

DOI: 10.20103/j.stxb.202506101467

章亚宁, 胡一鸣, 黄志文, 奚吉学, 冯癸洋, 杨乐, 胡慧建, 温知新, 徐爱春. 珠峰保护区陈塘沟兽类丰富度海拔与生境格局. 生态学报, 2026, 46(4): 1881-1891.

Zhang Y N, Hu Y M, Huang Z W, Xi J X, Feng G Y, Yang L, Hu H J, Wen Z X, Xu A C. Mammal richness in relation to altitude and habitat pattern in Chentang Valley, Qomolangma National Nature Reserve. Acta Ecologica Sinica, 2026, 46(4): 1881-1891.

珠峰保护区陈塘沟兽类丰富度海拔与生境格局

章亚宁^{1,2}, 胡一鸣^{2,*}, 黄志文², 奚吉学³, 冯癸洋², 杨乐⁴, 胡慧建², 温知新⁵, 徐爱春¹

1 中国计量大学生命科学学院, 杭州 310018

2 广东省科学院动物研究所广东省动物保护与资源利用重点实验室, 广州 510260

3 中海线性(广西)数据服务有限公司, 南宁 530201

4 西藏自治区高原生物研究所西藏自治区生物资源与生物安全重点实验室, 拉萨 850000

5 中国科学院动物研究所, 北京 100101

摘要: 在全球高原生态系统持续受到气候变化与人类干扰影响的背景下, 高海拔地区兽类多样性及其空间格局尚缺乏系统研究。作为南亚与青藏高原的重要生态过渡带, 陈塘沟的物种组成、相对丰度及其沿海拔和生境梯度的变化规律仍不明确。旨在系统揭示该区域兽类多样性的空间格局, 识别关键生境, 并为高原生物多样性保护提供科学依据。研究于 2023 年 7 月至 2024 年 11 月在珠峰国家级自然保护区陈塘沟区域 (46.14 km²) 布设 116 台红外相机 (间距 ≥ 500 m), 覆盖不同海拔和生境类型, 优先选择动物痕迹密集处, 结合水源分布、植被状况及历史监测资料确定布设点位, 共获取 2515 个相机工作日的数据, 系统揭示了区域内兽类丰富度分布格局与生态功能结构。共记录 19 种兽类, 其中食肉目物种数最多 (12 种), 偶蹄目独立有效记录最多 (510 次), 体现捕食者与草食动物的功能互补。共记录 5 种国家一级 (喜马拉雅麝 *Moschus leucogaster*、喜马拉雅斑羚 *Naemorhedus goral*、雪豹 *Panthera uncia*、金钱豹 *Panthera pardus* 和金猫 *Pardofelis temminckii*) 和 10 种国家二级保护野生动物 (岩羊 *Pseudois nayaur*、小熊猫 *Ailurus fulgens*、猞猁 *Lynx lynx*、云猫 *Pardofelis marmorata*、豹猫 *Prionailurus bengalensis*、熊猴 *Macaca assamensis*、狼 *Vulpes vulpes*、赤狐 *Martes flavigula*、黄喉貂 *Canis lupus*、石貂 *Martes foina*), 占调查兽类总种数的 78%, 凸显该区域在珍稀濒危物种保护中的枢纽地位。物种丰富度沿海拔梯度呈中峰格局, 显示中低海拔生境在支持多样性方面的重要性。5 种生境 (阔叶林、针叶林、针阔混交林、灌丛和草甸) 的兽类物种丰富度存在显著差异, 其中草甸和灌丛的物种数最高。填补了该区域长期缺乏系统监测的空白, 并可为高原生态保护提供科学依据, 建议未来结合多源数据 (如遥感、环境与人为干扰信息等) 与功能多样性指标, 从多维度揭示高原兽类群落的生态功能格局与环境响应机制, 从而为区域生态保护与管理提供更科学的依据。

关键词: 红外相机监测; 兽类; 海拔梯度; 物种丰富度格局; 生境类型; 珠穆朗玛峰国家级自然保护区

Mammal richness in relation to altitude and habitat pattern in Chentang Valley, Qomolangma National Nature Reserve

ZHANG Yaning^{1,2}, HU Yiming^{2,*}, HUANG Zhiwen², XI Jixue³, FENG Guiyang², YANG Le⁴, HU Huijian², WEN Zhixin⁵, XU Aichun¹

1 College of Life Sciences, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China

2 Guangdong Key Laboratory of Animal Conservation and Resource Utilization, Institute of Zoology, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou

基金项目: 广东省科学院科技发展专项项目 (2022GDASZH-2022010105); 国家自然科学基金项目 (32271736); 西藏重点区域野生动植物资源调查项目 (ZL2022.3601)

收稿日期: 2025-06-10; 采用日期: 2025-11-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huyiming@giz.gd.cn

510260, China

3 Zonhai Linear Data Analysis LTD, Nanning 530201, China

4 Key Laboratory of Biological Resources and Biosafety, Institute of Plateau Biology Research of Xizang Autonomous Region, Lhasa 850000, China

5 Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Under the ongoing impacts of climate change and human disturbances on global plateau ecosystems, studies on mammalian diversity and its spatial patterns in high-altitude regions remain limited. As an important ecological transition zone between the South Asian and Qinghai-Tibet plateaus, the species composition, relative abundance, and elevational and habitat distribution patterns of mammals in the Chentang valley remain unclear. This study aims to systematically reveal the spatial patterns of mammalian diversity in this region, identify key habitats, and provide scientific evidence for biodiversity conservation on the plateau. From July 2023 to November 2024, a total of 116 infrared camera traps were deployed across the Chentang valley (46.14 km²) within Qomolangma National Nature Reserve, with an interval of at least 500 m between cameras. Sampling sites covered different elevations and habitat types and were primarily located in areas with abundant animal signs, taking into account water availability, vegetation conditions, and historical monitoring data. The survey yielded data from 2,515 effective camera-trap days, revealing spatial patterns of mammalian richness and functional structure within the region. A total of 19 mammal species were recorded, among which Carnivora had the highest number of species (12 species), while Artiodactyla had the highest number of independent detections (510 records), reflecting functional complementarity between predators and herbivores. Five species are listed as national first-class protected wildlife (*Moschus leucogaster*, *Naemorhedus goral*, *Panthera uncia*, *Panthera pardus*, and *Pardofelis temminckii*), and ten species as national second-class protected wildlife (*Pseudois nayaur*, *Ailurus fulgens*, *Lynx lynx*, *Pardofelis marmorata*, *Prionailurus bengalensis*, *Macaca assamensis*, *Vulpes vulpes*, *Martes flavigula*, *Canis lupus*, and *Martes foina*), accounting for 78% of all recorded species, highlighting the region's crucial role as a refuge for rare and endangered species. Species richness exhibited a unimodal pattern along the elevational gradient, indicating the ecological importance of mid- and low-elevation habitats in supporting mammalian diversity. Significant differences in species richness were observed among the five habitat types (broadleaf forest, coniferous forest, mixed coniferous-broadleaf forest, shrubland, and meadow), with the highest richness found in meadows and shrublands. This study fills the long-standing gap in systematic monitoring of the region and provides a scientific foundation for plateau ecological conservation. Future studies are recommended to integrate multi-source data (e.g., remote sensing, environmental, and anthropogenic disturbance information) with functional diversity metrics to elucidate the ecological functional patterns and environmental response mechanisms of plateau mammal communities, thereby supporting more science-based regional conservation and management strategies.

Key Words: infrared camera trapping; mammals; elevational gradient; species richness pattern; habitat type; Qomolangma National Nature Preserve

对关键生态系统及重要物种生境进行多维度长期监测,有助于为相关部门制定保护决策提供依据^[1]。而红外相机技术凭借其低干扰性与长时连续监测的优势^[2],在野生动物调查监测中已得到广泛应用,尤其为揭示大中型兽类的生态动态提供了关键数据支撑^[3]。与此同时,环境梯度对生物多样性格局的调控作用已形成共识:海拔梯度通过温度、水分等因子,局部物种丰富度的垂直分异^[4-5],并驱动物种生态位分化^[6]。

山地系统作为兼具气候异质性与气候变化避难所功能的生物多样性热点,容纳了全球 85% 以上的陆生脊椎动物物种^[7]。喜马拉雅山脉以其全球最大的海拔跨度 (> 7000 m) 与独特的生态环境,成为生物地理学研究的核心区域,特别是中喜马拉雅的珠峰区域更是全球瞩目的生物多样性与生态热点区域。西藏珠穆朗玛峰国家级自然保护区(以下简称珠峰保护区)(27°48'—29°19' N, 84°27'—88°21' E)作为喜马拉雅中段重要生态区,总面积 33700 km²,拥有全球最大的海拔落差与垂直生境梯度。珠峰保护区南坡植被带沿海拔梯度

从低到高分别为:山地雨林带、山地常绿阔叶林带、山地针阔混交林带、山地针叶林带、山地灌丛草甸和高山寒冻草甸垫状植被带、冰碛地衣带以及高山冰雪带;北坡则由高原草原带、高山草甸带以及高山冰雪带组成^[8]。现有调查在珠峰保护区共记录陆生脊椎动物 491 种,其中兽类分属 10 目 23 科 82 种^[9]。这样丰富的生境类型与多样的生物资源,为探究山地生物多样性格局与维持机制提供了不可替代的环境条件。

珠峰保护区的生境梯度及其完整的垂直生态谱系,集中体现在区内的五大沟谷区域(吉隆沟、陈塘沟、嘎玛沟、绒辖沟、樟木沟)。当前已有的长期系统性监测成果主要集中在吉隆沟^[10-17],共记录兽类 50 种^[11],而陈塘沟作为距离珠穆朗玛峰主峰最近的沟谷之一,目前仍然缺乏系统的陆生脊椎动物调查,仅有零星的调查工作^[18-19]。持续监测数据的缺失,制约了对该区域生物资源情况的了解和研究。为此,本研究于 2023—2025 年对该区进行了较为详细的兽类调查,通过构建红外相机监测网络,旨在系统更新该区域物种本底数据库,完善高山生态他系统兽类多样性空间分布格局的相关理论,并为保护区的管理高和原生物多样性保护提供科学指导建议。

1 研究区域

陈塘沟隶属于西藏日喀则市定结县,位于珠峰保护区南部边缘,属亚热带季风气候,温暖湿润,年降水量 236.2 mm 以上,年均气温 2℃^[20]。其西侧以尼泊尔朗玛拉山脉为界,东接岗巴盆地,南临尼泊尔塔普列琼县,北靠喜马拉雅主脊线,是喜马拉雅山脉南坡中—尼边境生物廊道体系的重要组成部分。作为朋曲河上游深切峡谷,陈塘沟中国地界区域海拔梯度落差达 3000 m(2100—5100 m),由低到高形成如下植被海拔带:山地常绿阔叶林带(2100—2700 m)、山地针阔混交林带(2700—3500 m)、山地针叶林带(3500—4200 m)、山地灌丛草甸(4200—4500 m)和高山寒冻草甸垫状植被带(4500—4800 m)、冰碛地衣带(4800—5100 m)以及高山冰雪带(5100 m 以上),是喜马拉雅生物多样性热点区的关键区域。该区域不仅与珠峰保护区核心区保持生态连通,也因其生境类型的多样性和极低的人类干扰,维持了较高的生态完整性与原真性,在珠峰保护区整体生态功能的维系中具有不可替代的地位。

2 实验方法

2.1 数据采集

相机点位布设原则如下:①尽可能均匀沿着沟内海拔梯度布设,覆盖各种生境,且每台相机间距不能少于 500 m;②在珠峰保护区内及其毗邻区域,选取野生动物活动频繁的区域,在选定区域内的兽径上选取动物痕迹(如足迹、粪便、毛发、活体等)较密集的地点作为相机安装点位;③若未发现明显的动物痕迹,则选择位置靠近水源、人为干扰少、植被盖度高且林下植被较稀疏的平缓林地进行相机布设。④根据珠峰保护区巡护人员长期观察及历史监测资料,并结合野生动物活动特点及生境特征进行设置。

2023—2025 年,共选取 116 个点位(图 1),每个点位安装 1 台红外相机。相机固定在距离地面 50 cm 的树干上,拍摄模式为照片连拍 3 张或视频 15 s,拍摄间隔 20 s。记录相机的编号、地理坐标、海拔和周围的生境信息。

2.2 数据处理与分析

2.2.1 物种鉴定

本研究采用以下标准化流程处理红外相机数据:为每个红外相机点位建立独立数据表,记录点位编号、拍摄日期、物种名称(中文名及拉丁学名)、个体数量(最小可识别计数)及首次独立观测状态。单台相机连续工作 24 h 计为 1 个相机工作日,同一相机 30 min 内拍摄的同种兽类影像视为 1 次独立有效记录(多个体同框时记录最大可识别数)。物种鉴定依据《中国兽类野外手册》^[21],分类系统参照《中国哺乳动物多样性(第 2 版)》^[22],保护等级同步标注《国家重点保护野生动物名录》(2021 版)^[23]、《濒危野生动植物种国际贸易公约》(the Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora, CITES)附录^[24]及世界

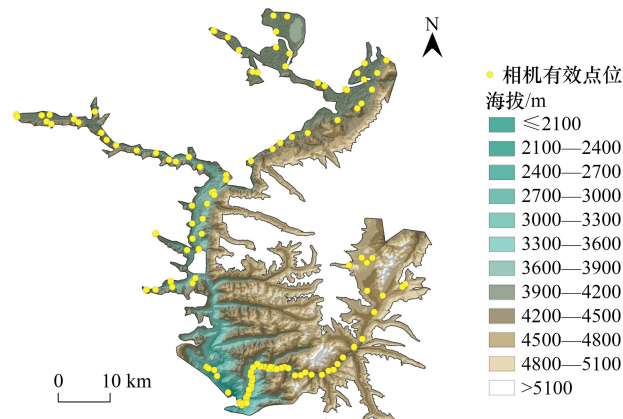


图1 陈塘沟红外相机点位图

Fig.1 Infrared camera trap location map of Chentang valley

自然保护联盟(International Union for Conservation of Nature, IUCN)濒危物种红色名录^[25]。

2.2.2 统计分析

为验证对区域内物种的调查是否充分,我们以物种个体为基础制作物种累积曲线(Individual-based Rarefaction Curve),使用 vegan 包拟合物种累积曲线;当累积曲线趋于平缓则判定采样强度相对充分。然后通过计算相对多度指数(Relative Abundance Index, $RAI = \text{物种独立有效记录数} / \text{总相机工作日} \times 100$)量化单个物种的相对多度,并根据得到的 RAI 值将物种划分为优势种($RAI \geq 0.1$)、丰盛种($0.05 \leq RAI < 0.1$)、常见种($0.01 \leq RAI < 0.05$)和偶见种($0.001 \leq RAI < 0.01$)^[26],对于后续关于“兽类物种丰富度”的分析,我们通过兽类物种数来衡量,鉴于该响应变量为计数型数据,故首先使用 Shapiro-Wilk 检验评估其分布特征,结果显示 $W = 0.898, P < 0.001$,表明数据显著偏离正态分布,不适用于普通线性回归模型。为更合理地建模该类离散数据,首先建立泊松广义线性模型(Poisson Generalized Linear Model),并计算其离散度系数为 2.04,显著高于理论值 1,提示存在显著的过度离散性。为处理该问题,研究均采用负二项广义线性模型(Negative Binomial Generalized Linear Model),引入分散参数以提高模型拟合性和推断的稳健性。同时由于相机存在损坏和丢失的情况,各相机工作天数不一致,从而导致监测强度存在差异,故模型中将“相机工作天数”以对数形式引入为偏移量(offset 项),用以控制观测对物种数的影响^[27]。

为评估兽类物种数随海拔变化的趋势,本研究以单台红外相机为分析单元,分别构建包含线性、二次多项式和三次多项式项的负二项广义线性模型,以海拔作为预测变量。模型中将相机工作天数的对数作为偏移量(offset)纳入,以控制观测努力对物种数估计的影响。通过比较各模型的赤池信息准则(Akaike Information Criterion, AIC)、残差分布、伪 R^2 (Pseudo- R^2)以及回归系数的显著性等指标,确定最优模型形式:优先选择 AIC 值最小的模型;若候选模型 AIC 差异小于 2,则进一步检查残差分布是否符合模型假定、伪 R^2 值的大小以及关键回归系数是否显著,以最终确定最优模型形式。

为分析不同生境类型(根据相机位点所在环境的植被类型划分为阔叶林、针叶林、针阔混交林、灌丛和草甸 5 类)间的兽类物种组成及物种数差异,本文采用 ComplexHeatmap 包绘制各生境中不同物种个体数量分布的热图。

然后为检验生境类型对兽类物种数的影响,使用带有相机工作天数对数偏移量(offset)的负二项回归模型拟合数据,并与仅含偏移量的空模型进行似然比检验。在确认模型显著性的基础上,使用 emmeans 包进行生境类型之间的后验两两比较(Pairwise Comparisons),并通过 FDR(False Discovery Rate)方法对多重比较进行校正,以识别各生境类型间的显著差异(上述分析作图均在 R 4.5.1 版本中完成)。

3 结果

3.1 兽类物种组成与名录

2023 年 7 月至 2024 年 11 月,在陈塘沟区域共布设红外相机 116 台。其中,10 台红外相机因设备故障未能获取有效影像数据,故在后续分析中予以剔除;另有 15 台红外相机因雨季进水或低海拔地区发生严重塌方等原因导致设备损毁,未能回收。最终,91 台红外相机记录到野生兽类的有效影像,累计获得 25815 个独立有效工作日的数据。区域内兽类物种累积曲线呈现典型的饱和增长模式,当个体数达到约 1263 时,累积物种数趋于稳定(19 种),曲线斜率趋近于零,表明本次兽类监测取样充分(图 2)。

本研究在监测周期内累计拍摄到兽类独立有效记录 1263 次(表 1)。记录共鉴定出兽类 19 种,隶属(食肉目、偶蹄目、啮齿目、灵长目、兔形目)5 目 13 科,其中食肉目物种数最多(12 种),偶蹄目的独立有效记录数最多(510 次)(表 2)。监测区域内兽类以赤狐(*Vulpes vulpes*, RAI = 1.313)、灰尾兔(*Lepus oiostolus*, RAI = 1.181)、岩羊(*Pseudois nayaur*, RAI = 0.860)、赤麂(*Muntiacus vaginalis*, RAI = 0.569)、喜马拉雅斑羚(*Naemorhedus goral*, RAI = 0.314)、喜马拉雅麝(*Moschus leucogaster*, RAI = 0.232)、狼(*Canis lupus*, RAI = 0.105)为优势种;豹猫(*Prionailurus bengalensis*, RAI = 0.085)和黄喉貂(*Martes flavigula*, RAI = 0.085)为丰盛种;熊猴(*Macaca assamensis*, RAI = 0.012)、藏仓鼠(*Cricetulus kamensis*, RAI = 0.039)、金钱豹(*Panthera pardus*, RAI = 0.023)、雪豹(*Panthera uncia*, RAI = 0.023)和小熊猫(*Ailurus fulgens*, RAI = 0.012)为常见种;金猫(*Pardofelis temminckii*, RAI = 0.004)、猞猁(*Lynx lynx*, RAI = 0.004)、云猫(*Pardofelis marmorata*, RAI = 0.004)、黄鼬(*Mustela sibirica*, RAI = 0.004)和石貂(*Martes foina*, RAI = 0.004)为偶见种(表 1)。

有 5 种兽类为国家一级重点保护野生动物,分别是:喜马拉雅麝、喜马拉雅斑羚、雪豹、金钱豹和金猫;有 10 种兽类是为国家二级保护物种 10 种,分别是:岩羊、小熊猫、猞猁、云猫、豹猫、熊猴、狼、赤狐、黄喉貂、石貂。有 9 种为 CITES 附录收录物种,其中附录 I 物种 6 种(喜马拉雅斑羚、金猫、云猫、金钱豹、雪豹和小熊猫),附录 II 物种 3 种(喜马拉雅麝、豹猫和狼)。19 种兽类 IUCN 濒危物种红色名录全部物种都有收录,其中濒危物种(EN)2 种(喜马拉雅麝和小熊猫),易危物种(VU)2 种(雪豹和金钱豹),近危物种(NT)4 种(熊猴、喜马拉雅斑羚、金猫和云猫),其余 11 种为无危物种(LC)(表 1)。

表 1 兽类物种名录(附保护等级与 RAI 表)

Table 1 Checklist of mammal species (with conservation status and RAI table)

| 物种 Species | 保护级别 Protection level | 濒危野生动植物种 国际贸易公约附录 CITES Appendices | 国际自然保护联盟 濒危物种红色名录 The IUCN Red List of Threatened Species | 独立有效记录数 Independent valid event | 相对多度指数 RAI |
|--------------------------------|--------------------------|--|--|---------------------------------------|---------------|
| 哺乳纲 Mammalia | | | | | |
| 一、灵长目 Primates | | | | | |
| (1) 猴科 Cercopithecidae | | | | | |
| 1. 熊猴 <i>Macaca assamensis</i> | 二级 | | NT | 3 | 0.012 |
| 二、兔形目 Lagomorpha | | | | | |
| (2) 兔科 Leporidae | | | | | |
| 2. 灰尾兔 <i>Lepus oiostolus</i> | | | LC | 315 | 1.181 |
| 三、啮齿目 Rodentia | | | | | |
| (3) 仓鼠科 Cricetidae | | | | | |

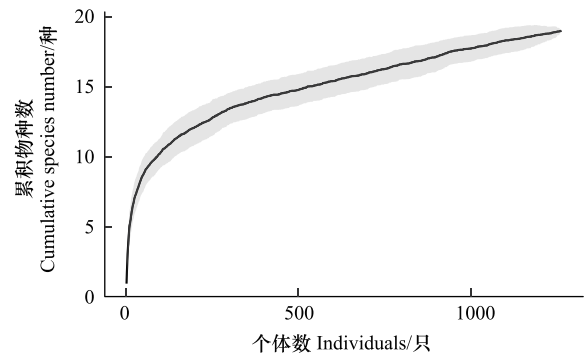


图 2 物种累积曲线

Fig.2 Species accumulation curve

阴影部分表示基于模型预测的 95% 置信区间

续表

| 物种 Species | 保护级别 Protection level | 濒危野生动植物种 国际贸易公约附录 CITES Appendices | 国际自然保护联盟 濒危物种红色名录 The IUCN Red List of Threatened Species | 独立有效记录数 Independent valid event | 相对多度指数 RAI |
|--|--------------------------|--|--|---------------------------------------|---------------|
| 3.藏仓鼠 <i>Cricetulus kamensis</i> | | | LC | 10 | 0.039 |
| 四、偶蹄目 Artiodactyla | | | | | |
| (4) 鹿科 Cervidae | | | | | |
| 4. 赤鹿 <i>Muntiacus vaginalis</i> | | | LC | 147 | 0.569 |
| (5) 牛科 Bovidae | | | | | |
| 5. 喜马拉雅斑羚 <i>Naemorhedus goral</i> | 一级 | I | NT | 81 | 0.314 |
| 6. 岩羊 <i>Pseudois nayaur</i> | 二级 | | LC | 222 | 0.860 |
| (6) 麝科 Moschidae | | | | | |
| 7. 喜马拉雅麝 <i>Moschus leucogaster</i> | 一级 | II | EN | 60 | 0.232 |
| 五、食肉目 Carnivora | | | | | |
| (7) 猫科 Felidae | | | | | |
| 8. 金猫 <i>Pardofelis temminckii</i> | 一级 | I | NT | 1 | 0.004 |
| 9. 猞猁 <i>Lynx lynx</i> | 二级 | | LC | 1 | 0.004 |
| 10. 云猫 <i>Pardofelis marmorata</i> | 二级 | I | NT | 1 | 0.004 |
| 11. 豹猫 <i>Prionailurus bengalensis</i> | 二级 | II | LC | 22 | 0.085 |
| 12. 金钱豹 <i>Panthera pardus</i> | 一级 | I | VU | 1 | 0.023 |
| 13. 雪豹 <i>Panthera uncia</i> | 一级 | I | VU | 6 | 0.023 |
| (8) 犬科 Canidae | | | | | |
| 14. 狼 <i>Canis lupus</i> | 二级 | II | LC | 27 | 0.105 |
| 15. 赤狐 <i>Vulpes vulpe</i> | 二级 | | LC | 339 | 1.313 |
| (1) 小熊猫科 Ailuridae | | | | | |
| 16. 小熊猫 <i>Ailurus fulgens</i> | 二级 | I | EN | 3 | 0.012 |
| (2) 鼬科 Mustelidae | | | | | |
| 17. 黄喉貂 <i>Martes flavigula</i> | 二级 | | LC | 22 | 0.085 |
| 18. 石貂 <i>Martes foina</i> | 二级 | | LC | 1 | 0.004 |
| 19. 黄鼬 <i>Mustela sibirica</i> | | | LC | 1 | 0.004 |

IUCN: 国际自然保护联盟 International Union for Conservation of Nature; CITES: 《濒危野生动植物种国际贸易公约》the Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora; RAI: 相对多度指数 Relative Abundance Index; NT: 近危 Near Threatened; LC: 无危 Least Concern; EN: 濒危 Endangered; VU: 易危 Vulnerable

3.2 海拔梯度的兽类物种丰富度格局

海拔与兽类物种丰富度的回归模型比较结果显示,三次多项式模型的 AIC 值最低(429.85),拟合优度最佳,显著高于其他模型,且相较于线性与二次模型的 ΔAIC 值均大于 2,支持其作为更合适的模型。因此,本研究选用三次多项式的负二项广义线性模型作为最优模型(表 2);该模型中物种丰富度垂直分布格局整体呈左偏倚的中峰格局,但是海拔对物种数变化的解释力很弱(伪 $R^2 = 0.041, P = 0.195$)(图 3)。

表 2 负二项广义线性模型拟合效果的比较结果

Table 2 Comparison of the model fit for negative binomial generalized linear models

| 模型类型 Type of generalized linear models | 赤池信息准则 AIC | 赤池信息准则差值 ΔAIC | 伪 R^2 Pseudo- R^2 | P 值 P-value |
|---|---------------|--------------------------|--------------------------|----------------|
| 线性负二项广义线性模型 Linear negative binomial generalized linear model | 431.87 | 2.02 | 0.0002 | 0.77 |
| 二次多项式负二项广义线性模型 Quadratic polynomial negative binomial generalized linear model | 433.01 | 3.16 | 0.0022 | 0.34 |
| 三次多项式负二项广义线性模型 Cubic polynomial negative binomial generalized linear model | 429.85 | <0.01 | 0.0143 | 0.03 |

AIC: 赤池信息准则 Akaike Information Criterion

本研究中的 19 种兽类在陈塘沟区域的海拔分布范围覆盖了该区域大部分的垂直生境梯度。大多数物种在中高海拔区域(> 3500 m)被记录,其中岩羊、灰尾兔和狼等典型的高原或高山物种均记录于海拔 4900 m 左右。相比之下,小熊猫、黄喉貂、豹猫等物种主要分布于中低海拔区间。黄喉貂的海拔分布最广(2285—4676 m),跨度达 2391 m。其后为赤狐(2450—3773 m)、喜马拉雅斑羚(2173—3849 m)、岩羊(3674—4945 m)和狼(3766—4945 m),海拔跨度均超过 1000 m。从保护等级来看,本次监测记录的 6 种国家一级保护动物的分布海拔范围为 2173—4454 m。其中,喜马拉雅斑羚和小熊猫分布于低海拔区域,最低记录点均为 2173 m;而雪豹、金钱豹和喜马拉雅麝均分布在海拔 3800 m 以上的区域,最高记录点分别达到 4454 m、4454 m 和 4184 m,呈现出高海拔偏好(表 3)。

在所有记录中,有 6 个物种仅在单一相机点位被拍摄到,难以准确判断其分布范围(黄鼬、金钱豹、云猫、熊猴、石貂和猓狨)。

表 3 兽类物种海拔分布范围表

Table 3 Elevational range and relative abundance index (RAI) of key mammal species recorded

| 物种 Species | 海拔分布范围 Elevation range/m | 物种 Species | 海拔分布范围 Elevation range/m |
|------------------------------------|-----------------------------|--|-----------------------------|
| 赤狐 <i>Vulpes vulpe</i> | 2450—3773 | 黄喉貂 <i>Martes flavigula</i> | 2285—4676 |
| 灰尾兔 <i>Lepus oiostolus</i> | 4175—4945 | 熊猴 <i>Macaca assamensis</i> | (2850) [#] |
| 豹猫 <i>Prionailurus bengalensis</i> | 2463—3619 | 石貂 <i>Martes foina</i> | (3933) [#] |
| 云猫 <i>Pardofelis marmorata</i> | (2588) [#] | 猓狨 <i>Lynx lynx</i> | (3843) [#] |
| 小熊猫 <i>Ailurus fulgens</i> | 2173—2805 | 雪豹 <i>Panthera uncia</i> [*] | 3948—4454 |
| 岩羊 <i>Pseudois nayaur</i> | 3674—4945 | 金钱豹 <i>Panthera pardus</i> [*] | (4454) [#] |
| 藏仓鼠 <i>Cricetulus kamensis</i> | 3843—4193 | 喜马拉雅斑羚 <i>Naemorhedus goral</i> [*] | 2173—3849 |
| 狼 <i>Canis lupus</i> | 3766—4945 | 喜马拉雅麝 <i>Moschus chrysogaster</i> [*] | 3811—4184 |
| 黄鼬 <i>Mustela sibirica</i> | (3751) [#] | 金猫 <i>Pardofelis temminckii</i> [*] | (3047) [#] |

[#]代表该物种仅有一个点位有记录,故暂无法判断其实际分布范围; * 代表该物种属于国家一级保护动物

3.3 不同生境的兽类物种分布情况差异

本研究分析了 5 类生境的兽类群落特征。其中灌丛和草甸兽类物种数最多(物种数均达 11 种),针叶林物种数最少(4 种)。

草甸以赤狐、灰尾兔和岩羊为主,其中雪豹、金钱豹、猓狨、藏仓鼠和石貂仅在该生境有记录,且该生境为狼的主要活动生境(92.3%);灌丛以岩羊、喜马拉雅斑羚、赤鹿、喜马拉雅麝和赤狐为主;阔叶林以赤鹿和喜马拉雅斑羚为主,其中云猫和金猫仅在该生境有记录;针阔混交林中未出现明显的优势物种,其中熊猴仅在该生境有记录;针叶林以赤狐为主。(图 4)

似然比检验结果显示,不同生境类型的物种数存在极显著差异($\chi^2 = 12.5, P = 0.01$)(图 5)。后验分析的统计分析结果显示,虽然物种丰富度垂直分布格局总体上在低海拔生境(阔叶林、针阔混交林和针叶林)的物种丰富度较高,但成对比较中,布设于草甸的单台相机记录到的平均物种数显著高于阔叶林(Estimate = 0.589, $P = 0.05$);而布设于针叶林的单台相机记录到的平均物种数则显著高于灌丛(Estimate = -1.010, $P = 0.05$)和阔叶林(Estimate = -1.385, $P = 0.007$),其中阔叶林与针叶林的差异效应最强(|Estimate| = 1.385)。此外,草甸与针叶林的差异接近显著性阈值(Estimate = -0.797, $P = 0.08$),呈现边缘显著趋势。其余组间(如草

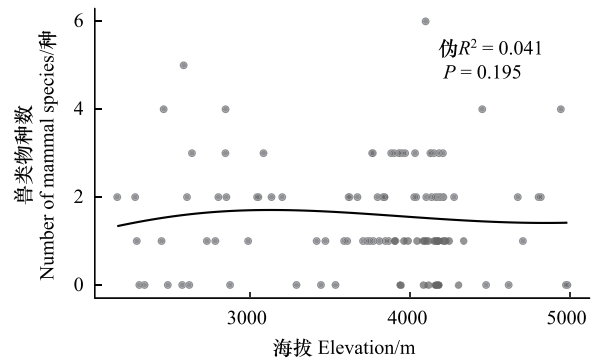


图 3 兽类物种丰富度的海拔格局

Fig.3 Elevational pattern of mammal species richness

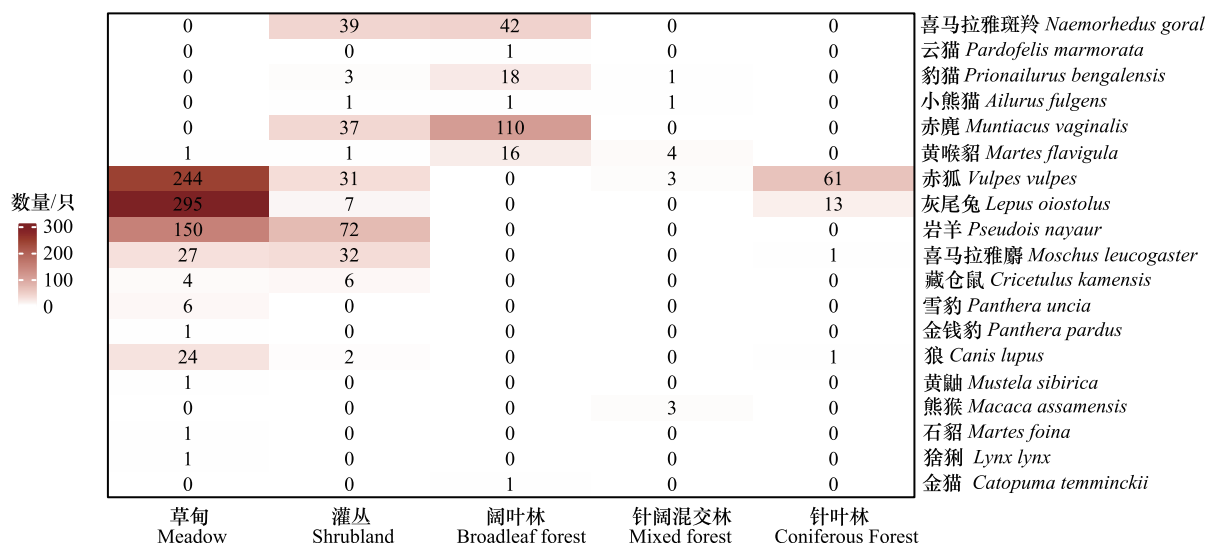


图4 不同生境的兽类物种多度分布情况 heatmap

Fig.4 Heatmap of mammal species distribution across different habitats

甸与灌丛、针阔混交林与其他类型等)均未表现出统计学中的显著差异($P > 0.05$)。值得注意的是,负向估计值表明对比组中后者的物种检出效率更高,因此数据整体呈现针叶林存在最高的检出效率(表4)。

4 讨论

4.1 海拔梯度的物种丰富度格局

研究表明,陈塘沟区域食肉目物种的高物种丰富度与其在生态系统中担任顶级捕食者的角色相一致,而偶蹄目作为主要的初级消费者,其高个体数量构成了该区域的优势类群。这种结构体现了捕食者与被捕食者之间的生态平衡机制。赤狐和灰尾兔的高RAI值可能反映了其对山地生态系统的良好适应性。两者均为杂食性动物,且具有较强的繁殖能力,能够在高环境异质性区域中保持较高的活动频率。岩羊的相对常见性可能得益于其对该区域中高海拔岩石地貌的高度适应性,而其主要天敌如雪豹和金钱豹在该区域的活动频率相对较低,亦可能间接有利于该物种在本区域维持较高的活动频率与个体数量。

该区域内兽类物种数与海拔整体呈现低解释度的左偏倚中峰格局,与此前在喜马拉雅山的研究结果一致^[8];该中峰左偏倚的模式可能反映了中低海拔地区更高的生境复杂度与资源可用性,有利于更多物种的维持。而高海拔区域的环境胁迫则可能导致物种数下降。此外,较低的模型解释度也暗示了物种丰富度可能受限于其他关键因子,如生境面积^[28]、生境异质性^[29-30]、初级生产力和中域效应(Mid-Domain Effect)^[31-32]。类似的格局亦见于横断山脉的蛙类、蜥蜴类、蛇类^[33-34]以及有蹄类^[35],提示该类分布响应在复杂山地生态系统中或具有一定普遍性。但本研究仅简单讨论了物种丰富度和海拔的关系,在未来的研究中需进一步找出影响该区物种丰富度的关键因素。

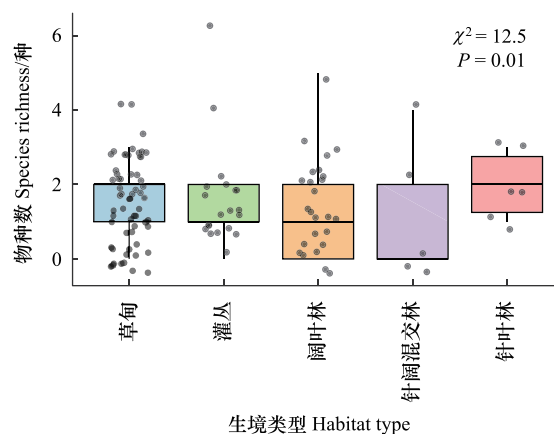


图5 不同生境的兽类物种数差异箱型图(带似然比分析结果)

Fig.5 Differences in mammal species richness among habitats illustrated by boxplots, with likelihood ratio test results

表 4 不同生境物种数差异的后验分析表

Table 4 Post hoc pairwise comparisons of species richness among habitat types

| 对比组 Comparison | 估计值 Estimate | 标准误差 Standard error | z 值 z-value | P 值 P-value |
|---|-----------------|------------------------|----------------|----------------|
| 草甸 vs 灌丛 Meadow vs Shrub | 0.213 | 0.245 | 0.868 | 0.45 |
| 草甸 vs 阔叶林 Meadow vs Broadleaf forest | 0.589 | 0.236 | 2.497 | 0.05 * |
| 草甸 vs 针阔混交林 Meadow vs Mixed forest | -0.416 | 0.500 | -0.831 | 0.45 |
| 草甸 vs 针叶林 Meadow vs Coniferous forest | -0.797 | 0.377 | -2.112 | 0.08 |
| 灌丛 vs 阔叶林 Shrub vs Broadleaf forest | 0.376 | 0.292 | 1.289 | 0.33 |
| 灌丛 vs 针阔混交林 Shrub vs Mixed forest | -0.628 | 0.529 | -1.188 | 0.33 |
| 灌丛 vs 针叶林 Shrub vs Coniferous forest | -1.010 | 0.415 | -2.436 | 0.05 * |
| 阔叶林 vs 针阔混交林 Broadleaf vs Mixed forest | -1.004 | 0.524 | -1.915 | 0.11 |
| 阔叶林 vs 针叶林 Broadleaf vs Coniferous forest | -1.385 | 0.409 | -3.388 | 0.007 ** |
| 针阔混交林 vs 针叶林 Mixed vs Coniferous forest | -0.381 | 0.602 | -0.634 | 0.52 |

* 表示显著差异 ($P < 0.05$), ** 表示极显著差异 ($P < 0.01$)

4.2 不同生境类型对物种丰富度格局的影响

本研究的生境差异研究结果表明,不同生境类型的兽类群落结构存在显著差异。在灌丛和草甸生境单台相机平均记录的物种数最高,均记录 11 种。该结果符合上述生境的特点,即灌丛和草甸生境的物种多度较高(包括赤狐、灰尾兔、岩羊等典型物种),所以易于被单台相机记录。另外,该区域也记录到如雪豹、金钱豹、猓獾等大型或中型食肉动物。值得注意的是,草甸生境为狼的主要活动区域(92.3%的记录),提示该区域可能具有较高的猎物密度或地形适宜性,是重要的顶级捕食者栖息地。阔叶林生境中以赤鹿和喜马拉雅斑羚为主,并记录到云猫和金猫,仅在此生境中出现,说明灌丛可能具备隐蔽性强或食物资源丰富等特征,有利于这类中小型隐秘性强的猫科动物活动。相较而言,针叶林物种数最少,仅记录 4 种。针阔混交林同样记录物种较少,缺乏明显优势物种;仅熊猴在该生境中独立出现,表明其可能具有特殊的生境偏好或利用策略。灌丛中以岩羊、赤鹿、喜马拉雅斑羚等为主,兼有赤狐和喜马拉雅麝,可能为多个营养级的物种提供了栖息条件。综合来看,物种数与特有记录的分布,反映了草甸与灌丛在维持该区域兽类物种丰富度中的核心作用。

这些物种的分布格局不仅体现了其生态位差异,也提示在未来保护规划中,应高度重视高海拔草甸及灌丛等关键生境的完整性维护。这些生境对保护顶级捕食者和特化物种具有不可替代的意义,尤其是在全球变暖和人类干扰日益加剧的背景下,其脆弱性亟需引起关注。此外,特定物种仅在某一类生境中被记录(如金猫仅见于阔叶林、熊猴仅见于针阔混交林),进一步强调了保护多样生境类型以维持区域整体生态功能的重要性。

4.3 国家重点保护动物的分布特征与生境偏好

该区域分布有 5 种国家一级重点保护物种及 10 种国家二级重点保护物种,合计占调查所获物种总数的 78%,凸显了其在濒危物种保护中的关键地位。尤其是 IUCN 濒危(EN)物种喜马拉雅麝与小熊猫的同时存在,表明该区域很可能是喜马拉雅山脉中段物种扩散的关键生态廊道。然而,雪豹等大型食肉动物的相对多度指数(RAI)极低(≤ 0.05),以及列入 CITES 附录 I 物种的有限记录,可能指示其种群密度较低或存在监测偏差。具体而言,受雨季设备故障和塌方影响的相机失效,可能低估了喜马拉雅斑羚等雨季活跃物种的 RAI。

此外,本研究记录的 5 种国家一级重点保护兽类均表现出相对明确的生境偏好,反映出其对特定生态环境的依赖性与适应策略。结果显示,雪豹与金钱豹主要分布于高山草甸生境,偏好开阔、视野良好的地形环境。这一特征契合顶级掠食者对猎物资源可获取性与空间利用效率的高要求,同时也暗示二者在空间利用上可能存在一定程度的重叠与竞争关系。该发现与尼泊尔萨加玛塔国家公园(Sagarmatha National Park)的研究结论部分一致;其中雪豹同样偏好开阔生境(高山草甸与灌丛),但金钱豹则主要分布于森林生境^[36]。这种

差异可能与区域生态条件、物种行为可塑性、监测时间及空间资源格局的差异有关,亦不排除由于布设限制导致样本代表性不足,从而对栖息地偏好产生一定影响。金猫在本区域主要分布于植被结构复杂的阔叶林,体现其在捕食效率与隐蔽性方面的双重生态需求,该生境选择与横断山脉地区的监测结果一致^[37]。喜马拉雅麝主要活动于草甸与灌丛生境,这类区域植被覆盖度高、地形起伏适中,有利于其摄食、隐蔽及规避干扰,表明其对生境稳定性与庇护条件具有较强依赖,与尼泊尔 Annapurna 保护区的调查结果相符^[38]。喜马拉雅斑羚主要分布于灌丛和阔叶林中,其生境偏好与此前在喜马拉雅山脉地区基于 MaxEnt 模型分析所得结果一致^[39]。

5 结论

综上所述,喜马拉雅山脉陈塘沟地区的兽类分布格局调查监测结果清晰地反映了物种间的生态位分化及其对特定生境的依赖性。这些发现凸显了高海拔草甸、针阔混交林、灌丛及阔叶林等生境在维系区域生物多样性中的核心作用。特别是在全球气候变化与人类活动持续加剧的背景下,喜马拉雅山脉区域生境的完整性面临严峻挑战,其内在的生态脆弱性亟需在未来的保护规划中得到充分重视。值得注意的是,特定物种(如金猫、熊猴等)仅分布在特定生境类型中,这进一步印证了保护多样化生境对于维持生态系统结构稳定与功能完整性的不可或缺性。为实现区域保护目标最大化,应加强高海拔和复杂地形区域的监测覆盖,并实施基于生境异质性与物种需求的精细化管理策略。

参考文献(References):

- [1] 冯晓娟,米湘成,肖治术,曹垒,吴慧,马克平. 中国生物多样性监测与研究网络建设及进展. 中国科学院院刊, 2019, 34(12): 1389-1398.
- [2] Nichols J D, O'Connell A F, Karanth K U. Camera traps in animal ecology and conservation: what's next //Camera Traps in Animal Ecology. Tokyo: Springer Japan, 2011: 253-263.
- [3] 肖治术. 红外相机技术促进我国自然保护区野生动物资源编目调查. 兽类学报, 2016, 36(3): 270-271.
- [4] McCain C M, Grytnes J. Elevational gradients in species richness. Encyclopedia of Life Sciences, 2010.
- [5] Lomolino M V. Elevation gradients of species-density: historical and prospective views. Global Ecology and Biogeography, 2001, 10(1): 3-13.
- [6] Maccagni A, Willi Y. Niche breadth and elevational range size: a comparative study on Middle-European Brassicaceae species. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2022, 377(1846): 20210005.
- [7] Rahbek C, Borregaard M K, Colwell R K, Dalgaard B, Holt B G, Morueta-Holme N, Nogues-Bravo D, Whittaker R J, Fjeldsã J. Humboldt's Enigma: What causes global patterns of mountain biodiversity Science, 2019, 365(6458): 1108-1113.
- [8] 胡一鸣. 喜马拉雅山陆生脊椎动物物种多样性垂直分布格局研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [9] 钟华. 珠峰地区雪豹及其同域食肉动物食性及日节律比较研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2022.
- [10] Hu Y M, Gibson L, Hu H J, Ding Z F, Zhou Z X, Li W Q, Jiang Z G, Scheffers B R. Precipitation drives species accumulation whereas temperature drives species decline in Himalayan vertebrates. Journal of Biogeography, 2022, 49(12): 2218-2230.
- [11] Hu Y M, Ding Z F, Hu H J, Gibson L, Liang D, Zhou Z X, Liang J C, Scheffers B R. Functional and phylogenetic structure of mammals along elevational gradients in the Central and East Himalayas. Ecological Processes, 2024, 13(1): 65.
- [12] 潘新园. 中喜马拉雅鸟类物种丰富度垂直分布格局及其相关机制研究[D]. 广州: 中国科学院华南植物园, 2016.
- [13] Pan X Y, Ding Z F, Hu Y M, Liang J C, Wu Y J, Si X F, Guo M F, Hu H J, Jin K. Elevational pattern of bird species richness and its causes along a central Himalaya gradient, China. PeerJ, 2016, 4: e2636.
- [14] Hu Y M, Ding Z F, Jiang Z G, Quan Q, Guo K J, Tian L Q, Hu H J, Gibson L. Birds in the Himalayas: What drives beta diversity patterns along an elevational gradient Ecology and Evolution, 2018, 8(23): 11704-11716.
- [15] Hu Y M, Jin K, Huang Z W, Ding Z F, Liang J C, Pan X Y, Hu H J, Jiang Z G. Elevational patterns of non-volant small mammal species richness in Gyirong Valley, Central Himalaya: Evaluating multiple spatial and environmental drivers. Journal of Biogeography, 2017, 44(12): 2764-2777.
- [16] Ding Z F, Hu H J, Cadotte M W, Liang J C, Hu Y M, Si X F. Elevational patterns of bird functional and phylogenetic structure in the central Himalaya. Ecography, 2021, 44(9): 1403-1417.

- [17] Hu Y M, Scheffers B, Pan X Y, Hu H J, Zhou Z X, Liang D, Cheng W D, Wen Z X, Gibson L. Positive abundance-elevational range size relationship weakened from temperate to subtropical ecosystems. *Journal of Animal Ecology*, 2021, 90(11): 2623-2636.
- [18] 李晶晶, 韩联宪, 曹宏芬, 田园, 彭波涌, 王斌, 胡慧建. 珠穆朗玛峰国家级自然保护区鸟类区系及其垂直分布特征. *动物学研究*, 2013, 34(6): 531-548.
- [19] 胡一鸣, 梁健超, 金崑, 丁志锋, 周智鑫, 胡慧建, 蒋志刚. 喜马拉雅山哺乳动物物种多样性垂直分布格局. *生物多样性*, 2018, 26(2): 191-201.
- [20] 李昆仲, 刘洪涛. 西藏定结县典型冰湖分布特征及成灾影响因素分析. *科技与创新*, 2021(4): 54-55, 58.
- [21] Andrew T. Smith, 解焱. 中国兽类野外手册. 长沙: 湖南教育出版社, 2009.
- [22] 蒋志刚, 刘少英, 吴毅, 蒋学龙, 周开亚. 中国哺乳动物多样性(第2版). *生物多样性*, 2017, 25(8): 886-895.
- [23] 国家林业和草原局, 农业农村部. 国家重点保护野生动物名录. (2021-02-05) [2025-04-02]. <http://www.forestry.gov.cn/main/5461/20210205/122418860831352.html>.
- [24] 中华人民共和国濒危物种科学委员会. 濒危野生动植物种国际贸易公约(CITES)附录I、附录II和附录III. (2023-02-27) [2025-04-02]. http://www.cites.org.cn/zxgg/zxzn/202404/t20240419_774718.html.
- [25] IUCN. The IUCN Red List of Threatened Species. (2024-07-29) [2025-04-02]. <https://www.iucnredlist.org>.
- [26] 张飞萍, 陈清林, 吴庆锥, 侯有明, 尤民生. 毛竹林节肢动物群落的组成与结构. *生态学报*, 2005, 25(9): 2272-2283.
- [27] Montalvo V H, Sáenz-Bolaños C, Cruz-Díaz J C, Kamilar J M, Carrillo E, Fuller T K. Effects of camera trap placement on photo rates of jaguars, their prey, and competitors in northwestern *Costa Rica*. *Wildlife Society Bulletin*, 2023, 47(2): e1428.
- [28] Rahbek C. The elevational gradient of species richness: a uniform pattern *Ecography*, 1995, 18(2): 200-205.
- [29] Whittaker R J, Willis K J, Field R. Scale and species richness: towards a general, hierarchical theory of species diversity. *Journal of Biogeography*, 2001, 28(4): 453-470.
- [30] Heaney L R. Small mammal diversity along elevational gradients in the Philippines: an assessment of patterns and hypotheses. *Global Ecology and Biogeography*, 2001, 10(1): 15-39.
- [31] Colwell R K, Rahbek C, Gotelli N J. The mid-domain effect: there's a baby in the bathwater. *The American Naturalist*, 2005, 166(5): E149-E154.
- [32] Colwell R K, Lees D C. The mid-domain effect: geometric constraints on the geography of species richness. *Trends in Ecology & Evolution*, 2000, 15(2): 70-76.
- [33] Fu C Z, Wang J X, Pu Z C, Zhang S L, Chen H L, Zhao B, Chen J K, Wu J H. Elevational gradients of diversity for lizards and snakes in the Hengduan Mountains, China. *Biodiversity and Conservation*, 2007, 16(3): 707-726.
- [34] Fu C Z, Hua X, Li J, Chang Z, Pu Z C, Chen J K. Elevational patterns of frog species richness and endemic richness in the Hengduan Mountains, China: geometric constraints, area and climate effects. *Ecography*, 2006, 29(6): 919-927.
- [35] Ruan Y M, Ruan G F, Jiang Y, Jin Y Y, Yang Z S, Gu X D, Chen J L, Chen X, Yang B. Multiple factors shape the elevational distribution patterns of mountain ungulates in Southwest China. *Global Ecology and Conservation*, 2025, 60: e03592.
- [36] Lovari S, Minder I, Ferretti F, Mucci N, Randi E, Pellizzi B. Common and snow leopards share prey, but not habitats: competition avoidance by large predators. *Journal of Zoology*, 2013, 291(2): 127-135.
- [37] 刘思慧. 横断山南麓哺乳动物物种多样性研究: 滇南高原自然保护区哺乳动物物种丰富度的空间格局[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [38] Anisha A, Kishor P B. Mapping and analysis of the Himalayan musk deer habitat in Annapurna conservation area. *Journal of Wildlife and Biodiversity*, 2019, 3(2): 1-10.
- [39] Shiekh M H, Muhammad W, Riyaz A, Rainer W B, Fahim A, Arshad M K, Ryan C, Abed A, Ahmed Z D, Hosam O E. Habitat ecology of Himalayan musk deer (*Moschus chrysogaster*) in Manaslu Conservation Area, Nepal. *Journal of Wildlife Research*, 2023, 45(2): 123-135.