

阿尔金山-祁曼塔格山豺种群活动节律和适宜生境分布

马永胜^① 贺孜尔汗·萨塔尔^① 王天晖^① 胡阿提·哈比亚西^① 高帅帅^②
李希^③ 张于光^④ 张溢^④ 黄太福^④ 丛微^④ 徐俊泉^⑤ 程芸^⑥ 李佳^{②*}

① 甘肃安南坝野骆驼国家级自然保护区管护中心 阿克塞 736400; ② 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 荒漠生态系统与全球变化国家林业和草原局重点实验室 北京 100091; ③ 国家林业和草原局国家公园(自然保护地)发展中心 北京 100714;

④ 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所 北京 100091; ⑤ 新疆巴州阿尔金山国家级自然保护区管理局 库尔勒 841000; ⑥ 新疆罗布泊野骆驼国家级自然保护区管理局 乌鲁木齐 830011

摘要: 掌握豺 (*Cuon alpinus*) 的活动节律和适宜生境分布特征, 对于理解该物种适应环境变化的生存策略及制订科学保护措施具有重要意义。本研究于 2020 年 1 月至 2024 年 7 月期间, 在阿尔金山-祁曼塔格山区域综合运用红外相机技术和样线调查, 通过核密度估计方法分析豺在雨季 (5 至 8 月) 和旱季 (9 至翌年 4 月) 日活动节律, 并基于物种分布模型评估其适宜生境分布格局与保护空缺。主要结果如下: (1) 布设在研究区域的 134 台红外相机累计工作 67 864 个相机日, 在 31 个点位共获得 118 次豺独立有效记录, 包括旱季 89 次和雨季 29 次, 其中 9 月记录频次最高; (2) 豺呈现典型的集小群活动特征, 平均集群 (1.6 ± 1.4) 只, 最大集群 8 只; 日活动节律呈晨昏双峰型; (3) R 4.4.2 软件 biomod2 包的 10 种模型中, 广义推进模型 (GBM) 模拟效果最好, 最大熵模型 (MAXENT) 评分最低; 真实技巧统计值 (TSS) 为 0.987, 受试者工作特征曲线下面积 (AUC) 值为 0.997, 表明模型预测结果优秀; (4) 环境因子贡献率分析显示, 气温年较差 (Bio7)、雪水当量 (Swe) 和最干季平均气温 (Bio9) 主导适宜生境分布; (5) 研究区域豺适宜生境总面积为 18 484.28 km², 包括中度适宜生境 13 497.47 km² 和高度适宜生境 4 986.81 km², 其中 45.44% 位于现有保护区内, 核心分布区集中于罗布泊、安南坝保护区及祁曼塔格山东麓。本研究揭示了阿尔金山-祁曼塔山地区豺的生态适应性特征, 可为该区域保护规划及拟建昆仑山国家公园的生态系统管理提供科学依据。

关键词: 豺; 红外相机技术; 物种分布模型; 保护空缺; 阿尔金山

中图分类号: Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2025) 06-801-13

基金项目 2023 年甘肃省林业和草原局自列省级林业和草原科技项目 (No. 2023kj50), 雪豹分布专项调查研究技术咨询项目 (甘肃安南坝野骆驼国家级自然保护区管护中心委托项目), 国家自然科学基金项目 (No. 32201430), 第三次新疆综合科学考察项目 (No. 2021xjkk1200);

* 通讯作者, E-mail: lijia2530@126.com;

第一作者介绍 马永胜, 男, 本科生; 研究方向: 自然保护区; E-mail: mys.m@163.com。

收稿日期: 2024-12-12, 修回日期: 2025-05-21 DOI: 10.13859/j.cjz.202524282 CSTR: 32109.14.cjz.24282

Activity Patterns and Suitable Habitat Distribution of Dholes *Cuon alpinus* Populations in the Altun-Qimantag Mountains

MA Yong-Sheng^① HEZIERHAN Sataer^① WANG Tian-Hui^① HUATI Habiyaxi^①
GAO Shuai-Shuai^② LI Xi^③ ZHANG Yu-Guang^④ ZHANG Yi^④ HUANG Tai-Fu^④
CONG Wei^④ XU Jun-Quan^⑤ CHENG Yun^⑥ LI Jia^{②*}

① *Gansu An'namba Wild Camel National Nature Reserve, Akesai 736400*; ② *Key Laboratory of Desert Ecosystem and Global Change of National Forestry and Grassland Administration, Institute of Ecological Conservation and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091*; ③ *National Park (Nature Protected Area) Development Center of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714*; ④ *Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091*; ⑤ *Xinjiang Management Bureau of the Bazhou Altun Mountain National Nature Reserve, Korla 841000*; ⑥ *Xinjiang Lop Nur Wild Camel National Nature Reserve Management Bureau, Urumqi 830011, China*

Abstract: [Objectives] Understanding the activity patterns and suitable habitat distribution of Dholes *Cuon alpinus* is crucial for comprehending its survival strategies in response to environmental changes and formulating effective conservation measures. **[Methods]** From January 2020 to July 2024, we used both infrared camera trapping and transect methods to conduct comprehensive surveys in the Altun-Qimantag Mountains. Through kernel density estimation, we analyzed the daily activity patterns of Dholes during rainy (May-August) and dry seasons (September-April), and evaluated their suitable habitat distribution along with protection gaps using species distribution models. The analysis was performed in R (version 4.4.2), primarily relying on the activity and biomod2 packages. **[Results]** (1) The 134 camera traps deployed across the study area accumulated 67 864 effective camera trap days, capturing 118 independent valid records (89 independent records in the dry season and 29 in the rainy season) of Dholes at 31 locations (Table 1), with September showing the highest record frequency. (2) Dholes exhibited typical small group-living behavior with average group size of 1.6 ± 1.4 ind. (maximum observed group size: 8 ind.), displaying crepuscular bimodal activity patterns (Fig. 2). (3) Among 10 models in biomod2 package in R 4.4.2, the Generalized Boosting Model (GBM) performed the best and the MAXENT model performed the worst. The ensemble model demonstrated excellent predictive accuracy, with the TSS and AUC values of combined model being 0.987 and 0.997, respectively (Fig. 3). (4) Variable contribution analysis revealed that annual temperature range (Bio7, 72.87%), snow water equivalent (Swe, 37.75%), and mean temperature of driest quarter (Bio9, 32.16%) were the dominant factors influencing habitat suitability (Figs. 3, 4). (5) The total suitable habitat area covered 18 484.28 km² (moderately suitable: 13 497.47 km²; highly suitable: 4 986.81 km²), with only 45.44% being within protected areas. Core distribution areas were concentrated in Lop Nur and An'namba Nature Reserve, along with the eastern slopes of Qimantag Mountains (Fig. 5). **[Conclusion]** This study provides the systematic documentation of ecological adaptation characteristics of Dholes in the Altun-Qimantag Mountains, offering scientific foundations for regional conservation planning and ecosystem management of the proposed Kunlun Mountains National Park.

Key words: Dhole; Camera trapping; Species distribution model; Protection gap; Altun Mountains

野生动物的活动节律和空间(生境)分布是其长期适应自然环境演化的重要表征,这一生态过程受到内源性因素(如生理节律、遗传特征)和外源性因素(如环境因子、种间关系)的共同调控,构成了野生动物生态适应的核心内容(Andreoni et al. 2021, Cserkés et al. 2023)。在空间分布维度上,野生动物表现出对栖息环境的选择性,这种选择受到地形、地貌、植被群落特征和人类活动强度等多重环境因子的综合影响,并随环境梯度变化呈现动态响应。具体而言,海拔梯度形成的垂直气候带为不同生态需求的野生动物提供了多样化的可选生境(Mamantov et al. 2021);而植被作为关键的环境要素,不仅为野生动物提供食物资源和栖息场所,还通过其空间结构特征影响动物的隐蔽条件和活动模式,进而塑造野生动物群落的结构与功能(Wilson et al. 2013, Arroyo-Gerala et al. 2024)。在时间维度上,野生动物的活动节律表现出显著的周期性特征,这种节律受到光周期、温度节律等环境因子的调控,并随季节更替呈现规律性变化(Bonebrake et al. 2020, Vilella et al. 2020)。例如,研究表明中华扭角羚(*Budorcas tibetana*)的日活动节律存在显著的季节性差异,其夏季和冬季晨昏活动高峰时间相差 2 h (Li et al. 2020a)。野生动物这种时空行为模式的协同演化是维持种群稳定和生态系统平衡的重要机制(孙儒泳等 2019)。因此,深入探究野生动物与栖息环境的互作关系及其驱动机制,揭示环境变化背景下野生动物的行为适应策略,不仅是保护生物学和行为生态学领域亟待解决的重要科学问题,也可为制定科学的野生动物保护策略和管理措施提供理论基础和实践指导。

豺(*Cuon alpinus*)作为亚洲大陆广泛分布的顶级捕食者,其分布范围北起西伯利亚及阿尔泰山脉,南达东南亚和南亚地区,能够适应从茂密森林、开阔草地到半干旱荒漠等多种生境类型(刘少英等 2019)。这种高度社会化的食肉动物常以集群合作捕猎有蹄类动物为特

征,是山地森林和草原生态系统的旗舰物种,在维护生态系统结构完整性、能量流动和物种循环等生态过程中发挥着重要作用(Kamler et al. 2015)。历史上,我国是豺分布最广、种群数量最多的国家之一,其踪迹遍及除台湾和海南外的绝大多数地区(蒋志刚 2024)。然而,近几十年来,受人类活动范围扩张、栖息地丧失、报复性猎杀、盗猎、家畜传染犬瘟热和狂犬病等传染性疾病的多重威胁,我国豺种群经历了急剧衰退(Wu et al. 2021)。目前,其分布区已严重萎缩,栖息地呈高度破碎化格局,仅在云南、西藏、四川等西南地区,以及阿尔金山和祁连山等青藏高原边缘地带偶有零星报道(Xue et al. 2015, Li et al. 2020b, 李佳等 2020, 李晟等 2020, 马志兵等 2023, 史湘莹等 2023)。为应对豺种群濒危的严峻形势,我国政府于 2021 年将其提升至国家一级重点保护野生动物,并列为亟需开展抢救性保护的极度濒危动物,同时通过退耕还林、退牧还草、建立国家公园等一系列生态保护措施,积极推进豺栖息地的恢复与重建(欧阳志云等 2018, 国家林业和草原局等 2021)。然而,由于豺野生种群数量急剧下降,野外遇见率极低,且缺乏可供长期研究的稳定种群,导致对其种群动态、分布格局及活动规律等基础生态学信息的认知严重不足,这极大制约了科学保护策略的制定与实施。因此,亟需加强对豺的种群监测和生态学研究,为制定有效的保护管理措施提供科学依据。

阿尔金山-祁曼塔格山地处藏北高原北缘,是连接祁连山和昆仑山两大山系的重要生态廊道,保存着完整的高寒荒漠生态系统,为雪豹(*Panthera uncia*)、藏羚(*Pantholops hodgsonii*)、野骆驼(*Camelus ferus*)等多种濒危野生动物提供了关键栖息地(李维东等 2013, 薛亚东等 2014)。得益于阿尔金山国家级自然保护区(拟纳入昆仑山国家公园范围)、安南坝野骆驼国家级自然保护区、罗布泊野骆驼国家级自然保护区等保护网络的建立,阿尔金山-祁曼

塔格山地区的生态环境持续改善。区域内豺及主要猎物种群数量呈现恢复趋势，栖息地质量逐渐提升，为开展野生豺种群的生态学研究提供了理想的天然实验场所（王秀磊等 2024，吴昊等 2024）。本研究以阿尔金山-祁曼塔格山为研究区域，运用红外相机技术和样线法开展豺种群调查，通过核密度估计方法分析雨季和旱季豺的日活动节律特征，并基于物种分布模型构建豺的适宜生境分布格局。本研究旨在：（1）阐明阿尔金山-祁曼塔格山地区豺的活动节律特征；（2）揭示豺的适宜生境分布规律；（3）探讨豺与环境因子的相互关系及其对环境变化的适应策略。研究结果将为完善豺的保护对策、制定科学的保护管理措施提供重要的科学依据。

1 研究地区与方法

1.1 研究区概况

阿尔金山地处新疆维吾尔自治区若羌县境内，东接青海、甘肃两省交界处的祁连山，西邻东昆仑山北支（祁曼塔格山），构成塔里木盆

地和柴达木盆地之间的天然地理屏障。本研究区域主要涵盖阿尔金山及毗邻的祁曼塔格山两条山脉，地跨新疆阿尔金山、罗布泊和甘肃安南坝三个国家级自然保护区（图 1）。需要特别说明的是，尽管祁曼塔格山位于阿尔金山国家级自然保护区内，但阿尔金山国家级自然保护区实际上主要坐落于东昆仑中段北坡库木库里大型凹陷盆地中，与阿尔金山在地理上并无直接关联（图 1，李维东等 2013）。研究区域地形复杂，地势起伏显著，平均海拔超过 3 000 m，其中阿尔金山主峰海拔达 5 798 m。该区域属于典型的大陆性高寒荒漠气候，全年无绝对无霜期，四季特征不明显，主要表现为冷暖季交替，1 月平均气温 - 14.7 °C，7 月平均气温 27.8 °C。气候极度干旱，年降水量不足 50 mm，且主要集中在 5 至 8 月，荒漠化程度严重（库姆塔格沙漠综合科学考察队 2012）。区域无常年地表径流，仅在雨季形成短暂的山谷径流，野生动物主要依赖山谷裂隙水溢出形成的咸泉补充水分。阿尔金山-祁曼塔格山地区生物多样性丰富，是野骆驼、雪豹、豺等多种国家重点保护

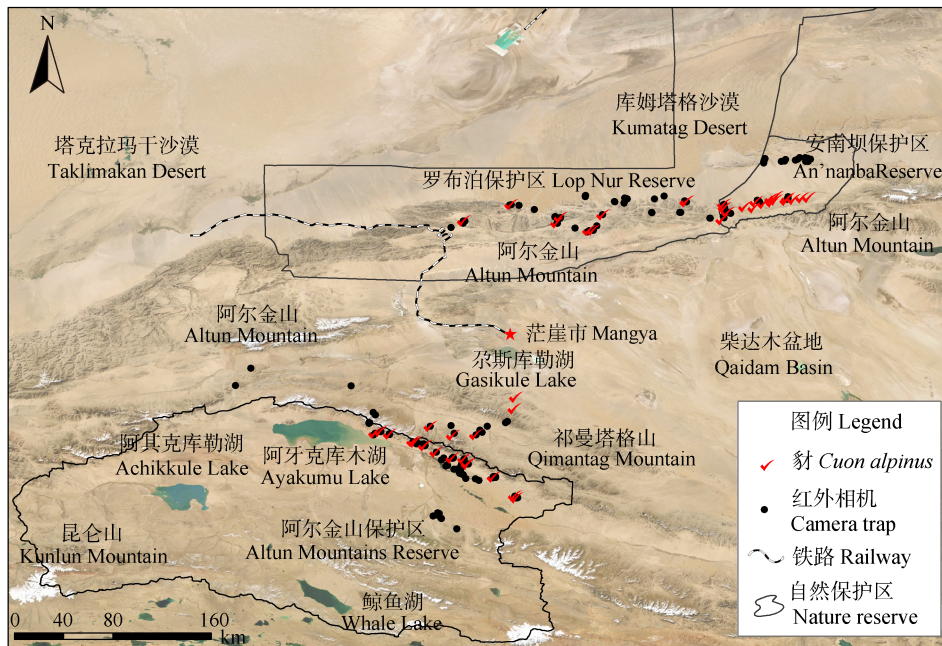


图 1 阿尔金山-祁曼塔格山红外相机点位和豺分布

Fig. 1 Distribution of infrared camera traps and Dholes *Cuon alpinus* in the Altun-Qimantag Mountains

野生动物重要栖息地。根据阿尔金山降水量特征, 本研究将全年分为雨季(5至8月)和旱季(9至翌年4月)(袁磊 2015)。查询邻近行政区域青海茫崖市 2021 年 1 月至 2023 年 12 月日出日落时间(数据来源: <https://richuriluo.122cha.com>), 雨季平均日出时间为 06:35 时, 日落时间为 20:52 时; 旱季平均日出时间为 08:09 时, 日落时间为 19:17 时。

1.2 数据收集

1.2.1 红外相机调查 鉴于阿尔金山水资源极度匮乏, 本研究采用以水源点为中心的布设策略, 将红外相机安装在水源点及其周边的野生动物通道上, 这种调查方法可以获取丰富的野生动物信息(李佳等 2020)。然而, 研究区域地形复杂, 寻找水源点较为困难, 红外相机的布设随着新水源点的发现而逐步增加。在阿尔金山区域, 2020 年 1 月至 2024 年 6 月期间, 沿安南坝和罗布泊保护区内水源点及周边区域, 自东向西累计布设了 78 台红外相机, 用于监测野生动物活动。在祁曼塔格山区域的调查分两个阶段进行: 第一阶段(2021 年 1 月至 2022 年 1 月), 在阿尔金山国家级自然保护区的祁曼塔格山及周边布设 20 台红外相机, 开展野生动物资源初步调查; 第二阶段(2022 年 12 月至 2024 年 7 月), 研究团队在祁曼塔格山区域布设 36 台红外相机, 进一步开展系统调查。红外相机固定在离地面 50 ~ 100 cm 的铁桩或石桩上, 清除可能遮挡镜头的杂草及灌丛, 确保相机前方视野清晰。相机设置为“拍照 + 视频”拍摄模式, 采用 24 h 不间断监测。研究团队每 4 至 6 个月定期进行数据下载和设备维护, 以确保监测工作的连续性和数据的完整性。

1.2.2 豺点位收集 在阿尔金山-祁曼塔格山地区, 共收集到 103 个豺分布点位数据。数据来源包括: (1) 红外相机监测到 31 个豺点位(2020 至 2024 年); (2) 基于粪便 DNA 技术鉴定的 40 个豺分布点位(2023 至 2024 年; 丛微等 2024); (3) 茫崖市林草局工作人员野外

实地观测记录 7 个豺点位(2024 年); (4) 安南坝保护区当地牧民上报的豺目击事件及豺肇事 25 个点位(2018 至 2024 年)。考虑到豺点位数据并非通过系统调查获取, 为避免空间自相关对模型精度的影响, 我们根据豺的日活动平均距离(约 5.5 km; Thing et al. 2022), 用空间过滤方法对数据进行处理, 以 5.5 km 为半径, 删除该范围内的冗余点位, 仅保留 1 个点位。经过筛选后, 最终获得 47 个豺独立分布点位用于构建物种分布模型(species distribution model, SDM)。

1.2.3 环境变量数据来源 参考豺的重要生态学特征(Khoewsree et al. 2022, Thing et al. 2022, Xia et al. 2023), 选取气候、生物、地形及人类活动等环境变量, 用于构建物种分布模型。具体变量及其数据来源如下: (1) 气候因子: 来源于地球陆地表面气候学数据集(CHELSA v2.1)(<https://chelsa-climate.org>)的 19 个常见生物气候变量(Bio1 ~ Bio19), 以及 5 个附加气候因子, 积雪天数(Scd)、雪水当量(Swe)、植物生长季首日(Fgd)、霜冻变化频率(Fcf)和干旱指数(Ai), 所有气候数据分辨率为 1 km(Chen et al. 2023); (2) 生物因子: 净初级生产力(net primary productivity, NPP)来源于 CHELSA v2.1, 分辨率为 1 km; 归一化植被指数(NDVI)来源于 MOD13A2 V061 NDVI 数据(LPDAcc 发布, 分辨率 500 m; Mutanga et al. 2019), 然后利用 Google Earth Engine(GEE)平台计算 2000 至 2020 年 NDVI 均值; 水源分布包括河流(River)、湖泊(Lake)(OpenStreetMap 平台, <https://www.openstreetmap.org>)及新疆罗布泊和甘肃安南坝国家级自然保护区的水源点(Water); (3) 人类活动因子: 道路(Way)来源于 OpenStreetMap 平台; 人类足迹(HFP)采用 2022 年全球人类足迹数据集(https://www.x-mol.com/groups/li_xuecao/news/48145); 人类影响指数(Hii)来源于社会经济数据与应用中心(SEDAC, <https://sedac.ciesin>。

columbia.edu/), 分辨率为 1 km; (4) 地形因子: 海拔 (Ele) 数据来源于中国科学院科学数据库地理空间数据云发布的高程数据 (<http://www.gscloud.cn>), 分辨率为 30 m, 并利用 ArcGIS 10.8 (ESRI Inc.) 计算生成坡向 (Aspect) 和坡度 (Slope)。所有环境变量 (共 35 个) 在 ArcGIS 10.8 统一重采样至 1 km 的分辨率, 以确保数据空间一致性, 用于物种分布模型建模。

1.3 数据分析

1.3.1 活动节律分析 为避免重复记录, 我们采用以下标准对红外相机数据进行筛选: 同一相机点位在 30 min 内连续拍摄到多张 (段) 豺照片或视频, 仅保留 1 张照片作为独立有效记录 (李佳等 2020)。将所有有效记录的拍摄时间转换为真太阳时 (sun time), 采用核密度方法评估豺日活动节律, 绘制豺活动强度曲线, 分析过程主要使用 R 4.4.2 软件 activity 包 (Novellet et al. 2012, Meredith et al. 2021)。根据太阳活动周期, 将豺全天活动时间划分为 4 个时段, 清晨 (日出前后 1 h)、白天 (日出后 1 h 至日落前 1 h)、傍晚 (日落前后 1 h) 和夜间 (日落后 1 h 至日出前 1 h), 采用 Mella-Méndez 等 (2019) 提出的方法计算豺的活动指数: $w_i = o_i/e_i$, 式中, w_i 为豺在 i 时间段的活动指数 (i 分别为 1、2、3 和 4, 分别代表清晨、白天、傍晚和夜间); o_i 为豺在 i 时间段独立有效记录数占总有效独立记录数的比例; e_i 为 i 时间段的长度占全天时长的比例。 $w_i > 1$ 表明豺倾向于在该时间段活动; $w_i \leq 1$ 表明豺回避该时间段活动。

1.3.2 适宜生境分析 本研究基于 R 4.4.2 软件 biomod2 包 (<https://github.com/biomodhub/biomod2/issues>), 采用 10 种算法模型构建阿尔金山-祁曼塔格山地区豺适宜生境分布模型, 包括: 最大熵模型 (maximum entropy model, MAXENT)、人工神经网络模型图 (artificial neural network, ANN)、广义线性模型 (generalized linear model, GLM)、广义推进

模型 (generalized boosted regression model, GBM)、多元适应回归样条函数 (multivariate adaptive regression splines, MARS)、分类树模型 (classification and regression tree analysis, CTA)、柔性判别分析 (flexible discriminant analysis, FDA)、随机森林 (random forest, RF)、表面分布区分室模型 (surface range envelope model, SRE) 和广义加法模型 (generalized addition model, GAM)。在构建模型前, 首先采用 Pearson 相关分析对环境变量进行筛选, 消除相关性较高的变量 ($|r| > 0.8$)。参考豺的重要生态学特征 (Khoewsree et al. 2022, Thing et al. 2022, Xia et al. 2023), 最终选择 8 个环境变量: 气温年较差 (Bio7)、雪水当量 (Swe)、最干季平均气温 (Bio9)、年降水量 (Bio12)、海拔 (Ele)、净初级生产力 (NPP)、距道路距离 (Way) 和距水源点距离 (Water)。由于野外调查仅能获得豺的存在点位数据, 本研究基于豺日活动平均距离 (约 5.5 km) 生成缓冲区, 在缓冲区外随机生成 1 000 个“伪-未发现点 (pseudo-absence data)”, 并随机组成 3 组“存在-背景”点集, 以提升模型精度 (Inman et al. 2021)。模型验证采用真实技巧统计值 (true skill statistic, TSS) 和受试者工作特征曲线下面积 (area under the receiver operating characteristic curve, AUC), 其中 TSS 超过 0.7 表示模型准确性高 (李佳等 2022, 高帅帅等 2024)。数据划分采用 75% 点位作为训练集, 25% 作为测试集。模型运算 10 次后, 输出为 0-1 的概率栅格图, 数值越高表明生境适宜度越高。根据最大 TSS 确定的阈值 (P), 将生境划分为: 不适宜生境 ($\leq P$) 和适宜生境 ($> P$), 后者进一步划分为中度适宜生境和高度适宜生境。同时, 通过叠加安南坝、罗布泊和阿尔金山保护区边界, 进行保护空缺分析。

2 结果

2.1 豺日活动节律

2020 年 1 月至 2024 年 7 月期间, 安装在

阿尔金山-祁曼塔格山地区的红外相机累计完成 67 864 个相机工作日, 共在 31 个监测点位记录到 203 张豺活动照片, 经筛选获得 118 次豺独立有效记录。从时间分布来看, 豺的出现频次呈现明显的季节性差异: 9 月独立有效记录次数多, 达 17 次; 而 5 月和 8 月的记录次数最少, 各仅有 5 次。按季节统计显示, 旱季 (9 至翌年 4 月) 豺出现频次明显高于雨季 (5 至 8 月), 分别有 89 次和 29 次独立有效记录。红外相机监测数据表明, 阿尔金山-祁曼塔格山地区豺表现出典型的集群活动特征, 平均集群大小为 (1.6 ± 1.4) 只 ($n = 118$)。研究期间共记录到 8 次 4 只以上豺集群, 其中最大集群规模达到 8 只。

阿尔金山-祁曼塔格山地区豺的日活动节律分析表明, 豺活动选择系数 (w_i) 在白天、清晨和傍晚均大于 1, 夜间则小于 1, 显示出典型的昼行性活动特征 (表 1)。豺日活动节律呈现显著的双峰模式, 且活动高峰时间随季节性的日出日落时间变化而调整 (图 2)。在雨季 (5 至 8 月), 豺的活动节律表现为: 日出前 (06:35 时) 活动逐渐增强, 日出后持续上升至 08:00 时达到主高峰, 随后活动强度逐渐减

弱; 下午 (12:00 ~ 18:00 时) 维持较低活动水平; 日落前后 (20:52 时) 活动再次增强, 于 21:00 时形成次高峰后逐渐减弱, 夜间 (00:00 ~ 06:00 时) 基本处于静息状态。在旱季 (9 至翌年 4 月) 则呈现不同的活动模式: 夜间 3:00 时开始活动逐渐增强, 9:00 时形成次高峰, 之后活动强度逐渐下降; 12:00 时后重新增加, 至日落时分 (19:17 时) 达到主高峰, 之后活动强度逐渐下降, 夜间 (00:00 ~ 03:00 时) 活动强度降至最低。

表 1 阿尔金山-祁曼塔格山豺雨季和旱季日活动选择指数 (w_i)

Table 1 Daily activity selection index (w_i) of Dhole *Cuon alpinus* during rainy and dry season in the Altun-Qimantag Mountains

时间段 Period	独立有效记录 (日活动选择指数 w_i) Independent records (Daily activity selection index)	
	雨季 Rainy season	旱季 Dry season
	清晨 Morning	5 (2.07)
白天 Diurnal	16 (1.36)	43 (1.27)
傍晚 Dusk	6 (2.48)	13 (1.75)
夜间 Night	2 (0.15)	20 (0.49)

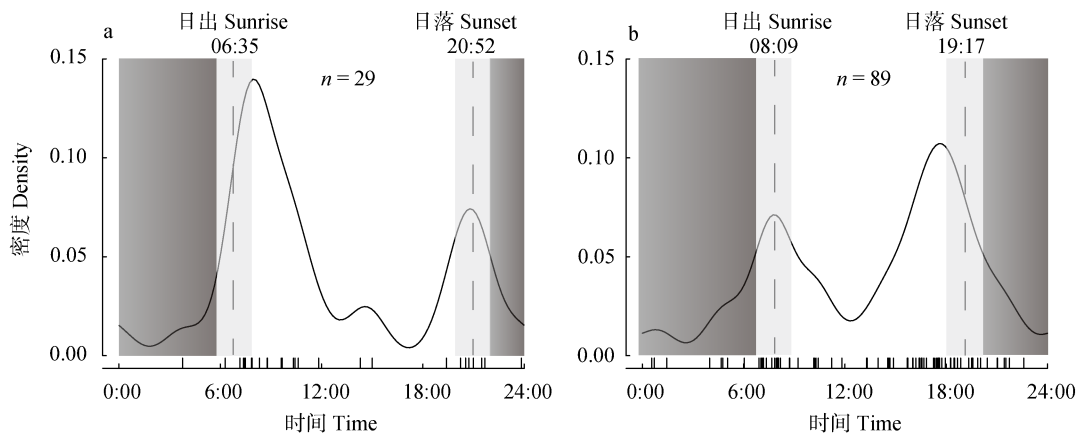


图 2 阿尔金山-祁曼塔格山豺雨季 (a) 和旱季 (b) 日活动节律

Fig. 2 Daily activity patterns of Dhole *Cuon alpinu* during rainy (a) and dry (b) seasons in the Altun-Qimantag Mountains

深灰色表示夜间, 灰色表示晨昏, 白色表示白天。

Dark grey indicates night; grey indicates morning and dusk; white indicates diurnal.

2.2 豺适宜生境分布

模型评估结果见图 3, 在 biomod2 包 10 种模型中, 广义推进模型 (GBM) 预测精度最高 (0.991), 而最大熵模型 (MAXENT) 表现相比较差 (0.716)。通过加权平均法所构建的集合模型表现出优异的预测能力, 其真实技巧统计值 (TSS) 达到 0.987, 受试者工作特征曲线下面积 (AUC) 值为 0.997, 表明模型对豺适宜生境的预测结果具有高度可靠性 (图 3a)。

环境变量贡献度分析表明 (图 3c), 各因子对豺适宜生境分布的影响程度存在显著差异: 气温年较差 (Bio7) 贡献最高 (72.87%), 其次依次为雪水当量 (Swe, 37.75%)、最干季平均气温 (Bio9, 32.16%)、年降水量 (Bio12, 29.16%)、海拔 (Ele, 26.04%)、净初级生产力 (NPP, 23.66%)、道路 (Way, 7.40%)、距水源点距离 (Water, 5.32%) (图 4)。基于最大 TSS 确定的阈值 ($P=0.69$), 将阿尔金山-祁曼塔格山地

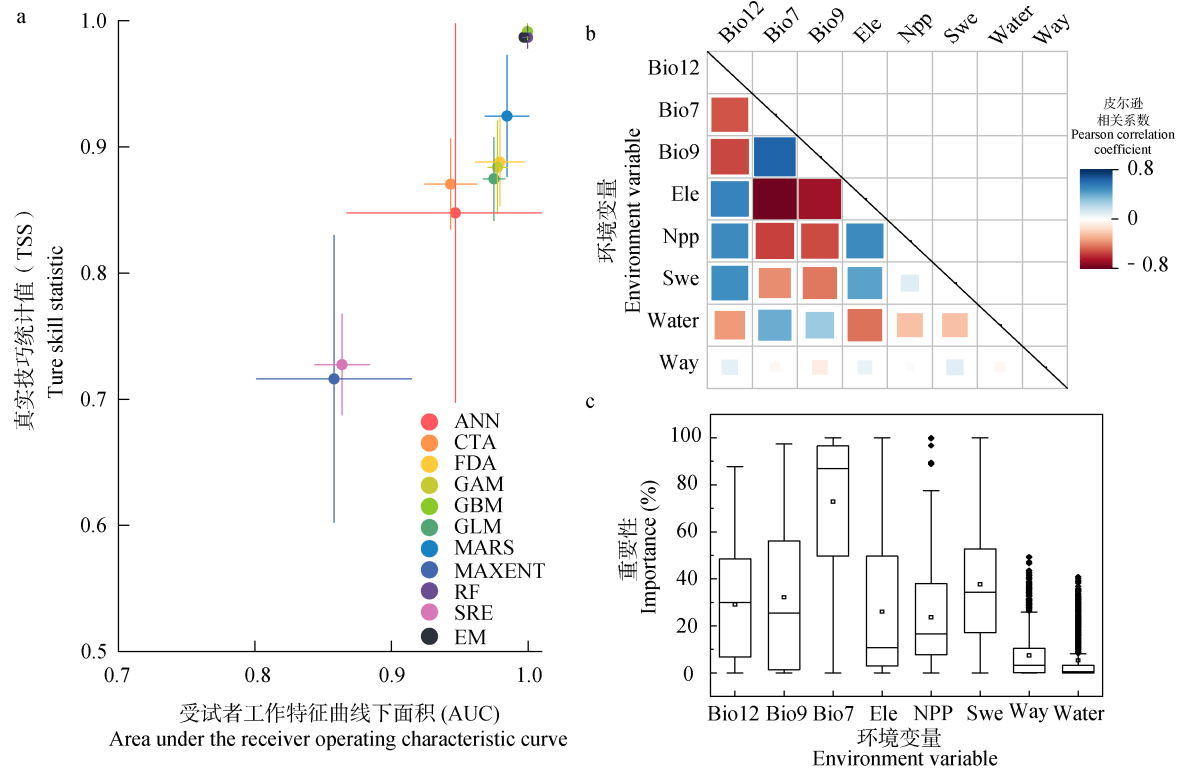


图 3 单一和集合模型的评估精度 (a)、用于构建模型的环境变量之间的相关性 (b) 和环境变量对模型的综合贡献率 (c)

Fig. 3 Evaluation accuracy of individual and ensemble models (a), correlation matrix of environmental variables used for model construction (b), and comprehensive contribution rates of environmental variables to models (c)

图 a: ANN. 人工神经网络模型; CTA. 分类与回归树模型; FDA. 柔性判别分析模型; GAM. 广义加法模型; GBM. 广义增强回归模型; GLM. 广义线性模型; MARS. 多元适应回归样条函数; MAXENT. 最大熵值模型; RF. 随机森林; SRE. 表面分布区室模型; EM. 组合模型。图 b 和 c: Bio12. 年降水量; Bio9. 最干季平均气温; Bio7. 气温年较差; Ele. 海拔; NPP. 净初级生产力; Swe. 雪水当量; Way. 道路; Water. 水源点

Panel a: ANN. Artificial neural network; CTA. Classification and regression tree analysis; FDA. Flexible discriminant analysis; GAM. Generalized addition model; GBM. Generalized boosted regression model; GLM. Generalized linear model; MARS. Multivariate adaptive regression splines; MAXENT. Maximum entropy model; RF. Random forest; SRE. Surface range envelope model; EM. Ensemble model. Panels b and c: Bio12. Annual precipitation; Bio9. Mean temperature of driest quarter; Bio7. Annual temperature range; Ele. Elevation; NPP. Net primary productivity; Swe. Snow water equivalent; Way. Distance from roads; Water. Distance from water source

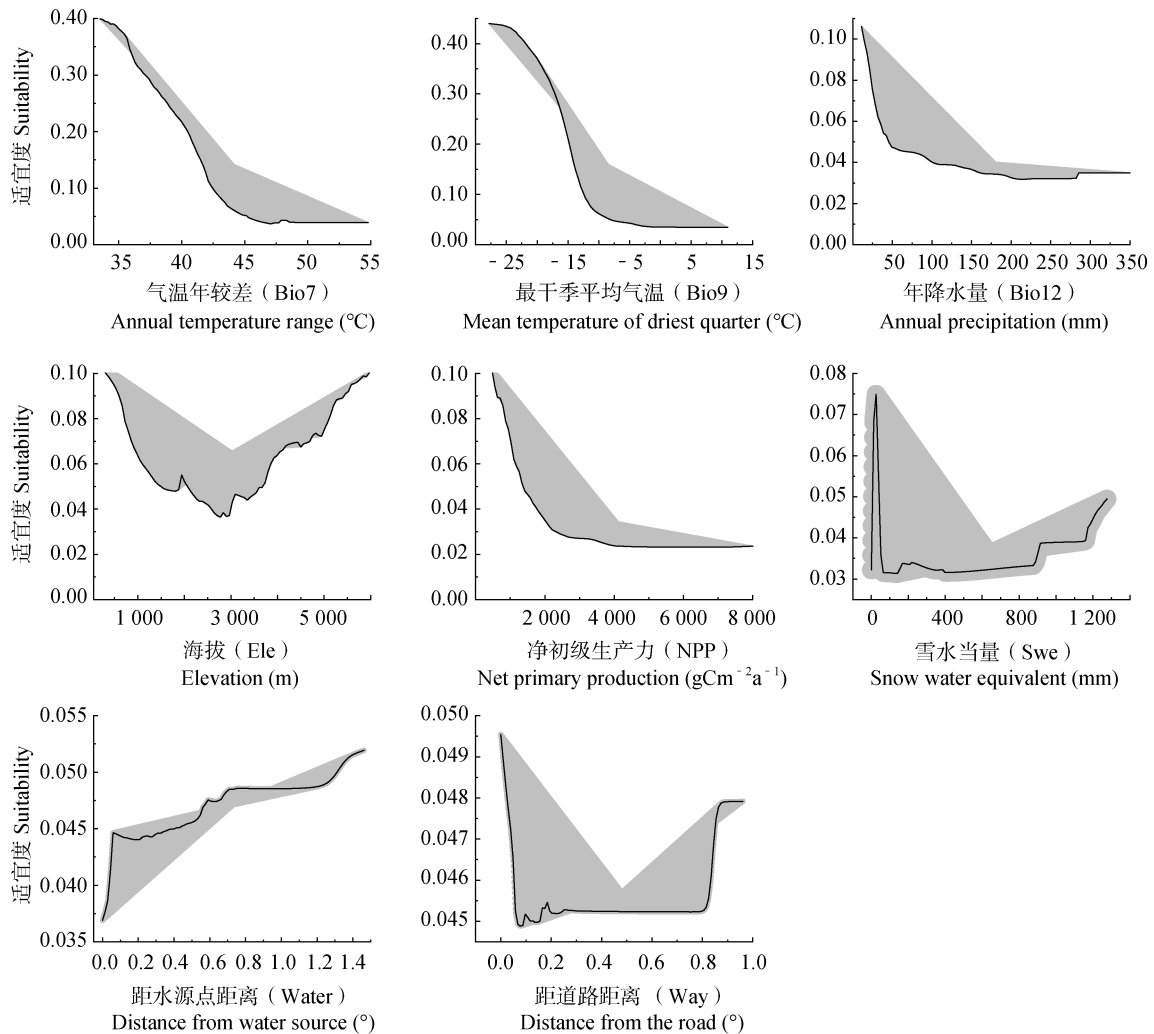


图 4 进入物种分布模型的环境变量响应曲线

Fig. 4 Response curves of environmental variables incorporated into the species distribution model

区划分为三类生境：不适宜生境 ($P \leq 0.69$)、中度适宜生境 ($0.69 < P \leq 0.85$) 和高度适宜生境 ($P > 0.85$)。结果显示，阿尔金山-祁曼塔格山地区豺适宜生境总面积 18 484.28 km²，其中中度适宜生境 (13 497.47 km²，占 73.02%) 主要分布于罗布泊保护区中西部、茫崖市周边山区和祁曼塔格山周边，高度适宜生境 (4 986.81 km²，占 26.98%) 集中分布于安南坝及罗布泊保护区境内 (图 5)。

2.3 保护空缺分析

保护空缺分析结果表明，研究区域内三个

主要保护区对豺适宜生境的保护情况存在显著差异，甘肃安南坝保护区覆盖豺适宜生境 1 317.75 km²，其中高度适宜生境面积占比达 77.9% (1 026.95 km²)；新疆罗布泊保护区保护豺适宜生境面积最大 (6 569.75 km²)，但高度适宜生境仅占 40.5% (2 659.81 km²)；新疆阿尔金山保护区保护豺适宜生境面积最小 (510.58 km²)，且以中度适宜生境为主 (76.7%，391.52 km²)。综合分析表明，上述三个保护区共保护豺适宜生境 8 398.08 km²，占区域适宜生境总面积的 45.44%。值得注意的

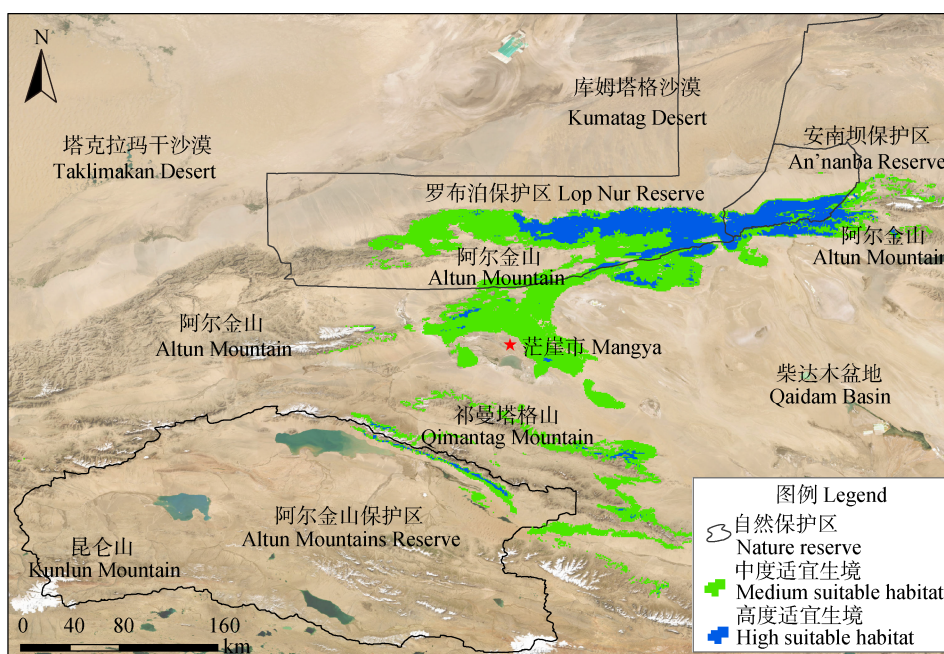


图5 阿尔金山-祁曼塔格山豺适宜生境分布及保护空缺

Fig. 5 Suitable habitat distribution and protection gaps of Dholes *Cuon alpinu* in the Altun-Qimantag Mountains

是, 仍有 10 085.20 km² (54.56%) 适宜生境 (包括中度适宜和高度适宜生境) 处于保护区网络之外, 主要分布在祁曼塔格山东麓、茫崖市北部山区等区域 (图5)。

3 讨论

本研究采用红外相机非损伤性技术, 从时间尺度揭示栖息在阿尔金山-祁曼塔格山地区的豺雨季和旱季日活动节律特征, 为理解这一隐秘物种适应高寒山地环境变化的行为策略提供了重要依据。基于物种分布模型模拟结果, 明确豺的适宜生境分布格局及其关键环境驱动因子, 这不仅深化了对物种-栖息地关系的认识, 更为制定科学的豺种群保护对策提供了理论支撑。研究选取阿尔金山-祁曼塔格山这一地理单元内呈低密度广布格局的豺种群作为研究对象, 通过系统评估现有自然保护地体系保护空缺, 为正在规划中的昆仑山国家公园建设以及现有保护体系的优化提供了科学依据, 对于提升国家公园与自然保护区在维持生态系统完

整性和生态功能方面的效能具有重要实践价值。

野生动物活动节律受多种因素影响, 包括生理需求、捕食策略、种间竞争等, 同时对其生存环境呈现适应性行为特征 (Norris et al. 2010)。然而, 由于传统研究方法的不足, 以及地形复杂、植被遮蔽、物种行为隐秘等因素, 许多野生动物活动节律及其行为适应机制仍不明确 (Vilella et al. 2020)。近年来, 红外相机技术为野生动物监测提供了长期、连续的行为时间序列数据, 极大推动了活动节律研究的深入发展 (肖治术等 2022)。本研究显示, 阿尔金山-祁曼塔格山地区的豺种群表现出典型的昼行性活动模式, 其日活动高峰集中在清晨和傍晚, 呈双峰型节律, 与东南亚地区的豺种群活动特征一致 (Palei et al. 2022)。然而, 豺活动高峰存在明显的季节性差异, 在短暂的雨季, 豺的清晨活动高峰较旱季提前, 傍晚活动则相应延后, 这与当地日出日落时间的季节性变化高度吻合。具体而言, 在高温的雨季, 豺倾向于在温度较低的清晨和傍晚活动, 而下午

(12:00 ~ 18:00 时) 则多隐匿于山谷, 这种策略既能有效避开日间酷暑, 又能利用晨昏时段的低光照条件掩护其捕食同样具有晨昏活动高峰的有蹄类猎物 (Xue et al. 2018)。而在寒冷漫长的旱季, 豺傍晚活动强度显著高于清晨, 这可能是一种节约策略 (Wei et al. 2000, Li et al. 2020b), 多数豺倾向于傍晚集群捕食, 并在捕食后夜间静息消化食物、减少能量消耗, 从而无需夜间额外觅食就能满足能量需求。

本研究表明, 豺适宜生境主要分布在罗布泊和安南坝保护区、茫崖市周边山区以及祁曼塔格山一带, 其中, 温度、降水和海拔三项环境变量是影响其分布的关键环境变量。阿尔金山作为亚洲中部最干旱的山地之一, 其北侧毗邻极端干旱的库姆塔格沙漠, 植物极度稀缺, 仅野骆驼和鹅喉羚 (*Gazella subgutturosa*) 等极少数适应性强的野生动物能在库姆塔格沙漠短暂栖息, 而大多数野生动物则集中分布于阿尔金山、山前洪冲积扇带及周边沟谷区域。在阿尔金山 3 000 至 4 000 m 海拔范围, 降水相对较高, 加之主峰积雪融水的补给 (袁国映等 2010), 使得周边沟谷分布有较多泉眼, 形成局部湿润微环境。相较于北侧的库姆塔格沙漠和南侧的柴达木盆地, 这些沟谷不仅温度较低, 且具备稳定的水源, 为豺等野生动物提供了关键的生存条件。此外, 阿尔金山-祁曼塔格山地区处于藏北高原北缘, 地形复杂且垂直梯度显著, 孕育了多样化的生态系统, 为豺及其主要猎物岩羊 (*Pseudois nayaur*)、盘羊 (*Ovis ammon*) 和鹅喉羚等的生存与繁衍提供了理想生境 (王秀磊等 2024, 吴昊等 2024)。海拔是影响豺空间分布的重要因子, 研究显示, 豺倾向于在阿尔金山沟谷深处活动, 这与其生态适应策略密切相关: 一方面, 沟谷复杂的地形为豺提供了隐藏场所, 有助于提高捕食成功率并降低被捕食风险; 另一方面, 沟谷水源地通常是其猎物的主要活动区域, 隐蔽于此有利于伏击策略的实施 (Xue et al. 2015)。值得注意的是, 阿尔金山-祁曼塔格山地区高海拔区域是雪

豹的主要分布区, 而低海拔荒漠地带则被猞猁 (*Lynx lynx*) 和狼 (*Canis lupus*) 占据, 相较于这些体型更大的顶级捕食者, 豺通过选择沟谷深处集群活动的策略, 有效降低了竞争资源压力, 体现了显著的生态位分化现象。

阿尔金山-祁曼塔格山地区作为我国重要的无人区生态系统, 其独特的生物多样性是野生动物长期适应高寒荒漠环境演化的结果, 具有全球性的生态保护价值。然而, 近几十年来, 全球气候变化和人类活动 (包括矿产资源开发、过度放牧及非法旅游等) 的双重影响, 使得该区域野生动物栖息地面临严重威胁 (高丽君等 2009, 李佳等 2023)。为应对这一挑战, 我国政府采取了一系列重要保护措施: 建立阿尔金山、罗布泊和安南坝国家级自然保护区, 并规划昆仑山国家公园, 构建以国家公园为主体的自然保护地体系。通过清理整顿, 目前已实现保护区内采矿权全部退出, 并对进入保护区的道路实行封闭管理。这些措施成效显著, 藏羚、藏野驴 (*Equus kiang*)、野骆驼等有蹄类动物种群数量稳步回升, 红外相机监测数据显示, 雪豹、狼及猞猁等顶级捕食者出现频率明显增加, 曾经消失的豺和棕熊 (*Ursus arctos*) 种群也呈现恢复态势 (高丽君等 2020, Xue et al. 2021, 李佳等 2023)。然而, 随着阿尔金山-祁曼塔格山地区生态环境持续改善, 豺种群适宜栖息地正不断向保护区外围扩展, 目前仅有 45.44% 的豺适宜生境处于现有保护区范围内, 存在显著的保护空缺。特别是青海茫崖市周边山区, 作为连接阿尔金山与祁曼塔格山的关键生态廊道, 分布着大量未被纳入保护区的中度适宜生境, 严重制约了保护区的生态功能发挥。茫崖市是西部重要能源基地交通枢纽, 其经济发展与生态保护的矛盾尤为突出。如何平衡资源开发与生态保护的关系, 提升野生动物栖息地连接性和完整性, 将成为未来国家公园和保护区管理者面临的重要课题。建议通过优化保护区边界、建立生态廊道、完善保护网络等措施, 实现经济发展与生态保护双赢。

参 考 文 献

- Andreoni A, Augugliaro C, Zozzoli R, et al. 2021. Diel activity patterns and overlap between Eurasian red squirrels and Siberian chipmunks in native and introduced ranges. *Ethology Ecology & Evolution*, 33(1): 83–89.
- Arroyo-Gerala P, Towns V, Medellín R A, et al. 2024. Community of medium and large-sized mammals and functional diversity in a tropical rainforest of Southern México under different degrees of human pressure. *Therya*, 15(2): 133–150.
- Bonebrake T C, Rezende E L, Bozinovic F. 2020. Climate change and thermoregulatory consequences of activity time in mammals. *The American Naturalist*, 196(1): 45–56.
- Chen T R, Zhang Y, Li N N. 2023. Evaluation of CMIP6 HighResMIP models and ERA5 reanalysis in simulating summer precipitation over the Tibetan Plateau. *Atmosphere*, 14(6): 1015.
- Cserkés T, Kiss C, Sramkó G. 2023. Seasonal and diel activity patterns of small mammal guilds on the Pannonian Steppe: a step towards a better understanding of the ecology of the endangered Hungarian birch mouse (*Sicista trizona*) (Sminthidae, Rodentia). *Mammal Research*, 68(1): 13–25.
- Inman R, Franklin J, Esque T, et al. 2021. Comparing sample bias correction methods for species distribution modeling using virtual species. *Ecosphere*, 12(3): e03422.
- Kamler J F, Songsasen N, Jenks K, et al. 2015. *Cuon alpinus*. The IUCN Red List of Threatened Species 2015: e.T5953A72477893. [EB/OL]. [2024-10-10]. <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2015-4.RLTS.T5953A72477893.en>.
- Khoewsree N, Pla-Ard M, Sukmasuang R, et al. 2022. Spatio-temporal analysis of dholes (*Cuon alpinus*) in Khao Yai National Park, Thailand. *Biodiversitas*, 23(5): 2688–2678.
- Li J, Xue Y D, Zhang Y, et al. 2020. Spatial and temporal activity patterns of Golden takin (*Budorcas taxicolor bedfordi*) recorded by camera trapping. *PeerJ*, 8: e10353.
- Li S, McShea W J, Wang D J, et al. 2020. Retreat of large carnivores across the giant panda distribution range. *Nature Ecology & Evolution*, 4(10): 1327–1331.
- Mamantov M A, Gibson-Reinemer D K, Linck E B, et al. 2021. Climate-driven range shifts of montane species vary with elevation. *Global Ecology and Biogeography*, 30(4): 784–794.
- Mella-Méndez I, Flores-Peredo R, Pérez-Torres J, et al. 2019. Activity patterns and temporal niche partitioning of dogs and medium-sized wild mammals in urban parks of Xalapa, Mexico. *Urban Ecosystems*, 22(6): 1061–1070.
- Meredith M, Ridout M S. 2021. Overlap: Estimates of coefficient of overlapping for animal activity patterns. [EB/OL]. [2022-07-03]. <https://cran.r-project.org/web/packages/overlap>.
- Mutanga O, Kumar L. 2019. Google earth engine applications. *Remote Sensing*, 11(5): 591.
- Norris D, Michalski F, Peres C A. 2010. Habitat patch size modulates terrestrial mammal activity patterns in Amazonian forest fragments. *Journal of Mammalogy*, 91(3): 551–560.
- Nouvellet P, Rasmussen G S A, MacDonald D W, et al. 2012. Noisy clocks and silent sunrises: measurement methods of daily activity pattern. *Journal of Zoology*, 286(3): 179–184.
- Palei N C, Rath B P, Kumar S, et al. 2022. Occurrence and activity pattern of endangered Dhole (*Cuon alpinus*) in Debrigarh Wildlife Sanctuary, Odisha, India. *Proceedings of the Zoological Society*, 75(1): 134–138.
- Thing S B, Karki J B, Lamichhane B R, et al. 2022. Distribution and habitat-use of Dhole *Cuon alpinus* (Mammalia: Carnivora: Canidae) in Parsa National Park, Nepal. *Journal of Threatened Taxa*, 14(3): 20703–20712.
- Vilella M, Ferrandiz-Rovira M, Sayol F. 2020. Coexistence of predators in time: Effects of season and prey availability on species activity within a Mediterranean carnivore guild. *Ecology and Evolution*, 10(20): 11408–11422.
- Wei F W, Feng Z J, Wang Z W, et al. 2000. Habitat use and separation between the giant panda and the red panda. *Journal of Mammalogy*, 81(2): 448–455.
- Wilson J W, Sexton J O, Todd Jobe R, et al. 2013. The relative contribution of terrain, land cover, and vegetation structure indices to species distribution models. *Biological Conservation*, 164: 170–176.
- Wu X Y, Wei Q G, Sai D N, et al. 2021. China's dhole population at risk of extinction. *Science*, 372(6541): 472.
- Xia W C, Grueter C C, Zhang C, et al. 2023. Distribution range contractions and identification of conservation priority areas for canids in Sichuan Province, China. *Global Ecology and*

- Conservation, 44: e02499.
- Xue Y D, Li D Q, Xiao W F, et al. 2015. Records of the dhole (*Cuon alpinus*) in an arid region of the Altun Mountains in western China. *European Journal of Wildlife Research*, 61(6): 903–907.
- Xue Y D, Li J, Li D Q. 2021. The wild camel (*Camelus ferus*) in China: Current status and conservation implications. *Journal for Nature Conservation*, 60: 125979.
- Xue Y D, Li J, Sagen G, et al. 2018. Activity patterns and resource partitioning: seven species at watering sites in the Altun Mountains, China. *Journal of Arid Land*, 10(6): 959–967.
- 丛微, 张溢, 黄太福, 等. 2024. 阿尔金山国家级自然保护区同域食肉目动物的食性组成和营养生态位分化. *兽类学报*, 44(6): 695–705.
- 高丽君, 程芸, 特列吾汗·巴合提. 2009. 改善罗布泊野骆驼国家级自然保护区管理的对策探讨. *新疆环境保护*, 31(4): 20–23.
- 高丽君, 谢正君, 萨根古丽, 等. 2020. 罗布泊野骆驼主要分布区域及种群变化. *新疆环境保护*, 42(1): 36–41.
- 高帅帅, 胡杨, 邵长亮, 等. 2024. 气候变化背景下卡拉麦里国家公园蒙古野驴适宜生境脆弱性评价. *兽类学报*, 44(3): 287–296.
- 国家林业和草原局, 农业农村部. 2021.《国家重点保护野生动物名录2021》. [EB/OL]. [2021-02-01]. <http://www.forestry.gov.cn/main/5461/20210205/122418860831352.html>.
- 蒋志刚. 2024. 中国哺乳动物多样性编目、分布与保护. 福州: 海峡书局, 656–657.
- 库姆塔格沙漠综合科学考察队. 2012. 库姆塔格沙漠研究. 北京: 科学出版社.
- 李晟, McShea W J, 王大军, 等. 2020. 西南山地红外相机监测网络建设进展. *生物多样性*, 28(9): 1049–1058.
- 李佳, 程芸, 王欣琪, 等. 2023. 新疆罗布泊野骆驼国家级自然保护区发现棕熊. *陆地生态系统与保护学报*, 3(4): 87–88.
- 李佳, 王秀磊, 杨明伟, 等. 2020. 自然保护区生物标本资源共享子平台红外相机数据库建设进展. *生物多样性*, 28(9): 1081–1089.
- 李佳, 薛亚东, 吴波, 等. 2022. 气候变化背景下秦岭地区羚牛生境脆弱性评估及适应性保护对策. *生态学报*, 42(18): 7484–7494.
- 李维东, 张翔, 张会斌. 2013. 新疆阿尔金山国家级自然保护区综合科学考察. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社.
- 刘少英, 吴毅, 李晟. 2019. 中国兽类图鉴 (第2版). 福州: 海峡书局, 183.
- 马志兵, 王普, 李祎斌, 等. 2023. 甘肃盐池湾国家级自然保护区豺种群调查研究. *甘肃林业科技*, 48(3): 57–59, 80.
- 欧阳志云, 徐卫华, 杜傲, 等. 2018. 中国国家公园总体空间布局研究. 北京: 中国环境出版社.
- 史湘莹, 李雪阳, 魏春玥, 等. 2023. 雅鲁藏布大峡谷鸟兽多样性及其海拔和季节分布. *生物多样性*, 31(2): 60–72.
- 孙儒泳, 王德华, 牛翠娟, 等. 2019. 动物生态学原理. 4版. 北京: 北京师范大学出版社, 98–99.
- 王秀磊, 徐俊泉, 张圣发, 等. 2024. 基于红外相机技术的阿尔金山保护区祁曼塔格山兽类和鸟类多样性监测的初步研究. *干旱区地理*, 47(10): 1662–1673.
- 吴昊, 马永胜, 王天晖, 等. 2024. 甘肃安南坝野骆驼国家级自然保护区水源地鸟兽多样性研究. *林草资源研究*, (1): 48–55.
- 肖治术, 肖文宏, 王天明, 等. 2022. 中国野生动物红外相机监测与研究: 现状及未来. *生物多样性*, 30(10): 230–255.
- 薛亚东, 刘芳, 郭铁征, 等. 2014. 基于相机陷阱技术的阿尔金山北坡水源地鸟兽物种监测. *兽类学报*, 34(2): 164–171.
- 袁国映, 张宇, 袁磊. 2010. 新疆罗布泊野骆驼国家级自然保护区综合科学考察. 北京: 科学出版社.
- 袁磊. 2015. 新疆罗布泊野骆驼种群分布时空变化与保护策略研究. 兰州: 兰州大学博士学位论文.