{SAI}$ ) 来衡量林麝在不同月份或季节的活动强度,  $I_{MAI} (I_{SAI}) = 100 (S / N_a)$  (Wen et al. 2020), 式中,  $S$  为林麝在某个月份或季节的独立有效照片数,  $N_a$  为林麝的独立有效照片总数。 $I_{MAI}$  或  $I_{SAI}$  值越大, 表示林麝在对应时间段的活动强度越高。

**1.3.5 活动强度差异分析** 对林麝在不同月份、不同季节的活动强度差异采用  $G$  检验 ( $G$ -test); 对林麝在不同月份的昼夜活动差异采用卡方检验。所有数据与统计分析均在 R

(4.3.0 版本) 中完成。

**1.3.6 种群密度估计** 由于林麝性情孤僻、胆小，且多单独活动，传统的密度估计方法（如距离采样法、标志重捕法）在实际应用中可行性较低，因此本研究采用随机相遇模型（REM）分别对每年的林麝种群密度进行估算（Rowcliffe et al. 2008, 张致荣 2023）。该方法无需对动物进行直接观察，适用于对隐蔽性强、活动范围广的动物种群进行密度估算，计算公式为： $D = (y/t) \{ \pi/[vr(2 + \theta)] \} g$ ，式中， $D$  为林麝的种群密度（ind/km<sup>2</sup>）， $y$  为林麝的独立有效照片总数， $t$  为所有相机累计的工作天数（d）， $v$  为林麝的日平均移动速度（km/d），结合文献  $v$  为 1.32 ~ 1.95 km/d（张致荣 2023）， $r$  为有效监测区域的半径（km）， $\theta$  为相机探测区域角度（°），根据相机的性能参数， $r = 0.025$  km， $\theta = 0.96$  rad（约 55°）， $g$  为林麝种群系数，由于林麝通常单独行动，因此在本研究中  $g = 1$ 。

## 2 结果

### 2.1 相机统计结果

在 2019 年 6 月至 2024 年 10 月期间，本研究共获取 763 个红外相机位点的监测数据，相机累计工作时间达 91 247 d，共记录 68 616 次

独立事件。其中，记录到的兽类占 51.11%，人为活动占 0.78%，其他（包含其他动物及无效触发）占 48.11%。在鲸偶蹄类动物中，林麝共获得 481 张独立有效照片（图 2），小鹿 13 401 张，野猪 4 325 张，毛冠鹿 2 289 张，中华斑羚 790 张，中华鬃羚 1 337 张。

### 2.2 相对多度指数

在本次监测中，所记录到的 6 种鲸偶蹄类动物的相对多度指数（ $I_{RA}$ ）从高到低依次为：小鹿（22.82）、野猪（6.42）、毛冠鹿（5.31）、中华鬃羚（3.49）、中华斑羚（3.36）以及林麝（2.15）（表 1）。

### 2.3 活动节律

**2.3.1 日活动节律** 林麝的日活动节律为多峰型活动模式，其高峰主要集中在夜间。傍晚 17:00 ~ 18:00 时形成第一个活动高峰，在 23:00 ~ 24:00 时形成第二个活动高峰，在 03:00 时左右有小幅上升，随后活动强度开始下降，一直持续到 12:00 ~ 14:00 时，该时刻为全天活动强度最低（图 3a）。

鉴于林麝、毛冠鹿、小鹿、中华鬃羚、中华斑羚和野猪的独立有效照片数均超过 75，本研究采用  $\Delta_4$  作为最优重叠系数估计值（图 3b ~ f）。林麝与上述 5 种鲸偶蹄类动物在黎明与黄



图 2 大老岭国家级自然保护区红外相机拍到的林麝照片

Fig. 2 Photos of *Moschus berezovskii* captured by infrared cameras in Dalaoling National Nature Reserve

a. 林麝白天的活动照片；b. 林麝夜晚的活动照片。

a. Diurnal camera-trap photograph documenting the activity of *M. berezovskii*; b. Nocturnal camera-trap photograph documenting the activity of *M. berezovskii*.

表 1 大老岭国家级自然保护区 6 种鲸偶蹄类物种的相对多度指数

Table 1 Relative abundance index of six ungulate species in Dalaoling National Nature Reserve

物种 Species	保护级别 Protection category	IUCN 红色名录级别 IUCN Red List Category	独立有效照片数 Number of independent records	相机数 Number of cameras	相对多度指数 Relative abundance index
哺乳纲 Mammalia					
鲸偶蹄目 Cetartiodactyla					
鹿科 Cervidae					
毛冠鹿 <i>Elaphodus cephalophus</i>	二级 II	近危 Near threatened, NT	2 289	323	5.31
小鹿 <i>Muntiacus reevesi</i>		无危 Least concern, LC	13 401	463	22.82
牛科 Bovidae					
中华斑羚 <i>Naemorhedus griseus</i>	二级 II	易危 Vulnerable, VU	790	173	3.36
中华鬣羚 <i>Capricornis milneedwardsii</i>	二级 II	易危 Vulnerable, VU	1 337	281	3.49
麝科 Moschidae					
林麝 <i>Moschus berezovskii</i>	一级 I	濒危 Endangered, EN	481	147	2.15
猪科 Suidae					
野猪 <i>Sus scrofa</i>		无危 Least concern, LC	4 325	508	6.42

昏时段的活动模式具有不同程度的重叠，全天的活动规律差异显著 ( $P < 0.001$ )。其中，林麝与毛冠鹿 ( $\Delta_4 = 0.86$ , 95%置信区间为 0.83 ~ 0.87)、小鹿 ( $\Delta_4 = 0.83$ , 95%置信区间为 0.80 ~ 0.84) 和中华斑羚 ( $\Delta_4 = 0.84$ , 95%置信区间为 0.81 ~ 0.86) 的日活动节律呈高度重叠，可能反映了它们在觅食高峰、温度适应性及捕食者规避策略等方面的共性。相比之下，林麝与野猪 ( $\Delta_4 = 0.66$ , 95%置信区间为 0.64 ~ 0.68) 及中华鬣羚 ( $\Delta_4 = 0.76$ , 95%置信区间为 0.74 ~ 0.78) 的日活动节律仅表现为中度重叠，表明它们在时间利用和空间资源占用上存在更明显的生态分化。

**2.3.2 昼夜活动差异** 林麝整体的昼行性指数 ( $\beta$ ) 为 0.32，显著低于 0.54，表明其主要以夜行性活动为主。统计检验结果进一步显示，林麝在不同月份之间的昼行性指数存在显著差异 ( $\chi^2 = 54.03$ ,  $df = 11$ ,  $P < 0.001$ ) (图 4)。其中，8 月 ( $\beta = 0.60$ ) 和 10 月 ( $\beta = 0.55$ ) 的昼行性指数高于 0.54，呈现相对昼行倾向，而其余月份均低于 0.54，维持夜行优势。

**2.3.3 月活动节律** 根据林麝的月活动强度指数 ( $I_{MAI}$ )，其年内活动水平呈现多峰型波动：2 月至 5 月活动强度逐步下降；在 6 月迅速回升

并形成一个小高峰，随后再次下降，并在 8 月降至全年最低；8 月后活动强度持续攀升，于 11 月达到年内最高值 (图 5)。经统计检验，林麝各月份之间的月活动强度指数存在显著差异 ( $G = 80.45$ ,  $df = 11$ ,  $P < 0.001$ )。

**2.3.4 季节性活动差异** 在季节尺度上，林麝的季节性活动强度指数 ( $I_{SAI}$ ) 存在显著差异 ( $G = 61.82$ ,  $df = 3$ ,  $P < 0.05$ )。春、夏、秋、冬四季的相对活动强度指数分别为 19.3%、20.0%、22.7%、37.0%，其中冬季的活动强度最高，与月度活动规律的结果相一致。由于各季节林麝的独立有效照片数均大于 75，故采用  $\Delta_4$  作为最优重叠系数估计值 (图 6)，其中除春秋两季的日活动曲线为中度重叠外，其他均为高度重叠。林麝在春秋两季、春冬季、夏秋季和秋冬季的日活动节律差异显著 ( $P < 0.05$ )，而在春夏季和夏冬季的日活动节律无显著差异 ( $P > 0.05$ )。春季林麝的活动规律变化平缓，整体活动水平不高；夏季的活动曲线表现为单峰型，夜晚 21:00 时左右达到活动高峰，随后活动强度开始下降；秋季林麝的活动高峰集中于晨昏两个时段，且白天 13:00 时左右的活动水平为四季中最低；冬季林麝的活动规律呈多峰型，约在

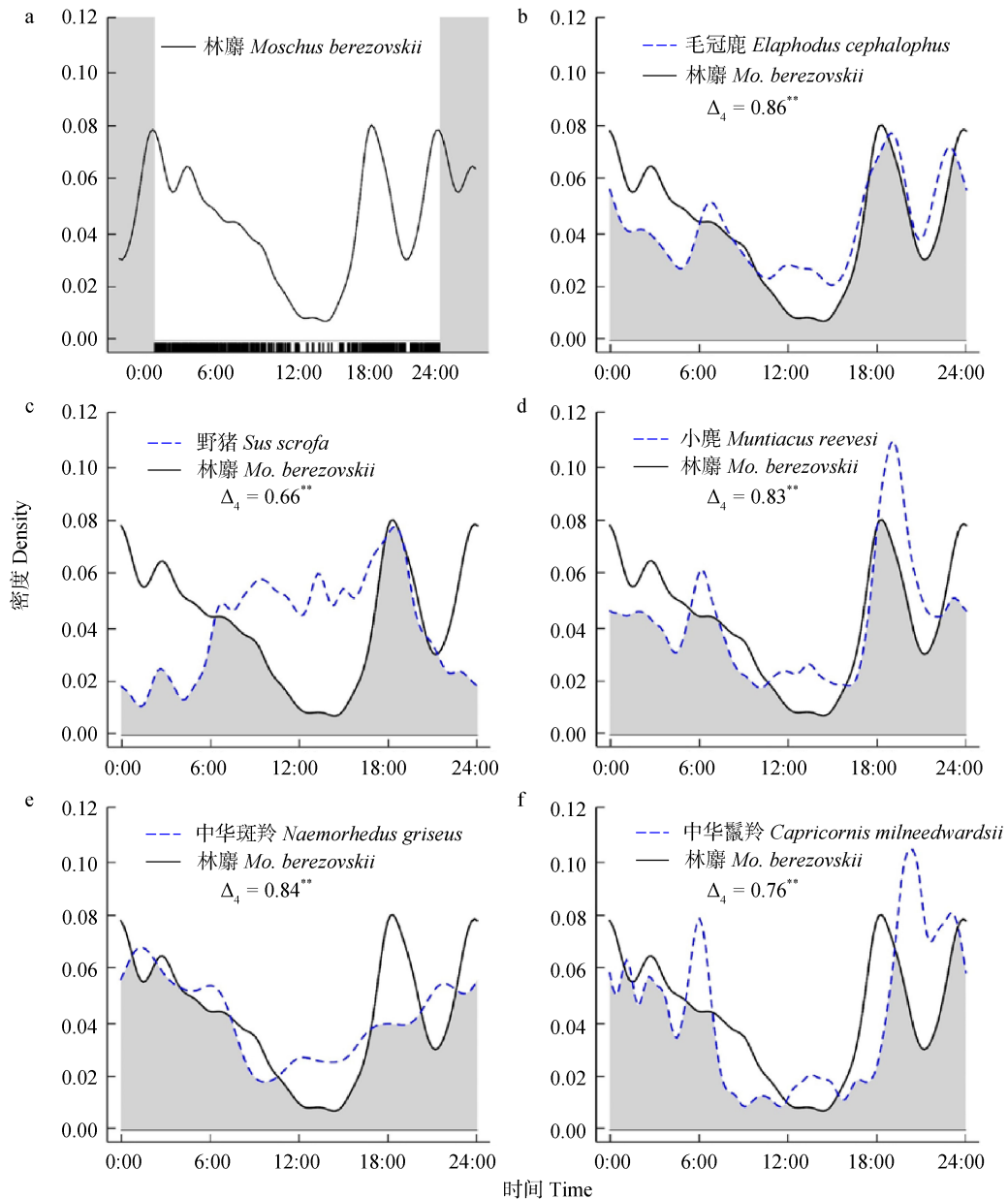


图3 林麝与同域5种鲸偶蹄类动物的日活动节律重叠

Fig. 3 Overlap of daily activity rhythms between *Moschus berezovskii* and five sympatric species of Cetartiodactyla

a. 林麝的日活动节律核密度分析；b~f. 林麝分别与其他5种鲸偶蹄类动物的日活动节律重叠分析。线条表示物种在一天中的活动变化，黑色线为林麝、蓝色线分别为同域分布的其他5种鲸偶蹄类物种，重叠区域用灰色表示；\*\*表示两个物种的日活动曲线存在显著差异， $P < 0.001$ 。

a. Kernel density estimate of the daily activity pattern of *M. berezovskii*; b~f. Pairwise overlap in daily activity patterns between *M. berezovskii* and each of five sympatric species of Cetartiodactyla. Curves depict variations in detection probability across the 24-h cycle; the black curve represents *M. berezovskii*, while the blue curves correspond to the respective sympatric species. Grey shading denotes periods of temporal overlap between species; \*\* indicates that there are significant differences in the daily activity curves between two species,  $P < 0.001$ .

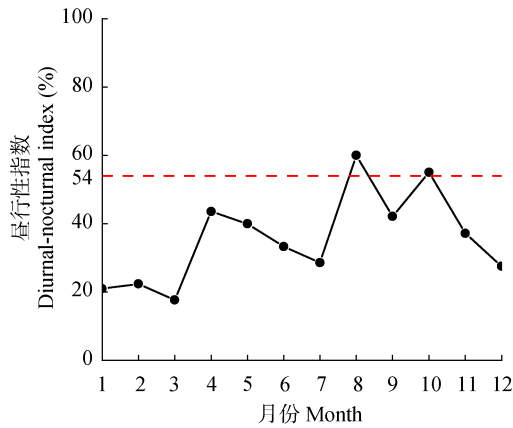


图 4 林麝昼行性指数月变化

Fig. 4 Monthly variations in the diurnal-nocturnal index of *Moschus berezovskii*

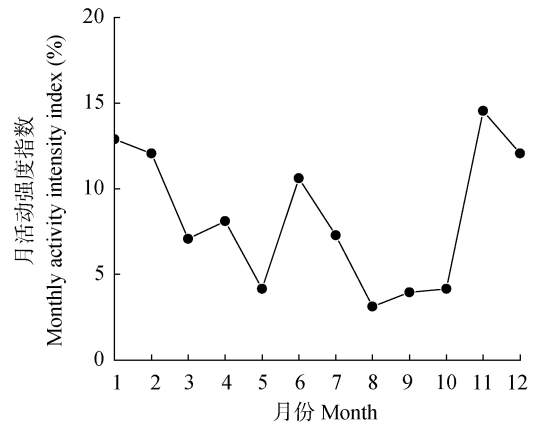


图 5 林麝月活动节律

Fig. 5 Monthly activity patterns of *Moschus berezovskii*

红色虚线表示物种昼夜习性的判定标准。

The red dashed line marks the threshold used to classify activity as diurnal or nocturnal.

21:00、24:00 和 2:00 时出现活动高峰，2:00 时以后呈下降趋势。

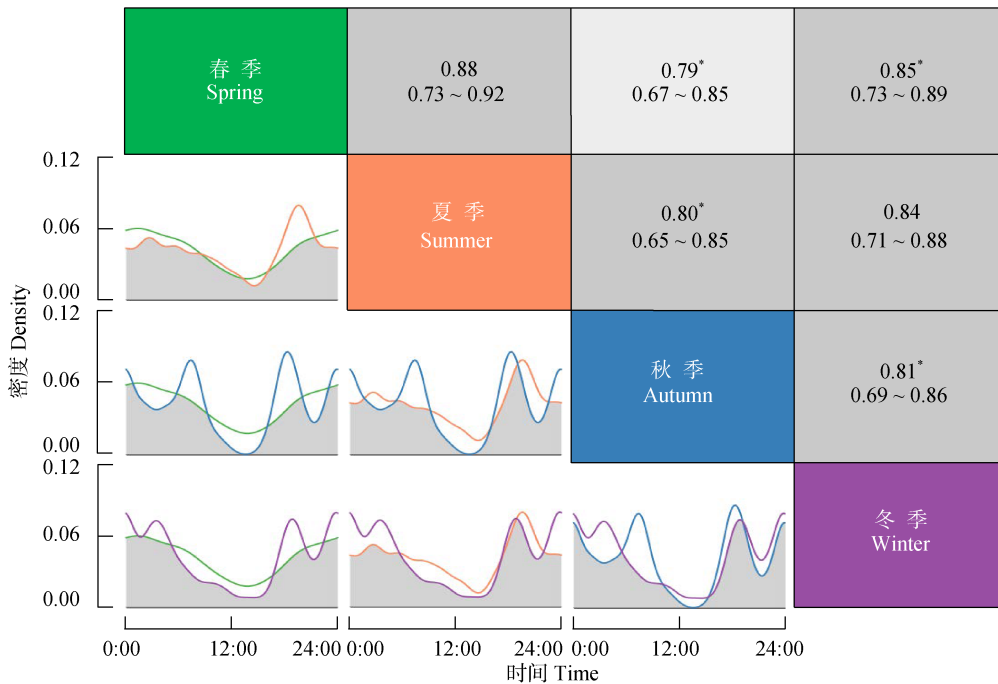


图 6 林麝不同季节日活动节律差异

Fig. 6 Seasonal variations in daily activity rhythms of *Moschus berezovskii*

各季节背景颜色代表林麝在对应季节的日活动节律变化；右侧方框内为重叠系数 ( $\Delta_4$ )；重叠系数下方为 95%置信区间；灰色代表两个季节日活动节律的重叠程度，颜色越深，重叠程度越大；\* 表示林麝在不同季节的日活动曲线存在显著差异，\*  $P < 0.05$ 。

Season-specific background colors illustrate the daily activity pattern of *M. berezovskii* in each season; The boxed value on the right shows the coefficient of overlap ( $\Delta_4$ ), with the 95 % confidence interval presented immediately below; Gray shading represents the degree of overlap in daily activity rhythms between the two seasons, with darker shades indicating greater overlap; \* indicates that there is a significant difference in the daily activity curve of *M. berezovskii* between the two seasons, with \*  $P < 0.05$ .

## 2.4 种群密度估计

基于随机相遇模型 (REM), 在估测的运动速度范围内, 林麝在 2020 年的种群密度最低, 约为  $0.04 \sim 0.06 \text{ ind/km}^2$ , 在 2024 年的种群密度最高, 约为  $0.19 \sim 0.28 \text{ ind/km}^2$  (表 2), 整体的平均种群密度为  $0.11 \sim 0.16 \text{ ind/km}^2$ 。总体来看, 林麝在大老岭保护区的密度并不高, 其分布存在高度集中的区域, 主要位于保护区的核心区。

表 2 基于随机相遇模型估计的林麝年种群密度

Table 2 Annual population density of *Moschus berezovskii* estimated based on the random encounter model

年份 Year	相机数 Number of cameras	总工作天数 (d) Total working days	独立有效照片数 Number of independent records	种群密度 Population density ( $\text{ind/km}^2$ )
2019	31	1 058	5	0.10 ~ 0.15
2020	125	10 004	18	0.04 ~ 0.06
2021	133	16 100	82	0.11 ~ 0.16
2022	208	20 163	89	0.10 ~ 0.14
2023	205	26 864	140	0.11 ~ 0.17
2024	61	17 058	147	0.19 ~ 0.28

## 3 讨论

### 3.1 林麝的分布

通过计算林麝的相对多度指数 ( $I_{RA}$ ), 发现大老岭保护区内林麝的  $I_{RA}$  值为 2.15, 显著低于小鹿 (22.82), 但与中华斑羚 (3.36) 和中华鬣羚 (3.49) 相近; 其相对多度与陕西观音山保护区林麝 (0.90, 贾晓东等 2014) 和吉林琿春保护区原麝 (*Moschus moschiferus*, 0.07, 肖文宏等 2014) 相比较, 但低于四川白水河保护区林麝的相对多度 (13.2, 胡大明等 2019)。与湖北大别山自然保护区安徽麝的相对多度 (3.84, 熊子翔等 2024) 接近但仍略低。这可能与林麝对高质量栖息地的依赖性及其对人类干扰的敏感性有关。

### 3.2 林麝的活动节律

大老岭保护区内林麝的日活动节律呈多峰

活动模式: 傍晚 17:00 ~ 18:00 时、夜间 23:00 ~ 24:00 时和 03:00 时左右处于活动高峰, 中午 12:00 时左右活动强度最低。这一模式与胡大明等 (2019) 在四川白水河保护区的调查结果“林麝活动主要集中于白天, 白天活动的频率是夜间活动的两倍以上”不一致。相比之下, 熊子翔等 (2024) 对安徽麝的研究显示, 其中午活动强度较高, 与本研究相反, 但夜间活动强度基本一致。可能因为当地村民的农作时间为早上 7 时至下午 17 时, 此时林麝的活动强度低, 能有效避免人兽冲突。

在多物种共存的生态系统中, 根据生态位理论, 共域物种必须在空间、时间或食性等至少一个生态位维度上实现差异化利用, 以降低资源重叠所引发的竞争, 从而维持种群间的长期稳定共存 (Owen-Smith and Goodall 2014)。基于红外相机数据, 本研究计算了林麝与同域 5 种鲸偶蹄类动物的日活动节律重叠系数, 结果表明各物种在时间资源的分配上呈现出多层次的生态位分化。林麝与小鹿、毛冠鹿、中华斑羚的重叠系数 ( $\Delta_4$ ) 分别为 0.83、0.86 和 0.84, 属于高度重叠。17:00 ~ 24:00 时期间, 林麝的觅食高峰与小鹿和毛冠鹿几乎重合, 在食物匮乏季节可能加剧该时段的种间竞争, 但林麝通过提高 0:00 ~ 4:00 时段的觅食频率, 避开了 6:00 时前后的竞争高峰; 林麝与中华斑羚的高重叠主要集中在 0:00 ~ 6:00 时, 傍晚以后两者活动规律分化明显。相比之下, 林麝与野猪 ( $\Delta_4 = 0.66$ ) 和中华鬣羚 ( $\Delta_4 = 0.76$ ) 的活动节律重叠相对较低, 中华鬣羚在夜间达到活动高峰的时间较林麝推迟 2 h 左右, 表现出显著的错峰觅食; 而野猪在 0:00 ~ 18:00 时之间的活动模式几乎与林麝相反, 这种相背的节律极大地降低了两物种的潜在竞争。

月度与季节性活动节律是物种响应环境因子周期性变化, 在时间维度上动态优化行为决策的一种适应性策略 (Kronfeld-Schor and Dayan 2003)。通过对食物资源丰俭更替、昼夜温差、降水量波动及捕食风险高峰的精准把

握,动物能够有针对性地在不同月份或季节调整觅食、休息、繁殖等关键行为,从而最大化能量利用效率并提升生存与繁衍成功率(Lima 1998)。本研究根据活动强度指数揭示了林麝在不同月份和季节的活动节律变化。结果显示,林麝在冬季的11月份活动强度最高,夏季的8月活动强度最低。相关研究指出(王涓等2006),林麝通常于10月开始进入发情期,雄麝会通过嗅闻雌麝尿液来确定配偶信息,因而活动强度在此阶段会显著提高,与本研究发现的月度活动规律相吻合。林麝的妊娠期约为176~192 d,产仔时间主要集中在4月至7月中旬左右(胡大明等2019),因此6月短暂的活动高峰可能与林麝繁殖后期活动有关,例如,雌麝可能需要更多移动觅食以补充能量,为哺育幼仔做准备。相较于炎热的7月和8月,6月的气温仍较为适中,可以为林麝活动提供更舒适的环境。林麝昼行性指数的月变化显示,林麝总体以夜行性为主,但在8和10月这两个月份的昼行性指数大于0.54,表现为昼行性。8月可能是繁殖后期或哺乳期,雌麝需要增加白天觅食活动以满足自身和幼崽的能量需求,而10月是存储脂肪以及求偶的关键时期,所以通过增加白天的活动时间,来提高在种内的竞争优势。

温度的季节性波动被视为驱动野生动物日常行为策略与活动节律变化的关键因子(Zweifel-Schielly et al. 2009)。本研究比较了林麝四季的日活动节律,结果表明其时间分配模式会随季节更迭做出显著调整,体现了其对环境温度、资源可及性及外界干扰的综合响应。春季活动曲线平缓、缺乏显著高峰,推测与冬末体能恢复需求及植被尚处萌芽期、食物有限有关;林麝通过降低整体活动强度以避免能量过度消耗。随着气温升高,林麝开始将活动时段集中至傍晚到夜间,以规避日间高温所带来的散热与失水压力。秋季植被繁茂、果实成熟,林麝可在温度适宜且食物充足的时段集中觅食。冬季的活动规律与秋季类似且仍保持较高

的活动强度;寒冷季节种间竞争、人为干扰及被捕食压力普遍下降,或为林麝选择此时进入交配期的生态学动因之一。

### 3.3 林麝种群密度

此次研究通过随机相遇模型对林麝在2019至2024年间每年的种群密度进行估算,结果表明,随机相遇模型在估算种群密度时会受到种群活动范围的影响。首先,2019年和2024年的监测时间跨度并非全年监测,2019年的监测时间从6月份开始,根据林麝的月活动节律,6~8月林麝的活动强度逐渐下降,并在8月达到最低值。由于缺少1~5月,尤其是1、2月林麝活动强度较高的监测数据,所以会导致模型估算结果偏低。2024年的监测数据仅覆盖到10月份,并且部分相机在6月份甚至更早便开始进行数据回收,缺少林麝活动强度较低时期的红外相机数据,导致2024年多为1~5月的林麝活动影像。冬季和春季是林麝发情交配的高峰期,活动强度较高,因此模型估算的结果偏高。

其次,由于新冠疫情(COVID-19)的影响,宜昌市从2020年初开始实行疫情防控工作。这一年,保护区的野生动物受人为干扰的影响会小于其他年份。根据Rutz等(2020)的研究,由于新冠疫情,导致全球范围内人类活动急剧减少,一些动物因此扩展活动范围,而另一些动物则因缺乏人类提供的资源(如食物)而受到影响。我们猜测,林麝由于易受惊吓,当没有人为干扰时,它们的活动范围会相对集中,导致红外相机拍摄到的照片数少,且可能多为同一只,所以模型估计的结果在6年的监测时间内最低。

第三,2022年全球变暖引发极端热浪事件(Ibebuchi and Abu 2023, Jiang et al. 2023, Ma and Yuan 2023, Zhang et al. 2023),对恒温动物(endotherms)造成了严重的温度适应挑战,尤其是适应寒冷气候的偶蹄类动物(Trondrud et al. 2023)。这种极端气候会降低其活动量、心率和秋季体重(Trondrud et al. 2023)。因此,

即使 2022 年红外相机的监测覆盖全年, 但估计的林麝种群密度仍偏低, 不过幅度不大, 可能是因为热浪只持续了 1 个月左右。

对比本研究林麝 2021 年 (0.11 ~ 0.16 ind/km<sup>2</sup>) 和 2023 年 (0.11 ~ 0.17 ind/km<sup>2</sup>) 的种群密度, 当人类活动趋于正常且没有极端事件发生时, 两个年份估算的林麝种群密度相差无几。因此, 基于上述分析本研究认为, 大老岭保护区内林麝的种群密度约为 0.11 ~ 0.17 ind/km<sup>2</sup>。该密度低于贺兰山地区野生马麝的 (1.586 ± 0.211) ind/km<sup>2</sup> (张致荣 2023) 和四川白水河国家公园样线内林麝 (5.05 ind/km<sup>2</sup>, 胡大明等 2019) 的种群密度, 说明该保护区的林麝种群仍有较高的环境容纳量。出现这种情况, 可能一方面是由于华中地区的人流量比四川、宁夏等地大得多, 因此人为干扰和栖息地破碎化更容易影响林麝的分布; 另一方面是早些年由于盗猎的影响, 使林麝虽在湖北有分布, 但种群难以形成规模。

### 3.4 林麝生存挑战及保护策略

林麝在野外生存面临的主要压力主要来自以下几个方面: (1) 天敌, 林麝在野外的天敌主要包括一些大型掠食性动物, 如狼 (*Canis lupus*)、豺 (*Cuon alpinus*)、亚洲黑熊 (*Ursus thibetanus*) 等, 以及猛禽类, 如金雕 (*Aquila chrysaetos*) (吴建平等 2007, Seryodkin et al. 2017)。在本次利用红外相机对大老岭野生动物的监测中, 共记录到 7 种食肉类动物: 花面狸 (*Paguma larvata*)、小灵猫、豹猫、猪獾 (*Arctonyx collaris*)、鼬獾 (*Melogale moschata*)、黄鼬 (*Mustela sibirica*) 和黄腹鼬 (*M. kathiah*), 均为中型食肉动物 (Mesocarnivore, Li et al. 2022), 并不是林麝的主要天敌。然而, 根据湖北省鸟类迁徙通道重点区域规划 (湖北省林业局 2023), 金雕在宜昌大老岭、竹山堵河源和五峰后河等地均有分布, 某些情况下, 金雕可能会捕食林麝幼崽。

(2) 种间竞争, 特别是与小鹿的竞争。小鹿的相对多度在同域分布的鲸偶蹄类动物中最高,

是该地区的优势种, 并且林麝与小鹿的活动曲线高度重叠, 在食物匮乏的季节可能加剧种间竞争, 影响林麝的分布。(3) 人为干扰, 本次监测拍摄到的家养动物包括家猫、家牛、家羊和家犬, 独立有效照片数分别为 115、19、70 和 555 张, 人类活动的独立有效照片数为 532 张。尽管保护区在管理和规划上正逐步改进, 但随着经济的发展, 人为干扰的影响依然不可避免。

本研究基于对林麝活动节律和种群密度的分析, 提出以下保护建议: 在栖息地保护方面, 应尽量减少人为干扰, 保护原始栖息地环境。根据分布图显示, 林麝主要分布于核心区, 因此应尽量避免家牛、家羊等家畜进入该区域。此外, 本研究通过分析林麝的月活动节律发现 8 月开始林麝由于越冬和繁殖需求活动强度逐月上升, 保护区可在该时段制定相关政策, 减少对种群繁殖的影响。最后, 在未来应加强与生态学、遥感、地理信息系统和动物行为学等学科的合作, 推动监测与保护研究的综合发展, 以提升林麝种群的稳定性并增强保护效果。

### 参 考 文 献

- Ibebuchi C C, Abu I O. 2023. Characterization of temperature regimes in Western Europe, as regards the summer 2022 Western European heat wave. *Climate Dynamics*, 61(7): 3707–3720.
- Jiang J L, Liu Y M, Mao J Y, et al. 2023. Extreme heatwave over Eastern China in summer 2022: the role of three oceans and local soil moisture feedback. *Environmental Research Letters*, 18(4): 044025.
- Kronfeld-Schor N, Dayan T. 2003. Partitioning of time as an ecological resource. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34 (2003): 153–181.
- Li J, Li D Q, Hacker C, et al. 2022. Spatial co-occurrence and temporal activity patterns of sympatric mesocarnivores guild in Qinling Mountains. *Global Ecology and Conservation*, 36: e02129.
- Li S, McShea W J, Wang D J, et al. 2010. The use of infrared-triggered cameras for surveying phasianids in Sichuan Province, China. *Ibis*, 152(2): 299–309.

- Lima S L. 1998. Nonlethal effects in the ecology of predator-prey interactions: What are the ecological effects of anti-predator decision-making? *BioScience*, 48(1): 25–34.
- Ma F, Yuan X. 2023. When will the unprecedented 2022 summer heat waves in Yangtze River Basin become normal in a warming climate. *Geophysical Research Letters*, 50(4): e2022GL101946.
- Mulekar M S, Mishra S N. 2000. Confidence interval estimation of overlap: equal means case. *Computational Statistics & Data Analysis*, 34(2): 121–137.
- O'Brien T G, Kinnaird M F, Wibisono H T. 2003. Crouching tigers, hidden prey: Sumatran tiger and prey populations in a tropical forest landscape. *Animal Conservation*, 6(2): 131–139.
- Owen-Smith N, Goodall V. 2014. Coping with savanna seasonality: comparative daily activity patterns of African ungulates as revealed by GPS telemetry. *Journal of Zoology*, 293(3): 181–191.
- R Core Team. 2023. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing.
- Ridout M S, Linkie M. 2009. Estimating overlap of daily activity patterns from camera trap data. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, 14(3): 322–337.
- Rowcliffe J M, Field J, Turvey S T, et al. 2008. Estimating animal density using camera traps without the need for individual recognition. *Journal of Applied Ecology*, 45(4): 1228–1236.
- Rutz C, Loretto M C, Bates A E, et al. 2020. COVID-19 lockdown allows researchers to quantify the effects of human activity on wildlife. *Nature Ecology & Evolution*, 4(9): 1156–1159.
- Schmid F, Schmidt A. 2006. Nonparametric estimation of the coefficient of overlapping—theory and empirical application. *Computational Statistics & Data Analysis*, 50(6): 1583–1596.
- Seri H, Chammem M, Ferreira L M, et al. 2018. Effects of seasonal variation, group size and sex on the activity budget and diet composition of the addax antelope. *African Journal of Range & Forage Science*, 35(2): 89–100.
- Seryodkin I V, Zaitsev V A, Petrunenko Y K, et al. 2017. Siberian musk deer in the diets of tiger and bears in the Sikhote-Alin. *Russian Journal of Ecology*, 48(4): 372–376.
- Trondrud L M, Pigeon G, Król E, et al. 2023. A summer heat wave reduced activity, heart rate, and autumn body mass in a cold-adapted ungulate. *Physiological and Biochemical Zoology*, 96(4): 282–293.
- Wen X Y, Cheng X T, Dong Y Q, et al. 2020. Analysis of the activity rhythms of the great gerbil (*Rhombomys opimus*) and its predators and their correlations based on infrared camera technology. *Global Ecology and Conservation*, 24: e01337.
- Zhang D Q, Chen L J, Yuan Y, et al. 2023. Why was the heat wave in the Yangtze River valley abnormally intensified in late summer 2022. *Environmental Research Letters*, 18(3): 034014.
- Zweifel-Schielly B, Kreuzer M, Ewald K C, et al. 2009. Habitat selection by an Alpine ungulate: the significance of forage characteristics varies with scale and season. *Ecography*, 32(1): 103–113.
- 陈立军, 束祖飞, 肖治术. 2019b. 应用红外相机数据研究动物活动节律——以广东车八岭保护区鸡形目鸟类为例. *生物多样性*, 27(3): 266–272. [Chen L J, Shu Z F, Xiao Z S. 2019b. Application of camera-trapping data to study daily activity patterns of Galliformes in Guangdong Chebaling National Nature Reserve. *Biodiversity Science*, 27(3): 266–272.]
- 陈立军, 肖文宏, 肖治术. 2019a. 物种相对多度指数在红外相机数据分析中的应用及局限. *生物多样性*, 27(3): 243–248. [Chen L J, Xiao W H, Xiao Z S. 2019a. Limitations of relative abundance indices calculated from camera-trapping data. *Biodiversity Science*, 27(3): 243–248.]
- 甘娟, 葛继稳, 刘奕伶, 等. 2015. 三峡大老岭自然保护区森林生态系统10年(2000—2010年)质量变化. *植物科学学报*, 33(6): 766–774. [Gan J, Ge J W, Liu Y L, et al. 2015. Forest ecosystem quality change over ten years (2000–2010) in the Three Gorges Dalaoing nature reserve. *Plant Science Journal*, 33(6): 766–774.]
- 高耀亭. 1986. 麝和麝香——我国重要动物资源. *动物学杂志*, 21(4): 41–44. [Gao Y T. 1986. Musk deer and musk—important animal resources in China. *Chinese Journal of Zoology*, 21(4): 41–44.]
- 葛继稳, 王虚谷. 2014. 湖北自然保护区. 武汉: 湖北科学技术出版社, 66. [Ge J W, Wang X G. 2014. Hubei Nature Reserve. Wuhan: Hubei Science & Technology Press, 66.]
- 胡大明, 邓玥, 徐含锋, 等. 2019. 四川白水河国家级自然保护区林麝资源调查. *四川林业科技*, 40(6): 105–109. [Hu D M, Deng Y, Xu H F, et al. 2019. A resource survey of *Moschus berezouskii* in Sichuan Baishuihe national nature reserve. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 40(6): 105–109.]
- 湖北省林业局. 2023. 省林业局关于发布湖北省鸟类迁徙通道重点区域的通知. [EB/OL]. [2025-02-19]. <https://ljy.hubei.gov.cn/>

- zfxgk/zc\_GK2020/qtwj\_GK2020/202401/t20240102\_5026094.shtml. [Hubei Forestry Bureau. 2023. Notice of the provincial forestry bureau on releasing key areas of bird migration corridors in Hubei Province. [EB/OL]. [2025-02-19]. [https://lyj.hubei.gov.cn/zfxgk/zc\\_GK2020/qtwj\\_GK2020/202401/t20240102\\_5026094.shtml](https://lyj.hubei.gov.cn/zfxgk/zc_GK2020/qtwj_GK2020/202401/t20240102_5026094.shtml).]
- 贾晓东, 刘雪华, 杨兴中, 等. 2014. 利用红外相机技术分析秦岭有蹄类动物活动节律的季节性差异. 生物多样性, 22(6): 737–745. [Jia X D, Liu X H, Yang X Z, et al. 2014. Seasonal activity patterns of ungulates in Qinling Mountains based on camera-trap data. Biodiversity Science, 22(6): 737–745.]
- 蒋志刚, 吴毅, 刘少英, 等. 2021. 中国生物多样性红色名录: 脊椎动物(第一卷) 哺乳动物. 北京: 科学出版社, 82–88. [Jiang Z G, Wu Y, Liu S Y, et al. 2021. China's Red List of Biodiversity: Vertebrates. Volume I, Mammals. Beijing: Science Press, 82–88.]
- 李晟, 王大军, 肖治术, 等. 2014. 红外相机技术在我国野生动物研究与保护中的应用与前景. 生物多样性, 22(6): 685–695. [Li S, Wang D J, Xiao Z S, et al. 2014. Camera-trapping in wildlife research and conservation in China: review and outlook. Biodiversity Science, 22(6): 685–695.]
- 彭洪林, 谭艳, 高新章, 等. 2023. 湖北大老岭国家级自然保护区鸟兽资源的初步调查. 湖北林业科技, 52(5): 43–50, 84. [Peng H L, Tan Y, Gao X Z, et al. 2023. Preliminary survey of mammals and birds in Dalaoling national nature reserve of Hubei. Hubei Forestry Science and Technology, 52(5): 43–50, 84.]
- 沈泽昊, 张新时, 金义兴. 2000. 三峡大老岭森林物种多样性的空间格局分析及其地形解释. 植物学报, 42(6): 620–627. [Shen Z H, Zhang X S, Jin Y X. 2000. Spatial pattern analysis and topographical interpretation of species diversity in the forests of Dalaoling in the region of the Three Gorges. Journal of Integrative Plant Biology, 42(6): 620–627.]
- Smith A T, 解焱. 2009. 中国兽类野外手册. 长沙: 湖南教育出版社. [Smith A T, Xie Y. 2009. A Guide to the Mammals of China. Changsha: Hunan Education Publishing House.]
- 田成. 2020. 大熊猫栖息地野生动物时空分布及驱动因素研究. 北京: 北京林业大学博士学位论文. [Tian C. 2020. Study on spatial-temporal distribution and driving factors of wildlife in habitat of giant pandas. Beijing: Beijing Forestry University, Doctoral dissertation.]
- 宛新荣, 王梦军, 刘伟, 等. 2002. 啮齿动物活动模式的几种数值指标. 兽类学报, 22(3): 211–217. [Wan X R, Wang M J, Liu W, et al. 2002. Numerical indices for evaluating the activity patterns of rodent species. Acta Theriologica Sinica, 22(3): 211–217.]
- 王涓, 姜海瑞, 薛文杰, 等. 2006. 林麝 (*Moschus berezovskii*) 研究概况和进展. 四川动物, 25(1): 195–200. [Wang Y, Jiang H R, Xue W J, et al. 2006. Advances in research of forest musk deer (*Moschus berezovskii*). Sichuan Journal of Zoology, 25(1): 195–200.]
- 魏辅文, 杨奇森, 吴毅, 等. 2021. 中国兽类名录(2021版). 兽类学报, 41(5): 487–501. [Wei F W, Yang Q S, Wu Y, et al. 2021. Catalogue of mammals in China (2021). Acta Theriologica Sinica, 41(5): 487–501.]
- 魏辅文, 杨奇森, 吴毅, 等. 2022. 中国兽类分类与分布. 北京: 科学出版社. [Wei F W, Yang Q S, Wu Y, et al. 2022. Taxonomy and Distribution of Mammals in China. Beijing: Science Press.]
- 吴建平, 张海龙, 张勇. 2007. 大兴安岭原麝冬季的生境选择. 动物学杂志, 42(4): 45–50. [Wu J P, Zhang H L, Zhang Y. 2007. The habitat selection of Siberian musk deer in winter in daxing'an mountains. Chinese Journal of Zoology, 42(4): 45–50.]
- 肖文宏, 冯利民, 赵小丹, 等. 2014. 吉林珲春自然保护区东北虎和东北豹及其有蹄类猎物的多度与分布. 生物多样性, 22(6): 717–724. [Xiao W H, Feng L M, Zhao X D, et al. 2014. Distribution and abundance of Amur tiger, Amur leopard and their ungulate prey in Hunchun National Nature Reserve, Jilin. Biodiversity Science, 22(6): 717–724.]
- 肖治术. 2019. 红外相机技术在我国自然保护地野生动物清查与评估中的应用. 生物多样性, 27(3): 235–236. [Xiao Z S. 2019. Application of camera trapping to species inventory and assessment of wild animals across China's protected areas. Biodiversity Science, 27(3): 235–236.]
- 熊子翔, 许晓萌, 唱意, 等. 2024. 基于红外相机监测数据分析安徽麝活动节律. 动物学杂志, 59(1): 19–28. [Xiong Z X, Xu X M, Chang Y, et al. 2024. Activity rhythm of *Moschus anhuiensis* based on camera-trapping monitoring data. Chinese Journal of Zoology, 59(1): 19–28.]
- 张致荣. 2023. 贺兰山地区马麝种群现状及保护遗传学研究. 哈尔滨: 东北林业大学博士学位论文, 22–25. [Zhang Z R. 2023. Population demography and conservation genetics of Alpine musk deer in Helan Mountains, China. Harbin: Northeast Forestry University, Doctoral dissertation.]