

DOI: 10.5846/stxb201906041185

陈智强, 赵增辉, 王远飞, 韦力, 丁国骅, 林植华. 基于红外相机技术和 MaxEnt 模型的黑麂 (*Muntiacus crinifrons*) 活动节律分析和潜在适生区预测. 生态学报, 2021, 41(9): 3535-3547.

Chen Z Q, Zhao Z H, Wang Y F, Wei L, Ding G H, Lin Z H. Analysis of activity rhythm and prediction of potential suitable distribution of black muntjac (*Muntiacus crinifrons*) based on the ITCT and MaxEnt model. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3535-3547.

基于红外相机技术和 MaxEnt 模型的黑麂 (*Muntiacus crinifrons*) 活动节律分析和潜在适生区预测

陈智强^{1, 2}, 赵增辉², 王远飞¹, 韦力¹, 丁国骅¹, 林植华^{1, *}

1 丽水学院生态学院, 丽水 323000

2 浙江农林大学动物科技学院, 临安 311300

摘要:黑麂是中国特有的濒危鹿科动物, 分布于浙闽赣皖四省的部分山地丘陵。为明确黑麂的活动节律及适宜环境温度, 探讨四省区域的潜在分布区情况, 2018 年 1 月至 2019 年 1 月, 在遂昌牛头山林场内布设 57 台 Ltlacorn 红外相机, 对黑麂及其同域物种进行研究。监测期间红外相机共有效监测到黑麂 26 次, 相对多度指数为 1.79。根据监测到黑麂位点与文献记录, 共确定黑麂出现位点 16 个。根据黑麂栖息地特征选择 6 个生境因子为预测背景, 利用 MaxEnt 模型预测黑麂在浙闽赣皖四省的潜在适生区。模型预测结果准确性较高 (AUC = 0.976)。结果表明: (1) 黑麂年活动高峰季节为夏季, 日活动高峰为 7:00—9:00 和 16:00—18:00; (2) 温度是影响黑麂活动的重要因素, 其活动最适宜温度范围为 18—28 °C; (3) 黑麂潜在适生区总面积约为 25980.62 km², 占四省总面积的 4.87%; (4) 黑麂潜在适生区分为浙赣皖潜在分布区、浙赣潜在分布区、洞宫山潜在分布区和括苍山潜在分布区 4 个区域。建议 (1) 加强潜在分布区内种群资源的调查; (2) 识别并建立各适宜生境之间的生态廊道; (3) 建立黑麂保护网络。

关键词:黑麂; 遂昌牛头山; 活动节律; 环境温度; MaxEnt 模型; 潜在分布

Analysis of activity rhythm and prediction of potential suitable distribution of black muntjac (*Muntiacus crinifrons*) based on the ITCT and MaxEnt model

CHEN Zhiqiang^{1, 2}, ZHAO Zenghui², WANG Yuanfei¹, WEI Li¹, DING Guohua¹, LIN Zhihua^{1, *}

1 College of Ecology, Lishui University, Lishui 323000, China

2 College of Animal Science and Technology, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Linan 311300, China

Abstract: The black muntjac (*Muntiacus crinifrons*) is an endangered mountain Cervidae endemic in China. Its distribution is limited to hilly and mountainous regions in Zhejiang, Fujian, Jiangxi, and Anhui Provinces. A study was carried out to understand the effects of activity rhythm, suitable environmental temperature, and distribution of potentially adaptive areas. Fifty-seven Ltlacorn infrared-triggered camera-traps were installed in six sample areas (Xijianling, Daxikeng, Alpine wetland, Jiupanli, Zhufengxia, and Taohualing) of Suichang Niutou Mountain, Zhejiang Province, China to monitor black muntjac and other wildlife from January 2018 to January 2019. A total of 13,655 camera-days of data were collected, including 89176 photos and videos during the 12 months of data collection using the infrared cameras. Twenty-six black muntjac were counted, and the calculated relative abundance index (RAI) was 1.79. The highest quantitative value for relative abundance index (RAI) was 3.85 in Taohualing and the lowest one was 1.27 in Jiupanli. The MaxEnt model was

基金项目:国家自然科学基金项目 (31500329); 生态环境部南京环境科学研究所委托项目 (20-04-01); 丽水市重点研发计划项目 (2020ZDYF07); 遂昌县林业发展中心委托项目 (20-07-01)

收稿日期:2019-06-04; **网络出版日期:**2021-03-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhlin1015@126.com

used to obtain the current potentially suitable habitat based on six environmental variables and 16 current distribution sites. The accuracy of the model was verified by a receiver operating characteristic curve (ROC). The results showed that the area under ROC curve (AUC) was 0.976, suggesting a perfect predictive power of the model. The statistical results indicated that the peak of seasonal activity was in summer, and the two peaks of daily activity appeared from 07:00 to 09:00, and 16:00 to 18:00. Temperature is one of the most critical environmental factors influencing the activity of black muntjac; the range of preferred temperature was from 18 °C to 28 °C. Acicular-leaved forest was the primary food source for black muntjac, and the altitude of preferred habitat was from 1000 m to 1200 m. We use the MaxEnt model to predict the suitable habitat of black muntjac, and the results show that there were three mainly geographical areas in China. The area of unsuitable habitat was approximate 508019.38 km², which accounted for 95.13% of the total area. The area of suitable habitat was approximate 25980.62 km², which accounted for 4.87% of the total area. It was divided into highly suitable habitat (3700.73 km², 0.69% of the total area), medium suitable habitat (7552.51 km², 1.41% of the total area), and low suitable habitat (14727.39 km², 2.76% of the total area). The results of Jackknife test indicated that altitude, annual precipitation, precipitation of the driest month, and minimum temperature of the coldest month were the most important environmental factors affecting the suitable habitat distribution of black muntjac, while isothermality and mean temperature of the driest quarter had low influence. Two strategies on the conservation and management of black muntjac population were proposed: strengthen the investigation of the potential population resources of black muntjac and establish a migration corridor and protection network among suitable habitats of black muntjac.

Key Words: *Muntiacus crinifrons*; Suichang Niutoushan Mountain; activity rhythm; ambient temperature; MaxEnt model; potential distribution

全球气候变化及人为干扰下的栖息地破坏,使生物多样性面临前所未有的威胁^[1]。尽管有关气候变化导致物种灭绝的证据相对有限,但在未来的几十年中,气候变化可能对全球范围内的生物多样性造成巨大威胁^[2]。已被证明,其可导致物种的栖息地向高纬度和高海拔地区迁移以及生物季节活动时间的改变^[3-4]。而随着物种向高海拔地区迁移,适宜其栖息的土地面积的数量、质量下降以及当前和未来合适海拔带之间的垂直间隙的扩大可能妨碍动物种群的扩散与交流,进而导致种群规模下降,最终导致物种灭绝^[5-6]。山地物种的栖息地选择具有高度的地方特异性^[7-8]、狭窄温度带^[6, 9-10]以及狭窄的海拔范围^[6, 11]。因此,了解山地动物的活动节律,预测其适生区分布,探究栖息地选择的关键生态因子,有利于开展山地动物的保护与管理。

近些年,随着红外线触发自动数码相机陷阱技术(Infrared triggered cameras technology, ITCT, 以下简称红外相机技术)的开发,越来越多的红外相机技术运用于鸟类和兽类的调查中^[12-13]。该技术与传统的调查方法相比,具有可日夜连续监测、无损伤等优点,已成研究野生动物,尤其是珍稀濒危野生动物的重要方法^[14]。最大熵模型(MaxEnt)具有较好的物种分布预测能力^[15-16],且被应用于珍稀濒危野生动物的生境适宜性评价^[17-20],但对于种群稀少且行踪隐蔽的动物难以有效评价。通过结合红外相机技术所获得的物种分布的准确经纬度信息,可提高生物适生区预测结果的准确性。

黑麂(*Muntiacus crinifrons*)隶属于偶蹄目鹿科鹿属,为典型的山地物种,是我国特有 I 级重点保护动物,被《中国脊椎动物红色名录》列为濒危^[21]。黑麂栖息地的垂直分布较窄,主要栖息于 1000m 左右的山区常绿阔叶林以及常绿落叶混交林中的芒丛或灌木林中^[22-23]。有关黑麂的研究主要涉及物种资源及资源量调查^[22-26]、生境选择^[27-30]、食性^[31-32]、繁殖^[33-36]、遗传多样性^[37-41]等内容。目前,采用红外相机技术已在浙赣皖三省的 9 个自然保护区中陆续发现黑麂的活动^[42-51]。然而,有关黑麂适生区预测的研究多集中自然保护区内^[30, 52-53],仅雷军成等^[54]在全国范围内研究气候变化对其分布区的潜在影响,侧重于气候变化对 2050 和 2070 年时黑麂适宜生境的影响,未对其现存潜在栖息地进行预测^[54]。本研究以浙江遂昌牛头山林场为研究区域,采用红外相机技术对该区域内黑麂资源进行调查,分析黑麂的活动节律与环境温度之间的关系。同时,

采用 MaxEnt 模型对于浙闽赣皖四省的黑麂潜在栖息地进行预测, 以期对现有黑麂自然种群资源的全面保护以及保护区的划分和管理提供科学依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

牛头山属武夷山系仙霞岭山脉分支, 地处浙江省丽水市遂昌县东北部和金华市武义县西南部。遂昌牛头山林场拥有郑岗岭、大西坑、荷花地、天堂等 7 个林区, 面积约为 7000 hm², 绝大多数山地为中山区, 少数山地为低山丘陵, 相对高差 1300 m, 主峰海拔 1560 m。该区域雨量充沛, 气候温暖湿润, 属于中亚热带湿润季风区, 一年中气候有明显的季节变化。年平均气温为 10—16 °C, 年总降水量为 1800—2400 mm^[55]。林场全境植物群落多样, 区系组成复杂, 包括常绿阔叶林、落叶—常绿阔叶林混交林、落叶阔叶林、竹林等多种植被类型。分布于该区域的濒危珍稀动物主要有黄腹角雉 (*Tragop ancaboti*)、白颈长尾雉 (*Syrnaticus ellioti*)、白鹇 (*Lophura nycthemera*)、黑麂、鬃羚 (*Capricornis milneedwardsii*) 和猕猴 (*Macaca mulatta*) 等 (数据未发表)。

1.2 红外相机数据获取

根据遂昌牛头山林场的地形、植被类型、兽类活动路径等多种因素, 采用样线法进行红外相机布设, 两相机间的布设距离不小于 200 m。2018 年 1 月在主峰下和桃花岭样区各选择 12 个位点, 西肩岭和大西坑样区各 9 个位点, 高山湿地样区 9 个位点, 九盘里样区 6 个位点, 共计 57 个位点 (图 1), 监测时长为 1 年。监测位点涵盖竹林、针叶林、常绿阔叶林、灌木林和针阔混交林 5 种植被类型, 海拔宽度为 648—1413 m。

每个位点布设 1 台 Ltlacorn 感应红外相机。相机多固定于具有明显动物活动痕迹, 如粪便、兽径旁的大型乔灌木上, 距地面约 0.5 m。红外相机统一设置, 包括拍摄模式 (照片+视频)、连拍 (3 张)、时间间隔 (1 s) 和灵敏度 (中) 等; 详细记录相机布设地点的地理坐标、海拔、植被类型等。监测期间, 及时检查与更新 32G SD 卡和电池。

1.3 红外相机数据读取与分析

红外相机数据包括照片和视频。通过照片分析及视频辅助对所拍摄到的物种进行鉴定。根据《浙江动物志: 兽类》^[56] 的描述进行黑麂照片判定, 提取独立有效照片, 以降低同一物种的照片相关性。独立有效照片的判定标准: (1) 相同或不同物种的不同个体连续照片和视频; (2) 相同物种的连续照片和视频之间时间间隔大于 30 min; (3) 相同物种的不连续照片或者视频。符合以上任意一条标准, 视为独立有效照片^[57-58]。每张独立有效照片视为一次有效探测, 并对拍摄时间、环境温度和相机位点等信息进行汇总。

1.4 文中所涉及的术语定义

i : 记录时间点数目, 时间间隔为 1 h, 全天 24 h 拍摄黑麂的日活动模式; t_i : 第 i 个数据点的时间值, 如 6:00—7:00 时间值为 6, 11:00—12:00 时间值为 11; N : 观察期间相机工作日天数。1 台相机连续正常工作 24 h 记为 1 个相机工作日; A : 观察期间样地内黑麂的总有效探测次数; p_i : 在 t_i 时刻拍摄到的黑麂有效探测次数; T_i : 在 i °C 温度拍摄到的黑麂有效探测次数; S_i : 在某个季节下的黑麂有效探测次数 (3—5 月定义为春季; 6—8 月定义为夏季; 9—11 月定义为秋季; 12—翌年 2 月定义为冬季); E_i : 在某个海拔区段内的黑麂有效探测次数 (将相机海拔区段分为 600—800 m、800—1000 m、1000—1200 m 和 >1200 m); V_i : 在某个植被类型下的黑麂有效探测次数; r_i : t_i 时刻的相对活动强度, 定义为 t_i 时刻内拍摄到的黑麂有效探测次数占样地内 A 的比例即 $r_i = p_i/A$ 。

相对多度指数 (relative abundance index, RAI), 用以代表动物种群的相对数量, 指数大小与动物种群相对数量呈正相关^[59], 公式如下: $RAI = (A/N) \times 1000$

昼行性指数 (diurnal-nocturnal index, DNI) 用于判别黑麂的习性属于昼行性还是夜行性^[60]。若 DNI 数值接近 13/24 (约为 0.54), 表示黑麂活动没有明显的昼夜差别; $DNI > 13/24$, 表明黑麂活动以昼行性为主; $DNI < 13/24$, 表明黑麂活动夜行性为主。公式如下:

$$DNI = \sum_{i=6}^{18} r_i$$

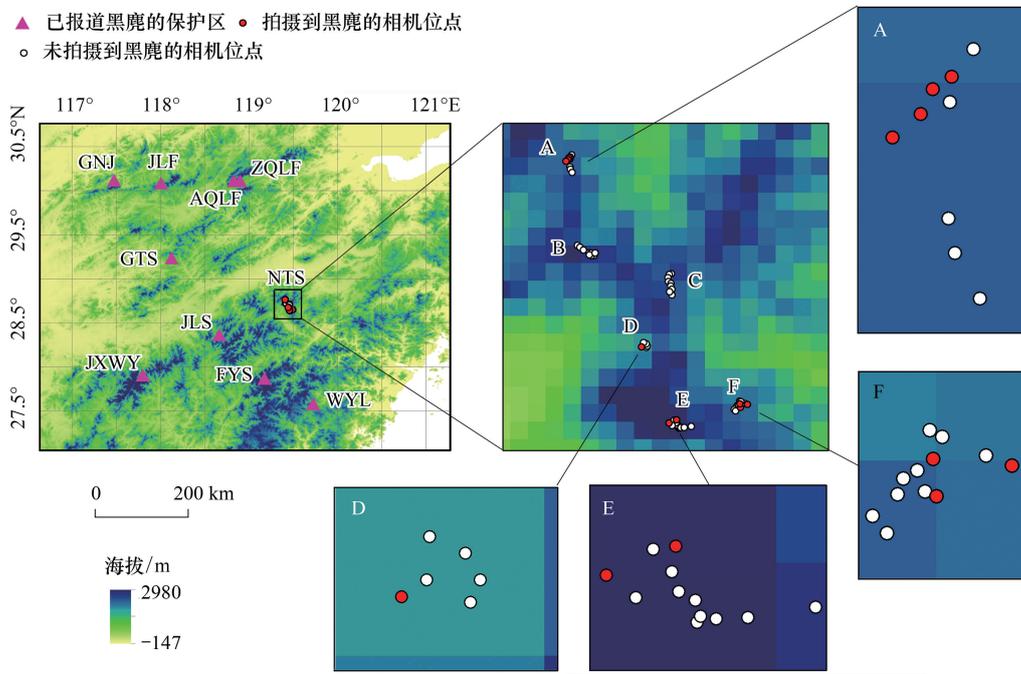


图1 已报道黑鹿的自然保护区位点及遂昌牛头山红外相机位点

Fig.1 Map of the nature reserve site of *M. crinifrons* have been reported and infrared cameras installation sites for studying *M. crinifrons* in Suichang Niutou mountain, Zhejiang Province

GNJ: 牯牛降国家级自然保护区; JLF: 九龙峰省级自然保护区; AQLF: 安徽清凉峰国家级自然保护区; ZQLF: 浙江清凉峰国家级自然保护区; GTS: 古田山国家级自然保护区; JLS: 九龙山国家级自然保护区; FYS: 凤阳山—百山祖国家级自然保护区; WYL: 乌岩岭国家级自然保护区; JXWY: 江西武夷山国家级自然保护区; NTS: 遂昌牛头山。A: 西肩岭; B: 大西坑; C: 高山湿地; D: 九盘里; E: 主峰下; F: 桃花岭

时间段活动强度指数(time-period activity intensity index, TAI): 衡量黑鹿日活动节律差异的指标^[61]。

$$TAI = (p_i/A) \times 100$$

季节活动强度指数(seasonal activity intensity index, SAI): 衡量黑鹿季节活动节律差异的指标。

$$SAI = (S_i/A) \times 100$$

温度活动强度指数(temperature activity intensity index, TEAI): 分析黑鹿对环境温度的选择^[61]。

$$TEAI = (T_i/A) \times 100$$

海拔活动强度指数(elevation activity intensity index, EAI): 分析黑鹿对海拔的选择。

$$EAI = (E_i/A) \times 100$$

植被类型活动强度指数(vegetational activity intensity index, VAII): 分析黑鹿对植被类型的选择。

$$VAII = (V_i/A) \times 100$$

1.5 环境温度的读取

环境温度受海拔影响且在山地小气候影响下, 每台相机布设点的气温在同一时刻下也可能存在差异。Welbourne 等^[62] 研究显示, 红外相机的温度传感装置较为敏感, 其工作原理是根据被拍摄对象的热辐射与周围环境的热量差异而触发相机拍摄。因此, 红外相机所记录的环境温度具有一定的参考意义。

1.6 黑鹿分布区预测

1.6.1 黑鹿分布点信息

通过遂昌牛头山红外相机监测、文献检索搜集到黑鹿现代分布记录 28 条。参照王茹琳等^[63] 的方法确定标本地理坐标并对全部分布记录进行筛选, 最终筛选获得 16 个分布点。

1.6.2 环境变量数据的获取与选择

本文共选取环境因子 20 个,包括气候因子 19 个(BIO1—BIO19)、地形因子 1 个(Altitude)。气候与地形数据均来自于 WorldClim 环境数据库(<http://www.worldclim.org/>),以当代时间段(1970—2000 年)的生物环境因子均值为结果,空间分辨率为 30"(约等于 1 km²)。用 DIVA—GIS 软件提取 16 个分布点的 19 个当代气候变量数值与海拔数值。为降低因子间多重共线性对于模型的干扰,本文参考 Yang 等^[64]提出的方法,运用多重共线性分析来检验环境因子间的相关性,对于两因子之间相关性绝对值 $|r| > 0.85$,只选用一个因子进入模型。根据因子相关性分析结果,最终筛选 6 个环境变量,包括 ALT(海拔)、BIO3(等温性)、BIO6(最冷月份最高温)、BIO9(最干季度均温)、BIO12(年均降雨量)、BIO14(最干月降雨量)。

1.6.3 MaxEnt 模型预测与精度验证

采用 MaxEnt 3.3.3 k 软件(<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/MaxEnt/>)对黑麂的潜在分布区进行预测。MaxEnt 模型的运行属性设置为:模型重复运行 5 次;每一次运行都使用分布样点中 75% 的随机样本为训练集,剩余 25% 的样本为测试集;使用“Do jackknife to measure variable importance”功能对各气候变量进行 Jackknife 检验以评价其重要性;使用“Create response curves”功能创建各气候变量的响应曲线以评估其对模型预测结果的影响;采用“cross validate”的重复运行类型;以 Logistic 格式输出结果。构建黑麂分布模型进行模拟,以 5 次模拟结果的平均值作为最终结果^[65]。

AUC 因其不易受到物种分布率与阈值的影响,评价精度稳定,常被用于物种分布模型的精度验证^[66]。本文 MaxEnt 模型采用受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC 曲线)分析法验证模型精度。ROC 曲线下的面积为 AUC 值,AUC 值越大,表示环境变量与预测物种地理分布模型间的相关性越大,越容易分辨该物种有无分布,预测效果也就越好。评价标准为:AUC 值为 0.5—0.6,失败;0.6—0.7,较差;0.7—0.8,一般;0.8—0.9,好;0.9—1.0,非常好^[67]。

1.6.4 适生区划分

利用 ArcGIS 10.0 的转换工具将 5 次模型平均预测结果的 ASCII 编码文件结果转化为栅格格式按照人工分级法进行重分类,根据黑麂的生境适宜性分成 4 个等级,即非适宜区(<0.3)、低适宜区(0.3—0.5)、中适宜区(0.5—0.7)、高适宜区(>0.7),最终得到黑麂在浙闽赣皖四省的潜在适生区空间分布图。同时,利用 ArcGIS 10.0 软件的空间统计功能,计算不同潜在适生区面积及比例。

1.7 数据分析

全部数据用 SPSS 18.0 进行分析。用 G 检验和线性相关分析对相应数据进行统计分析。所有统计值用平均值 \pm 标准误表示,显著性水平设置为 0.05。

2 结果

2.1 黑麂分布区及遂昌牛头山红外相机拍摄概况

结合已报道的黑麂野外种群相关资料,其主要栖息地位于北纬 27.5°—30.2°,东经 117.4°—119.7°范围内(图 1)。本研究中,遂昌牛头山的红外相机有效工作日为 13655 个;在月份上,5 月(1410)最多,12 月(900)最少;在季节上,春季(4069 个)最多,冬季(2971)最少。红外相机视频与照片文件约 89176 份,从中获取到 4 个样区的黑麂活动监测数据,总有效探测次数为 26 次。4 个样区中监测到黑麂的相机布设平均海拔范围为 668—1356 m,植被类型包括针叶林、常绿阔叶林、灌木林和竹林,有效监测平均次数范围为 1—4 次;各样区 RAI 指数在 1.27—3.85 范围内(表 1)。另外,2018 年 6 月与 7 月在桃花岭样区 3 个不同位点均记录到成对黑麂活动。图 2 为本研究中红外相机拍摄到 4 张具有代表性的黑麂照片。

2.2 日活动节律

本研究中,黑麂的 DNI 指数为 0.96。红外相机在 4 个样区监测到黑麂的日活动发生在 4:00—20:00 期间,且活动频次在不同时间段存在显著差异($G = 26.45$, $df = 16$, $P < 0.05$)。TAII 指数在 8:00—10:00 和

16:00—18:00 时最高, 占总活动频次的 55.62% (图 3)。

表 1 遂昌牛头山 4 个监测到黑鹿的样区情况

Table 1 Four sample areas of *M. crinifrons* were detected in Suichang Niutou Mountain

样区 Sample region	海拔 Elevation/m	植被类型 Vegetational type	有效监测次数	RAI
桃花岭	1004.3±40.6(941—1080)	针叶林、常绿阔叶林	4±1.5(1—6)	3.85
主峰下	1356.0±57.0(1299—1413)	灌木林、常绿阔叶林	2±1.0(1—3)	1.43
西肩岭	1056.3±10.5(1036—1075)	针叶林、常绿阔叶林、竹林	2.3±0.8(1—4)	3.13
九盘里	668	竹林	1	1.27

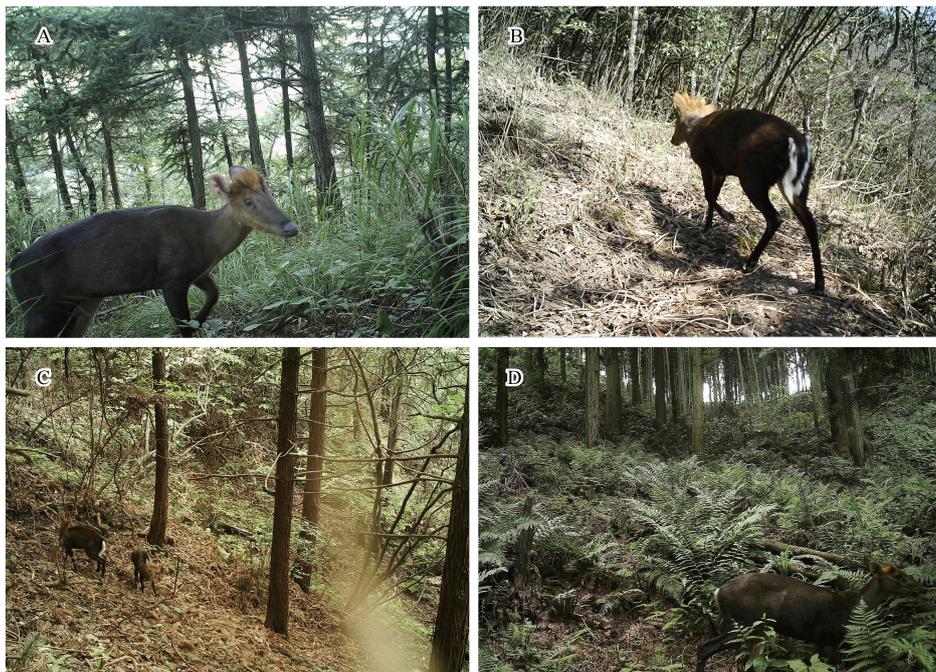


图 2 遂昌牛头山红外相机拍摄的黑鹿照片

Fig.2 The photos of *M. crinifrons* trapped by the infrared cameras in Suichang Niutou mountain, Zhejiang Province

A、D: 西肩岭拍摄到的黑鹿; B: 主峰下拍摄到的黑鹿; C: 桃花岭拍摄到的黑鹿

不同季节的 TAI 指数在同一时间段内并不一致。春季 TAI 指数在 8:00—10:00 和 14:00—16:00 时出现峰值(图 3); 夏季在 4:00—6:00、8:00—10:00 和 16:00—18:00 时出现峰值(图 3); 秋季则在 6:00—10:00、12:00—14:00 和 16:00—18:00 时出现峰值(图 3)。春夏季的 TAI 指数均在最后时间段内最大, 而秋季的 TAI 指数在三个时间段内差异不大(图 3)。

2.3 季节活动节律

黑鹿的季节活动频次在不同季节间存在显著差异 ($G = 20.9$, $df = 3$, $P < 0.001$), SAI 指数在夏季最高, 春季次之, 秋季最低, 冬季未监测到黑鹿的活动(图 4)。环境温度在不同季节间存在显著差异 ($F_{3, 27} = 42.8$, $P < 0.001$), 进一步用 Tukey 多重比较, 两两季节间均存在显著差异 (all $P < 0.03$), 环境温度从高到低依次为夏季、春季、秋季和冬季。SAI 指数与季节平均温度呈显著正相关 ($r = 0.962$, $F_{1, 2} = 24.6$, $P < 0.05$) (图 4)。

2.4 环境温度、海拔和植被类型的选择

本研究中, 监测到黑鹿活动的平均环境温度为 (21 ± 1.22) °C (范围为 (6.5—32.8) °C)。以每 5 °C 为间隔, 黑鹿的活动频次在不同环境温度区间存在显著差异 ($G = 16.36$, $df = 5$, $P < 0.01$), TEAI 指数呈偏峰分布,

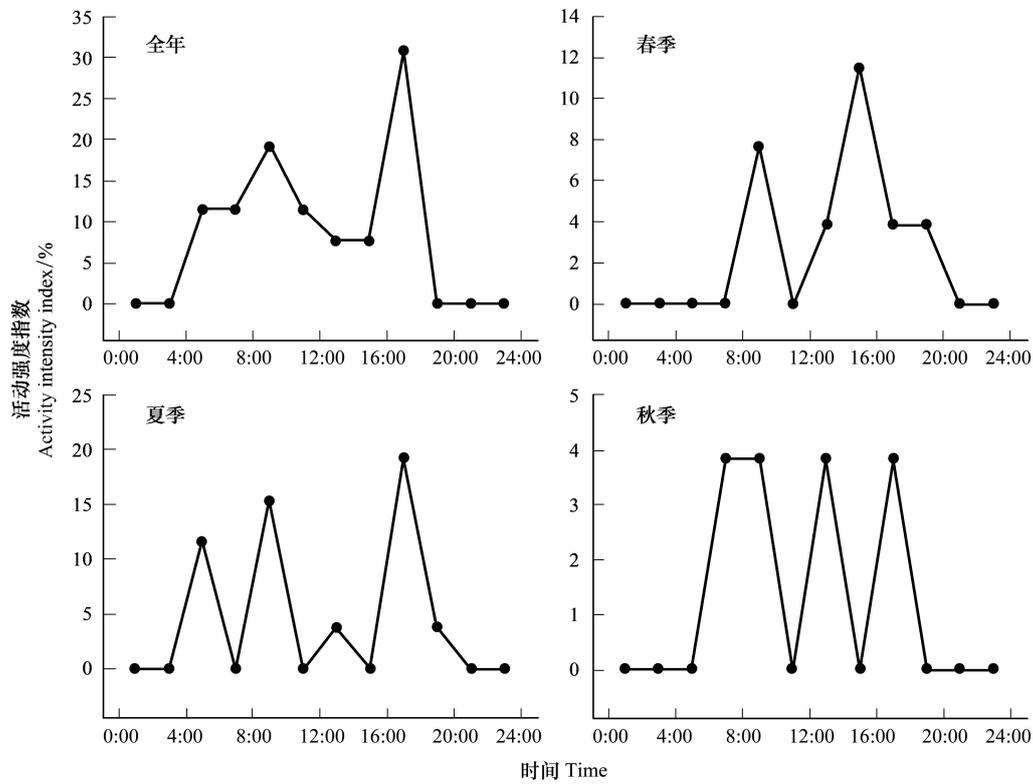


图 3 遂昌牛头山黑麂全年、春季、夏季和秋季的日活动节律

Fig.3 Daily activity rhythm of *M. crinifrons* during one year, spring, summer and fall in Suichang Niutou Mountain, Zhejiang Province

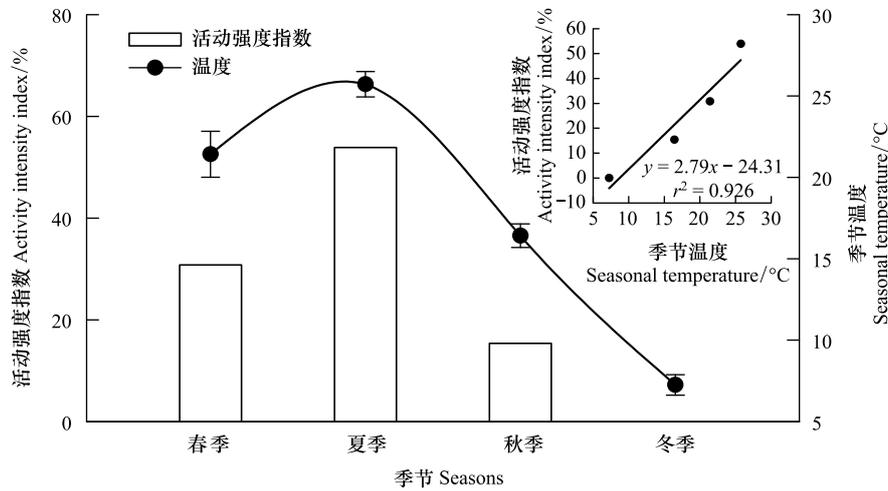


图 4 遂昌牛头山黑麂季节活动强度指数与季节温度情况. 图中给出两者关系图和回归方程、回归系数

Fig.4 Seasonal activity intensity index (SAII) of *M. crinifrons* and seasonal temperature in Suichang Niutou Mountain, Zhejiang Province. The relationship of SAI and seasonal temperature and regression equation and regression coefficient are given in the Figure

在 21—25 °C 范围内 TEAI 指数高达 38.46% (图 5); 在不同海拔区段间活动频次存在显著差异 ($G = 16.5, df = 3, P < 0.001$), EAI 指数在 1000—1200 m 海拔最高 (图 5); 在不同植被类型下活动频次存在显著差异 ($G = 16.8, df = 3, P < 0.001$), VAI 指数在针叶林时最高 (图 5)。

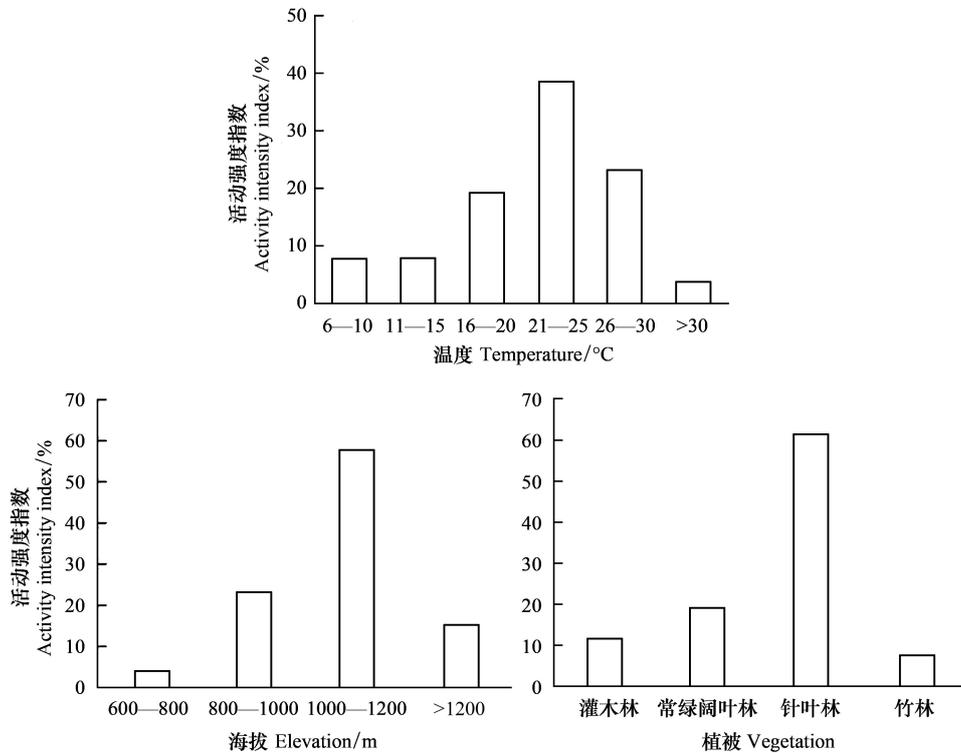


图5 遂昌牛头山黑麂的温度、海拔和植被类型活动强度指数情况

Fig.5 Temperature, elevational and vegetational activity intensity index of *M. crinifrons* in Suichang Niutou Mountain, Zhejiang Province

2.5 潜在适生区预测

图6为浙闽赣皖四省黑麂的栖息地适应性分布图,其潜在适生区主要有浙赣皖潜在分布区(黄山-天目山-白际山-怀玉山-千里岗)、浙赣潜在分布区(武夷山北段-仙霞岭)、洞宫山潜在分布区和括苍山潜在分布区等4个区域。ROC曲线评价结果显示MaxEnt模型的预测结果达到优秀水平(AUC平均值 \pm 标准差=0.976 \pm 0.015;图6),说明黑麂潜在适生区预测结果可靠且精度较高。

黑麂适生区面积统计表明,黑麂在浙闽赣皖四省的潜在适生区面积约为25980.62 km²,约占四省总面积的4.87%。其中,高适宜区面积约为3700.73 km²,所占四省总面积的比重约为0.69%;中适宜区面积约为7552.51 km²,所占四省总面积的比重约为1.41%;低适宜区面积约为14727.39 km²,所占四省总面积的比重最大,约为2.76%。

从MaxEnt模型刀切法分析结果可以看出(图6):使用单环境因子建模时,BIO12、ALT、BIO14、BIO6对模型增益效果最为明显,表明这4个环境因子的贡献较大;而BIO3、BIO9对模型增益效果不明显,表明这2个环境因子的贡献较小。

MaxEnt模型运行结果中包含生态因子响应曲线,即存在概率与生态因子阈值范围的关系(图7)。根据黑麂的响应曲线,划分6种环境因子的适宜值范围(存在概率大于0.5的范围)。BIO12响应曲线显示,年均降雨量在大于1750 mm,为黑麂分布的适宜降雨量范围,且降雨量在2800—3200 mm时黑麂分布概率最大。ALT响应曲线显示,海拔小于2000 m时,分布概率随着海拔的增加而增加,且在大于750 m时,其存在概率大于0.5。BIO14响应曲线显示,黑麂的适宜范围在40—140 mm。BIO6响应曲线显示,黑麂的适宜范围在-3—1 °C。BIO3响应曲线显示,黑麂的适宜范围在19.77—26。BIO9响应曲线显示,黑麂的适宜范围在-3—7 °C。

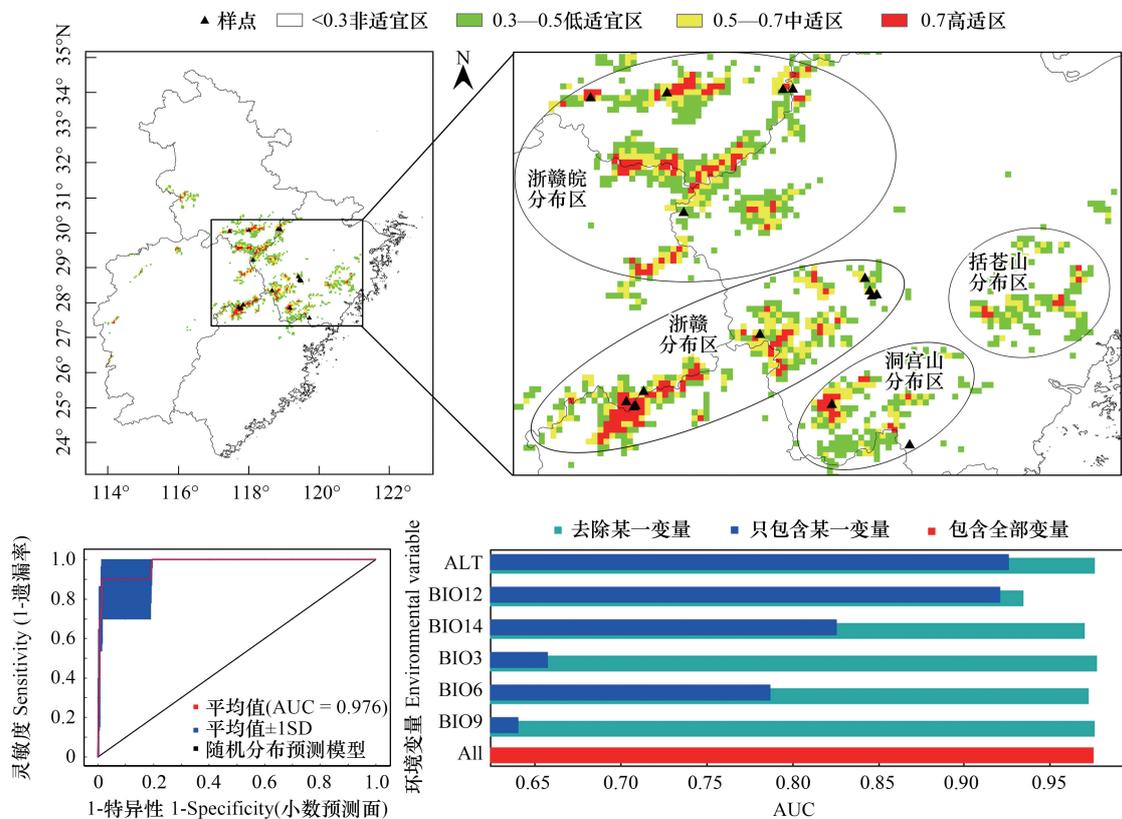


图 6 黑麂在浙闽赣皖的潜在适生区分布情况、MaxEnt 模型对黑麂预测结果的 ROC 曲线验证及基于刀切法的环境变量重要性分析

Fig.6 Potential suitable habitats of *M. crinifrons* in four provinces, ROC curve verification of prediction process for *M. crinifrons* by Maxent model and importance analysis of environmental factors by Jackknife method

ALT: 海拔 Altitude; BJ03、BJ06、BJ09、BJ12、BJ14 分别代表等温性、最冷月份最高温、最干季度均温、年均降雨量、最干月降雨量

3 讨论

3.1 遂昌牛头山林场黑麂的种群现状

根据 RAI 指数大小比较可知,在监测到黑麂的 4 个样区中,以桃花岭样区的种群数量最多,接近安徽清凉峰国家级自然保护区的种群数量^[49],甚至超过浙江清凉峰国家级自然保护区的种群数量^[43]。2018 年 6 月与 7 月,布设在桃花岭样区的 3 个不同红外相机均记录到两只黑麂成对活动。这表明,在遂昌牛头山林场存在一定数量的黑麂种群。但遂昌牛头山林场属于国有林场,与其他已报道黑麂活动的 9 个自然保护区相比,保护力度较小、人为干扰大,黑麂种群受威胁程度大。

3.2 遂昌牛头山林场黑麂的活动温度选择

环境温度是影响动物活动节律的关键气候因子^[68]。哺乳动物可通过自身体内氧化代谢产热在较大的环境温度范围内维持高而相对恒定的体温^[69]。而这种恒定体温的维持是以高能量消耗为代价的^[70]。当环境温度适宜时,动物体内温度与体外温度的差距较少,体温调节所需能耗大幅降低^[71]。研究结果显示,在一定环境温度范围内(5—30 °C),黑麂 SAI 指数与环境温度呈正相关关系,且 21—25 °C 的温度范围为黑麂的活动高峰。因此,我们推测 21—25 °C 是黑麂活动的适宜环境温度范围,在该适温区内黑麂的体温调节能耗较低。

3.3 遂昌牛头山林场黑麂的活动节律

本研究通过计算黑麂的 DNI 指数与 TAI 指数,推断黑麂为以晨昏型为主的昼行性动物,这与章书声

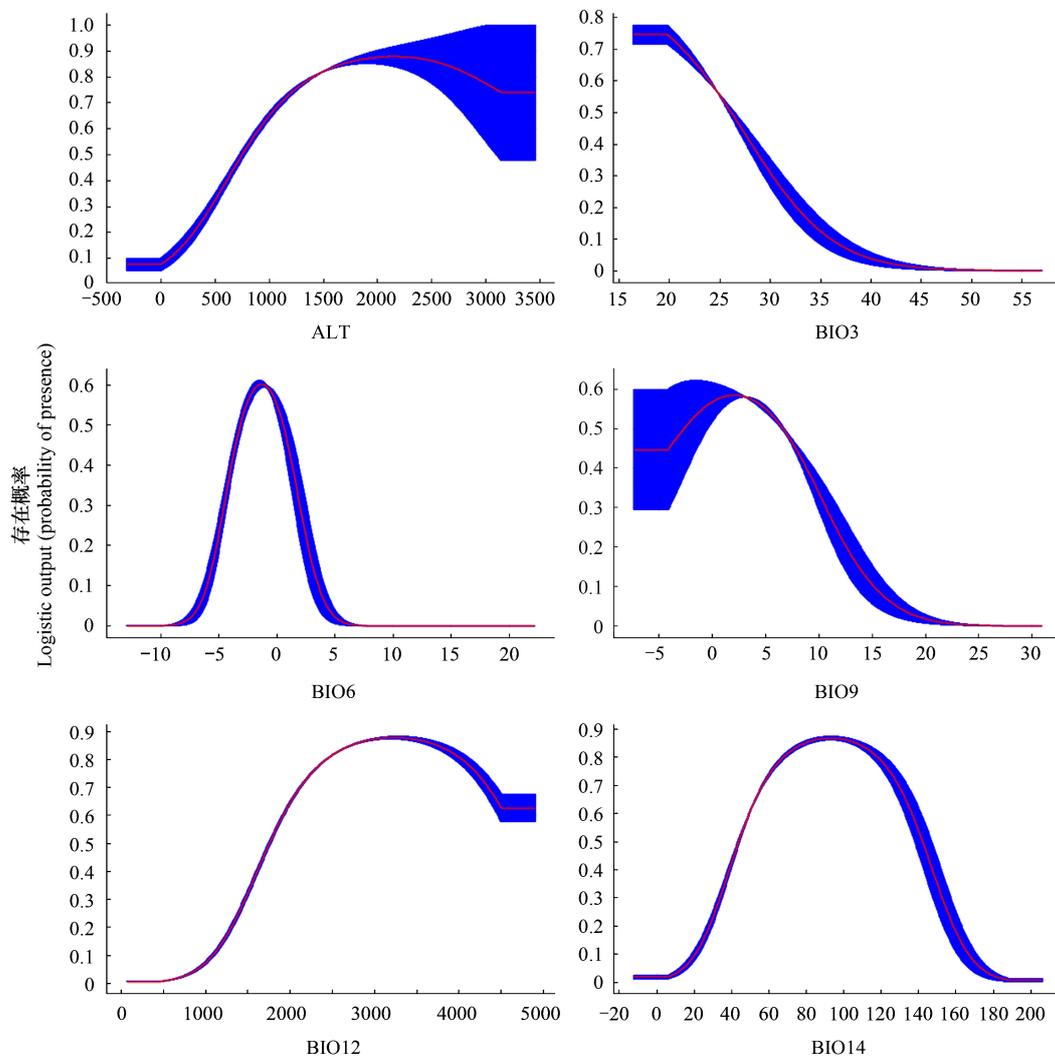


图7 海拔、BIO3、BIO6、BIO9、BIO12 和 BIO14 等 6 个生态因子响应曲线

Fig.7 Responses curve of six ecological factors including altitude, BIO3, BIO6, BIO9, BIO12 and BIO14

等^[72]的结果一致。一天之内,黑麂一般有 2 或 3 个活动高峰期,夏秋两季为 3 个,春季为 2 个。在古田山自然保护区中,黑麂的日活动高峰期为 2 个^[72],这可能与两地的气候、海拔、主要植被类型等环境因子的差异有关。夏季由于日出时间较早,其最早的活动高峰在 4:00—8:00 内出现;同时,夏秋两季的晚活动高峰较春季有时间滞后。这种活动高峰的季节变化可能为吻合日出日落的季节变化。黑麂的晨昏型活动节律且活动高峰时间随季节变化而变化的习性,可能是为了通过进食嫩叶上的露水来提供水分,进而降低搜寻水源时被捕食的风险^[73]。

当外界环境条件(如温度,光照等)变化时,动物会通过调整自身行为以形成特定条件下的活动节律模式^[74]。本研究表明,温度是影响遂昌牛头山黑麂季节活动节律的重要因子。监测期间,研究样区的冬季平均温度为 6.78 °C,处于黑麂的非适宜活动温度内,这也是本研究未监测到黑麂的重要原因之一。在夏季,黑麂的活动频次占全年总活动频次的 53.85%,且除晨昏时间段外,其日活动节律也在 8:00—10:00 内出现高峰。黑麂喜好在夏季活动可能原因有(1)监测期间,研究样区的夏季平均温度为 23.18 °C,环境温度适宜黑麂活动;(2)黑麂全年以灌木为主要食物,食性更接近嫩食者^[32],夏季为多数灌木的生长旺盛期,嫩叶较多,食物资源丰富;(3)确保产仔期间及新生后代的安全是动物在长期进化上所面对的问题,黑麂虽为全年繁殖^[33],但在具有更好的隐蔽条件的夏季进行繁殖更为安全^[75-76]。

3.4 遂昌牛头山林场黑麂的海拔与植被类型的选择

黑麂偏好栖息在海拔为 1000—1200 m 之间的针叶林中,其次为常绿阔叶林。三尖杉(*Cephalotaxus fortunei*)、光叶菝葜(*Smilax glabra*)、矩形鼠刺(*Itea chinensis*)、南五味子(*Kadsura longipedunculata*)、马银花(*Rhododendron ovatum*)5 种黑麂主要食物资源^[22, 32]主要分布于针叶林、常绿阔叶林与针阔混交林。同时, Althoff 等^[77]认为植被郁闭度越低,林下小生境温度就越高。针叶林的郁闭度较低,利于栖息地环境积温^[27]。栖息在以中山区和种植经济树种占绝大多数的牛头山林场中,黑麂的栖息地选择偏好可以获得一定的热量、食物资源以及隐蔽条件,这与黑麂在九龙山国家级自然保护区内的栖息地选择结果类似^[27, 29]。

3.5 黑麂的分布区预测

栖息地破碎化和丧失是导致生物多样性减少和物种灭绝的重要原因^[78]。而有效开展保护工作的前提是对于受胁物种的潜在分布区进行预测,充分了解其现有生境情况^[79]。本研究预测结果显示,黑麂现有适生区十分狭小,仅占四省总面积的 4.87%,且其栖息地呈岛屿状分布于四省的部分山地丘陵。这与盛和林研究结果大体相符^[22],但存在一定的差异,即在洞宫山为黑麂分布的第四个区域。

黑麂是中国特有种,目前预测仅存在浙闽赣皖四省。由于栖息地的破碎化和丧失、人为干扰以及气候变化,黑麂种群面临着灭绝的危险。因此,基于本研究的模型预测结果提出以下建议:(1)重点识别和建立各适宜生境之间的迁徙廊道。黑麂现有 4 个地理分布区域呈分隔状态,分布区内部也存在一定的水系或地理阻隔。如在洞宫山潜在分布区和括苍山潜在分布区,因水系阻隔,其为孤立的潜在分布区,且潜在分布区内部适生区呈破碎的斑块状,栖息于此的黑麂灭绝风险大。因此,要保护每个分布区域的高适生区,重点识别和建立各适宜生境之间的迁徙廊道,以加强不同分布区间的不同黑麂种群的基因交流。(2)加强对黑麂潜在分布区内的种群资源进行调查。黑麂分布区狭窄、适宜栖息地破碎化严重,例如千里岗地区为黑麂潜在高适生区,但未有黑麂种群资源相关的报道。应加强对黑麂潜在分布区内的种群资源进行调查,以充分了解其种群现状,为在浙闽赣皖四省进一步开展全面保护措施提供科学依据。(3)建立黑麂保护网络。黑麂高适生区内有存在诸多国家级自然保护区。马头山国家级自然保护区-江西武夷山国家级自然保护区-九龙山国家级自然保护区贯穿武夷山北段-仙霞岭形成一个野生动物生境廊道,有利于黑麂的浙赣潜在分布区种群的扩散和基因交流。但适生区不只存在于现有的自然保护区,在保护区周边、诸多林场也分布有黑麂的潜在适生区。因此,在黑麂适生区内的林业局、保护区管理局以及村委会之间应加强宣传,建立起黑麂保护网络。

参考文献(References):

- [1] 徐伟, 车静. 从隐存种到我国生物多样性保护研究: 现状与展望. 中国科学: 生命科学, 2019, 49(4): 519-530.
- [2] Maclean I M D, Wilson R J. Recent ecological responses to climate change support predictions of high extinction risk. PNAS, 2011, 108(30): 12337-12342.
- [3] Walther G R, Post E, Convey P, Menzel A, Parmesan C, Beebee T J C, Fromentin J M, Hoegh-Guldberg O, Bairlein F. Ecological responses to recent climate change. Nature, 2002, 416(6879): 389-395.
- [4] Freeman B G, Freeman A M C. Rapid upslope shifts in New Guinean birds illustrate strong distributional responses of tropical montane species to global warming. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(12): 4490-4494.
- [5] Colwell R K, Brehm G, Cardelus C L, Gilman A C, Longino J T. Global warming, elevational range shifts, and lowland biotic attrition in the wet tropics. Science, 2008, 322(5899): 258-261.
- [6] Şekerciöglu C H, Primack R B, Wormworth J. The effects of climate change on tropical birds. Biological Conservation, 2012, 148(1): 1-18.
- [7] La Sorte F A, Jetz W. Projected range contractions of montane biodiversity under global warming. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2010, 277(1699): 3401-3410.
- [8] McCain C M, Colwell R K. Assessing the threat to montane biodiversity from discordant shifts in temperature and precipitation in a changing climate. Ecology Letters, 2011, 14(12): 1236-1245.
- [9] Laurance W F, Useche D C, Shoo L P, Herzog S K, Kessler M, Escobar F, Brehm G, Axmacher J C, Chen I C, Gámez L A, Hietz P, Fiedler K, Pyrcz T, Wolf J, Merkord C L, Cardelus C, Marshall A R, Ah-Peng C, Aplet G H, del Coro Arizmendi M, Baker W J, Barone J, Brühl C A, Bussmann R W, Ciccuzza D, Eilu G, Favila M E, Hemp A, Hemp C, Homeier J, Hurtado J, Jankowski J, Kattún G, Kluge J, Krömer T, Lees D

- C, Lehnert M, Longino J T, Lovett J, Martin P H, Patterson B D, Pearson R G, Peh K S H, Richardson B, Richardson M, Samways M J, Senbeta F, Smith T B, Uteridge T M A, Watkins J E, Wilson R, Williams S E, Thomas C D. Global warming, elevational ranges and the vulnerability of tropical biota. *Biological Conservation*, 2011, 144(1): 548-557.
- [10] Sekercioglu C H, Schneider S H, Fay J P, Loarie S R. Climate change, elevational range shifts, and bird extinctions. *Conservation Biology*, 2008, 22(1): 140-150.
- [11] McCain C M. Vertebrate range sizes indicate that mountains may be 'higher' in the tropics. *Ecology Letters*, 2009, 12(6): 550-560.
- [12] 张履冰, 崔绍朋, 黄元骏, 陈代强, 乔慧捷, 李春旺, 蒋志刚. 红外相机技术在我国野生动物监测中的应用: 问题与限制. *生物多样性*, 2014, 22(6): 696-703.
- [13] 朱淑怡, 段菲, 李晟. 基于红外相机网络促进我国鸟类多样性监测: 现状、问题与前景. *生物多样性*, 2017, 25(10): 1114-1122.
- [14] 肖治术, 李欣海, 姜广顺. 红外相机技术在我国野生动物监测研究中的应用. *生物多样性*, 2014, 22(6): 683-684.
- [15] Urbani F, D'Alessandro P, Frasca R, Biondi M. Maximum entropy modeling of geographic distributions of the flea beetle species endemic in Italy (Coleoptera: Chrysomelidae: Galerucinae: Alticini). *Zoologischer Anzeiger-A Journal of Comparative Zoology*, 2015, 258: 99-109.
- [16] 罗玫, 王昊, 吕植. 使用大熊猫数据评估 Biomod2 和 MaxEnt 分布预测模型的表现. *应用生态学报*, 2017, 28(12): 4001-4006.
- [17] 崔绍朋, 罗晓, 李春旺, 胡慧建, 蒋志刚. 基于 MaxEnt 模型预测白唇鹿的潜在分布区. *生物多样性*, 2018, 26(2): 171-176.
- [18] 巫明焱, 何兰, 税丽, 董光, 程武学. 基于 MaxEnt 模型的藏雪鸡在中国适宜生境的研究. *生态科学*, 2018, 37(3): 176-183.
- [19] 丁晨晨, 胡一鸣, 李春旺, 蒋志刚. 印度野牛在中国的分布及其栖息地适宜性分析. *生物多样性*, 2018, 26(9): 951-961.
- [20] 唐书培, 穆丽光, 王晓玲, 张静, 刘波, 孟和达来, 鲍伟东. 基于 MaxEnt 模型的赛罕乌拉国家级自然保护区斑羚生境适宜性评价. *北京林业大学学报*, 2019, 41(1): 102-108.
- [21] 蒋志刚, 江建平, 王跃招, 张鸷, 张雁云, 李立立, 谢锋, 蔡波, 曹亮, 郑光美, 董路, 张正旺, 丁平, 罗振华, 丁长青, 马志军, 汤宋华, 曹文宣, 李春旺, 胡慧建, 马勇, 吴毅, 王应祥, 周开亚, 刘少英, 陈跃英, 李家堂, 冯祚建, 王燕, 王斌, 李成, 宋雪琳, 蔡蕾, 臧春鑫, 曾岩, 孟智斌, 方红霞, 平晓鸽. 中国脊椎动物红色名录. *生物多样性*, 2016, 24(5): 500-551.
- [22] 盛和林. 中国特产动物——黑鹿. *动物学杂志*, 1987, 22(2): 45-48.
- [23] 盛和林. 中国鹿科动物. *生物学通报*, 1992, (5): 4-7.
- [24] 盛和林, 吴天荣. 浙西山区的黑鹿、小鹿、毛冠鹿和梅花鹿资源. *野生动物*, 1981, (2): 33-34.
- [25] 郑祥, 鲍毅新, 葛宝明, 周元庆, 郑英茂, 华文礼. 九龙山自然保护区黑鹿的种群密度、分布与保护. *浙江师范大学学报: 自然科学版*, 2005, 28(3): 313-318.
- [26] 郑祥, 鲍毅新, 葛宝明, 郑荣泉. 古田山自然保护区黑鹿资源分布与保护现状. *自然资源学报*, 2005, 20(4): 508-513.
- [27] 郑祥, 鲍毅新, 葛宝明, 郑荣泉. 黑鹿栖息地利用的季节变化. *兽类学报*, 2006, 26(2): 201-205.
- [28] Bao Y X, Zheng X, Ge B M. Assessment and protective strategy of black muntjac habitat in Zhejiang, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2425-2431.
- [29] 陈良. 黑鹿栖息地特征和栖息地选择的季节变化[D]. 金华: 浙江师范大学, 2007.
- [30] 陈良, 鲍毅新, 张龙龙, 程宏毅, 张家银, 周元庆. 九龙山保护区黑鹿栖息地选择的季节变化. *生态学报*, 2010, 30(5): 1227-1237.
- [31] 欧善华, 盛和林, 陆厚基. 黑鹿和毛冠鹿的食性. *上海师范学院学报: 自然科学版*, 1981, (1): 111-115.
- [32] Zheng R Q, Bao Y X. Seasonal food habits of the black muntjac *Muntiacus crinifrons*. *Acta Zoologica Sinica*, 2007, 53(2): 201-207.
- [33] 盛和林, 陆厚基. 黑鹿(*Muntiacus crinifrons* Sclater)的繁殖. *兽类学报*, 1981, 1(1): 14-18.
- [34] 江福霖. 黑鹿的饲养和繁殖. *野生动物学报*, 1991, (5): 32-34, 42-42.
- [35] 江浩. 黑鹿人工饲养与繁殖研究. *安徽林业*, 2002, (4): 28-28.
- [36] 吴海龙, 江浩, 吴治安. 合肥野生动物园黑鹿的繁殖资料. *动物学杂志*, 2003, 38(2): 40-44.
- [37] 吴海龙. 黑鹿保护遗传学研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [38] 周襄武. 浙江九龙山保护区黑鹿种群遗传多样性的微卫星分析[D]. 金华: 浙江师范大学, 2008.
- [39] 程宏毅. 黑鹿不同地理种群间遗传多样性研究及栖息地片断化对种群基因流的影响[D]. 金华: 浙江师范大学, 2006.
- [40] 程宏毅, 鲍毅新, 陈良, 周襄武, 胡知渊, 葛宝明. 黑鹿皖-浙分布中心种群的遗传多样性. *动物学报*, 2008, 54(1): 96-103.
- [41] 王艳妮, 鲍毅新, 刘军, 林杰君, 张旭, 郑伟成, 潘成椿. 基于粪便 DNA 的九龙山黑鹿种群的遗传多样性. *兽类学报*, 2012, 32(2): 101-109.
- [42] 章书声, 郑方东, 李佳琦, 包其敏, 赖家厚, 程宏毅. 基于红外相机技术对乌岩岭国家级自然保护区地面鸟兽的初步调查. *生物多样性*, 2017, 25(4): 427-429.
- [43] 程樟峰, 郭瑞, 翁东明, 王军旺, 王旭池, 许丽娟. 基于红外相机陷阱技术的浙江清凉峰国家级自然保护区龙塘山区域鸟兽物种监测初报. *四川动物*, 2016, 35(5): 753-758.
- [44] 李佳, 刘芳, 叶立新, 刘胜龙, 彭辉, 李迪强. 利用红外相机调查浙江省凤阳山兽类和鸟类多样性. *兽类学报*, 2018, 38(1): 95-103.

- [45] 斯幸峰, 丁平. 古田山森林动态监测样地内鸟兽种群动态的红外相机监测. 生物多样性, 2014, 22(6): 819-822.
- [46] 陈声文, 余建平, 陈小南, 申小莉, 李晟, 马克平. 利用红外相机网络调查古田山自然保护区的兽类及雉类多样性. 兽类学报, 2016, 36(3): 292-301.
- [47] 郑伟成, 章书声, 潘成椿, 刘菊莲, 季国华. 红外相机技术监测九龙山国家级自然保护区鸟兽多样性. 浙江林业科技, 2014, 34(1): 17-22.
- [48] 薛辉, 李永民, 吴孝兵, 顾长明, 陈文豪, 吴建中. 红外感应相机在牦牛降国家级自然保护区雉类和兽类调查中的应用. 安徽林业科技, 2013, 39(2): 36-38.
- [49] 李必成, 王军馥, 方国富, 何娅, 王正寰, 丁由中, 杨刚. 安徽清凉峰国家级自然保护区鸟兽生物多样性调查. 安徽农业科学, 2017, 45(36): 83-84, 107-107.
- [50] 汪长根, 曹新华, 曹清平, 晏龙, 吴孝兵. 运用红外感应相机技术监测脊椎动物多样性——以安徽省九龙岗省级自然保护区为例. 安徽林业科技, 2015, 41(3): 5-8.
- [51] 程松林, 邹思成, 袁荣斌. 江西武夷山国家级自然保护区黑麂及其生境调查初报. 江西科学, 2012, 30(5): 594-598.
- [52] 余建平, 申云逸, 宋小友, 陈小南, 李晟, 申小莉. 钱江源国家公园体制试点区功能分区对黑麂保护的有效性评估. 生物多样性, 2019, 27(1): 5-12.
- [53] 徐文辉, 岳晓雷, 高鹏, 夏淑娟. 天目山国家级自然保护区黑麂潜在栖息地的生态适宜性. 浙江农林大学学报, 2013, 30(6): 896-903.
- [54] 雷军成, 王莎, 王军围, 吴军. 未来气候变化对我国特有濒危动物黑麂适宜生境的潜在影响. 生物多样性, 2016, 24(12): 1390-1399.
- [55] 唐隆校, 潘建华, 赖根伟. 施肥与间伐对杉木大径材培育的影响分析. 华东森林经理, 2016, 30(3): 29-32.
- [56] 诸葛阳. 浙江动物志: 兽类. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1990.
- [57] Michalski F, Peres C A. Disturbance-mediated mammal persistence and abundance-area relationships in Amazonian forest fragments. Conservation Biology, 2007, 21(6): 1626-1640.
- [58] 薛亚东, 刘芳, 郭铁征, 袁磊, 李迪强. 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, 2014, 34(2): 164-171.
- [59] 李晟, 王大军, 卜红亮, 刘小庚, 靳彤. 四川省老河沟自然保护区兽类多样性红外相机调查. 兽类学报, 2016, 36(3): 282-291.
- [60] 宛新荣, 刘伟, 王广和, 王梦军, 钟文勤. 典型草原区布氏田鼠的活动节律及其季节变化. 兽类学报, 2006, 26(3): 226-234.
- [61] 唐卓, 杨建, 刘雪华, 王鹏彦, 李周园. 基于红外相机技术对四川卧龙国家级自然保护区雪豹 (*Panthera uncia*) 的研究. 生物多样性, 2017, 25(1): 62-70.
- [62] Welbourne D J, Claridge A W, Paull D J, Lambert A. How do passive infrared triggered camera traps operate and why does it matter? Breaking down common misconceptions. Remote Sensing in Ecology and Conservation, 2016, 2(2): 77-83.
- [63] 王茹琳, 李庆, 封传红, 石朝鹏. 基于 MaxEnt 的西藏飞蝗在中国的适生区预测. 生态学报, 2017, 37(24): 8556-8566.
- [64] Yang X Q, Kushwaha S P S, Saran S, Xu J C, Roy P S. MaxEnt modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. Ecological Engineering, 2013, 51: 83-87.
- [65] Behdarvand N, Kaboli M, Ahmadi M, Nourani E, Salman Mahini A, Asadi Aghbolaghi M. Spatial risk model and mitigation implications for wolf-human conflict in a highly modified agroecosystem in western Iran. Biological Conservation, 2014, 177: 156-164.
- [66] 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 肖启明, 戴良英. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用. 生物多样性, 2007, 15(4): 365-372.
- [67] Araújo M B, Pearson R G, Thuiller W, Erhard M. Validation of species-climate impact models under climate change. Global Change Biology, 2005, 11(9): 1504-1513.
- [68] 夏参军, 徐文轩, 杨维康, 乔建芳, 刘伟. 不同季节鹅喉羚昼间活动节律特征. 干旱区研究, 2011, 28(3): 548-548.
- [69] 孙明月, 杨明. 冬眠哺乳动物的体温调节. 沈阳师范大学学报: 自然科学版, 2012, 30(1): 102-106.
- [70] 杨明, 王德华. 哺乳动物的蛰眠: 类型、物种分布与模式. 兽类学报, 2011, 31(2): 195-204.
- [71] 鲍毅新, 杜卫国, 林治, 胡柏驿, 池帮荣, 陈孝端. 环境温度对社鼠能量需求和食物同化的影响. 动物学报, 2001, 47(5): 597-600.
- [72] 章书声, 鲍毅新, 王艳妮, 方平福, 叶彬. 基于红外相机技术的黑麂活动节律. 兽类学报, 2012, 32(4): 368-372.
- [73] 原宝东, 孔繁繁. 哺乳动物活动节律研究进展. 安徽农业科学, 2011, 39(2): 1056-1058, 1162-1162.
- [74] Clutton-Brock T H, Coulson T N, Milner-Gulland E J, Thomson D, Armstrong H M. Sex differences in emigration and mortality affect optimal management of deer populations. Nature, 2002, 415(6872): 633-637.
- [75] Sinclair A R E. The African Buffalo: A Study of Resource Limitation of Populations. Chicago: University of Chicago Press, 1977.
- [76] Estes R D, Estes R K. The birth and survival of wildebeest calves. Zeitschrift Für Tierpsychologie, 1979, 50(1): 45-95.
- [77] Althoff D P, Storm G L, Dewalle S D R. Daytime habitat selection by cottontails in central Pennsylvania. The Journal of Wildlife Management, 1997, 61(2): 450-459.
- [78] Fahrig L. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2003, 34: 487-515.
- [79] Pearce J L, Boyce M S. Modelling distribution and abundance with presence-only data. Journal of Applied Ecology, 2006, 43(3): 405-412.