

DOI: 10.5846/stxb202111153205

胡娟, 谢培根, 梅祎芸, 郭瑞, 宋琥, 李婷婷, 徐爱春. 浙江清凉峰国家级自然保护区黑鹿和小鹿潜在适宜栖息地预测及重叠性分析. 生态学报, 2023, 43(6): 2210-2219.

Hu J, Xie P G, Mei Y Y, Guo R, Song X, Li T T, Xu A C. Potential suitable habitats prediction and overlap analysis of black muntjac (*Muntiacus crinifrons*) and small muntjac (*M. reevesi*) in Qingliangfeng National Nature Reserve, Zhejiang Province. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(6): 2210-2219.

浙江清凉峰国家级自然保护区黑鹿和小鹿潜在适宜栖息地预测及重叠性分析

胡娟¹, 谢培根¹, 梅祎芸², 郭瑞³, 宋琥¹, 李婷婷¹, 徐爱春^{1,*}

¹ 中国计量大学生命科学学院, 杭州 310018

² 浙江自然博物院, 杭州 310014

³ 浙江清凉峰国家级自然保护区管理局, 杭州 311300

摘要:对保护区内的关键种开展保护工作时,其同域分布相似种的保护研究也具有重要价值。较大地理尺度上看,黑鹿的分布区被小鹿完全覆盖,如能掌握二者适宜栖息地的重叠状况,揭示其共存机制,将有助于保护策略的制定和整合管理。2017—2020年在浙江清凉峰国家级自然保护区利用红外相机技术分别获得黑鹿和小鹿的分布位点 38 个和 101 个,结合 8 个环境因子,采用 MaxEnt 模型对研究区域内黑鹿和小鹿的潜在适宜栖息地进行了预测和重叠性分析。结果表明:(1)黑鹿和小鹿潜在适宜栖息地主要位于龙塘山区域西南部,千顷塘区域中部和顺溪坞区域西北部,以及千顷塘区域与龙塘山区域间的山脉和顺溪坞南部山区,二者的潜在适宜栖息地面积分别为 586.66 km²和 661.93 km²,分别占研究区域的 36.67%和 41.37%。(2)黑鹿和小鹿的生态重叠指数较高,其 D 值和 I 值分别为 0.82 和 0.97,它们的总适宜栖息地重叠面积为 435.39 km²,分别占黑鹿和小鹿总适宜栖息地面积的 72.22%、65.78%。(3)黑鹿和小鹿对环境因子的选择相似,黑鹿主要选择海拔较高、离水源较近、离居民点和公路较远的针阔混交林或阔叶林,小鹿则主要偏好选择海拔较高、靠近公路、远离居民点、距水源 500 m 范围的针阔混交林。建议增加浙江清凉峰国家级自然保护区各区域间生态廊道的建立并加强黑鹿和小鹿分布的进一步调查研究。

关键词:生态位;最大熵模型;红外相机;鹿属动物;潜在适宜栖息地

Potential suitable habitats prediction and overlap analysis of black muntjac (*Muntiacus crinifrons*) and small muntjac (*M. reevesi*) in Qingliangfeng National Nature Reserve, Zhejiang Province

HU Juan¹, XIE Peigen¹, MEI Yiyun², GUO Rui³, SONG Xiao¹, LI Tingting¹, XU Aichun^{1,*}

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

² Zhejiang Museum of Natural History, Hangzhou 310014, China

³ Administrative Bureau of Zhejiang Qingliangfeng National Nature Reserve, Hangzhou 311300, China

Abstract: When carrying out conservation on key species in the protected areas, research on the conservation of similar species with their sympatric distribution is also of great value. On a larger geographical scale, the distribution area of black muntjac is completely covered by small muntjac. If we can grasp the overlapping status of the suitable habitats of them and reveal their coexistence mechanism, it will help to formulate conservation strategies and integrate management. From 2017 to 2020, the infrared camera technology was used to obtain 38 and 101 distribution sites of black muntjac and small muntjac,

基金项目:浙江省珍稀濒危野生动植物抢救保护工程(2021—2025);国家自然科学基金(32101405)

收稿日期:2021-11-15; 网络出版日期:2022-11-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: springlover@cjlu.edu.cn

respectively, in Qingliangfeng National Nature Reserve, Zhejiang Province. Combined with 8 environmental factors, the MaxEnt model was used to predict the potential suitable habitats and analyze their overlap of black muntjac and small muntjac in the study area. The results show that: (1) the potentially suitable habitats for the black muntjac and small muntjac are mainly located in the southwest of Longtangshan area, the middle of Qianqingtang area and the northwest of Shunxiwu area, the mountains between Qianqingtang protection area and Longtangshan protection area, and the southern mountainous area of Shunxiwu. The total potentially suitable habitat areas are 586.66 km² and 661.93 km², and accounting for 36.67% and 41.37% of the study area, respectively. (2) The ecological overlap index of black muntjac and small muntjac is relatively high, the D value and I value are 0.82 and 0.97, respectively. Their total suitable habitat overlap area is 435.39 km², accounting for 74.22% and 65.78% of the total suitable habitat area for the black muntjac and small muntjac, respectively. (3) The selection of environmental factors between black muntjac and small muntjac is similar. Black muntjac mainly chooses the mixed coniferous and broad-leaved forests or broad-leaved forests with higher altitude, closer to water sources, and far away from settlements and roads, while small muntjac mainly prefers to select a mixed forest of coniferous and broadleaf forests with higher altitude, close to roads, far away from residential areas, and 500 m away from water sources. It is suggested to increase the establishment of ecological corridors among the various regions of Zhejiang Qingliangfeng National Nature Reserve and to strengthen further investigation and research on the distribution of black muntjac and small muntjac.

Key Words: niche; MaxEnt model; camera-trapping; muntjac; potential suitable habitat

围绕自然保护地的关键种野生动物开展保护工作时,其同域分布的物种也应受到关注^[1-3],这些物种常通过捕食、竞争等种间相互作用对关键种的种群数量和时空分布产生限制^[4-6],因此仅对关键种进行研究有时并不足以对自然保护地内的生物多样性进行有效保护。竞争排斥原理表明两个以上同域生活的相似物种必然要通过在栖息地、食性或活动节律方面形成生态位差异,才能实现稳定共存^[7],而栖息地选择的差异常被认为是同域物种共存的主要机制^[8]。因此研究同一区域内相关物种的栖息地适宜状况,分析其重叠程度,可为关键种及相关种的保护和管理提供科学依据。

黑麂(*Muntiacus crinifrons*)和小麂(*M. reevesi*)是我国特有种,均属偶蹄目鹿科麂属。黑麂为国家I级重点保护野生动物,仅狭域分布于浙江、安徽、江西、福建四省^[9],也是该地区自然保护区主要保护的关键种之一。目前,在清凉峰、古田山、九龙山、钱江源等保护区内已有大量关于黑麂栖息地选择的研究,发现黑麂主要栖息于中高海拔、距水源较近的阔叶林或针阔混交林,且在不同季节间存在差异^[10-12]。小麂和黑麂为近缘物种^[13],广泛分布于我国亚热带地区和西南山区,偏好于选择中低海拔地区,郁闭度较高的植被类型^[14-16]。戚伟尧等从时空生态位分化的角度探讨了黑麂和小麂的共存机制^[17],但小麂对黑麂的栖息地是否存在挤压和竞争的具体情况,仍缺乏报道。如能掌握二者的重叠情况,有助于揭示二者种间关系和生态位分化机制。

近年来,“3S”技术结合物种分布模型被广泛应用于野生动物的栖息地适宜性评价,Dong等^[18]将“3S”技术与占域模型相结合研究了小熊猫在邛崃、大香岭、小香岭和凉山的栖息地分布并评估了潜在廊道的有效性,Quevedo等^[19]则将“3S”技术与MaxEnt模型相结合评估了智利马驼鹿在Valdivian生态区的潜在分布。物种分布模型可根据构建模型时物种的“出现点”和“非出现点”数据的需求差异分为机理模型、回归模型、生态位模型三种,其中机理模型存在依赖于专家经验难以验证的缺陷,而回归模型中“非出现点”可靠性也常难以保证^[20]。近年来,基于最大熵理论发展起来的MaxEnt生态位模型,被广泛应用于预测物种分布研究。该模型仅需物种“出现点”和研究区域的相关环境信息,就能较好预测物种分布,如龚旭等^[21]采用该方法对四川鞍子河内同域分布的水鹿和羚牛的栖息地进行适宜性评价和重叠性分析,Paul等^[22]则研究了印度北部特有的北方沼泽鹿的分布及主要保护区域。

本研究利用红外相机技术获取浙江清凉峰国家级自然保护区龙塘山区域和千顷塘区域黑麂和小麂的实

际活动影像,确定其分布位点,结合地形、植被、水源和干扰距离等信息,通过最大熵模型对黑麂和小麂在浙江清凉峰国家级自然保护区内的潜在栖息地进行适宜性评价,以期了解二者的栖息地重叠情况,揭示其种间关系,科学开展保护工作。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本研究选取浙江清凉峰国家级自然保护区(以下简称清凉峰保护区)及其周边 40 km×40 km 范围为研究区域(图 1),地理坐标为东经 118°50′25″—119°14′35″,北纬 29°59′25″—30°21′5″。清凉峰保护区主要由龙塘山森林生态系统保护区、千顷塘野生梅花鹿保护区、顺溪坞珍稀濒危植物保护区三部分组成,总面积 112.52 km²。具有明显的亚热带中山山地季风气候特征,年平均气温为 15.3—7.8℃,最热月为 7 月,最冷月为 1 月,全年降水量 1 500—1 900 mm,相对湿度 78%—82%。植被类型多样,低海拔区域以常绿阔叶林和常绿落叶阔叶混交林为主,高海拔区域以针阔混交林为主,区域分布有黑麂、华南梅花鹿(*Cervus pseudaxis*)、白颈长尾雉(*Syrmaticus ellioti*)等国家 I 级重点保护野生动物^[23—24]。

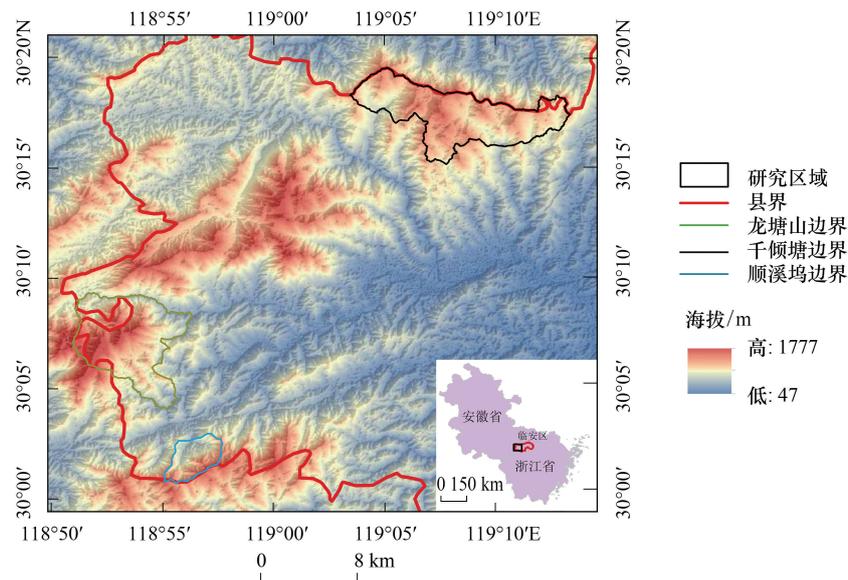


图 1 研究区域

Fig.1 Study area and infrared camera monitoring site

1.2 研究方法

1.2.1 物种分布数据来源

浙江清凉峰国家级自然保护区龙塘山区域和千顷塘区域是黑麂和小麂分布的主要区域。于 2017 年 12 月至 2020 年 4 月,采用公里网格法^[25—27]在龙塘山和千顷塘区域布放红外相机,对黑麂和小麂的分布进行监测。按 1 km×1 km 网格划分两区域,在单元格中心点 50 m×50 m 范围内,根据可达性布放红外相机。在龙塘山区域布放红外相机 52 台,千顷塘区域布放 58 台,合计 110 台,根据红外相机数据得到龙塘山区域黑麂分布位点 38 个,小麂分布位点 52 个,千顷塘区域有小麂分布位点 49 个(图 2)。相机采用猎科 Ltl-6210,捆绑高度 60—80 cm,拍摄参数设置为连拍张数 2 张,拍摄间隔 5 s,灵敏度适中。布设过程中记录相机位点经纬度、海拔、坡度、坡向、距水源距离等生境信息。监测期间,每隔 3—5 个月检查并更换电池和内存卡。

1.2.2 环境变量数据

相关研究表明,地形、水源、干扰和植被是影响黑麂和小麂栖息地选择的主要生态因子^[28—29]。因此,本研

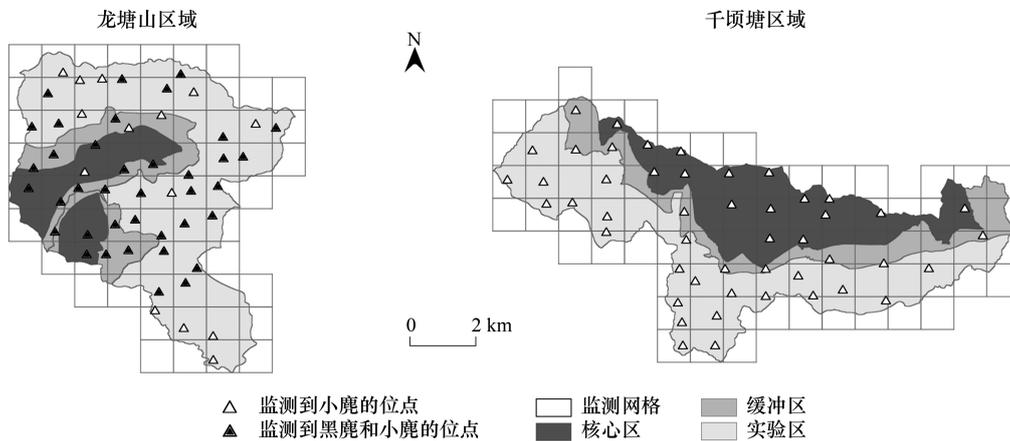


图2 龙塘山区域和千顷塘区域监测到黑鹿和小鹿的位点

Fig.2 The monitored sites of black muntjac and small muntjac in Longtang Mountain area and Qianqingtang area

究选取地形、水源、干扰距离以及植被等信息,对研究区内黑鹿和小鹿的适宜性栖息地进行评价。地形因子包括海拔、坡度、坡向,通过中国科学院科学数据库(<http://www.Gscloudcn/>)下载的30 m分辨率的数字高程数据(DEM)计算提取获得。在中国科学院科学数据库下载2019年10月31日的Landsat 8遥感影像,在ENVI 5.3中采用最大似然法对研究区域的遥感影像进行监督分类,分为阔叶林、针阔混交林、针叶林、农田、竹林、草甸和水面,经验证,解译精度达到90%以上,并通过遥感影像计算归一化植被指数(NDVI)。通过全国地理信息资源目录服务系统(<http://www.webmap.cn/>)下载水系、村庄和道路交通的矢量数据(1:25万),通过ArcGIS 10.7空间分析工具提取欧几里得距离获得水源和干扰因子(居民点和道路)距离。以ArcGIS 10.7为平台,将所有环境变量图层统一成相同边界、WGS_1984_UTM_Zone_50N坐标系和30 m×30 m的图层,最后转化为MaxEnt模型软件能够识别的ASC II文件格式。

1.3 数据分析

1.3.1 MaxEnt模型构建

模型构建过程中,随机选取25%的黑鹿和小鹿分布点作为测试集,其余75%分布点作为训练集。选取自举法(Bootstrap)为重复运行类别,重复数设为10,默认模型其他参数设置,绘制每个环境因子的响应曲线检验环境因子与物种分布的相关关系,利用Jackknif法检验环境因子对黑鹿和小鹿分布的重要性和贡献率,结果以logistic格式输出。利用ROC曲线(受试者工作特征曲线)下面积(AUC值)评估模型预测效果,AUC值范围在0—1之间,0.5—0.6为失败,0.6—0.7为差,0.7—0.8为一般,0.8—0.9为良好,0.9—1为优秀^[30]。

通过模型运算得到研究区域的栖息地适宜指数(habitat suitability index, HIS),采用训练敏感性和特异性加和最大法(Maximum training sensitivity plus specificity, MTSS)以及平衡训练遗漏率、预测面积及阈值(Balance training omission, predicted area and threshold value, BTPT)分别作为适宜栖息地和次适宜栖息地的分类阈值将研究区域内黑鹿和小鹿的潜在栖息地质量重分类为适宜栖息地、次适宜栖息地和不适宜栖息地3个等级^[31]。

1.3.2 空间生态位重叠分析

采用ENMTools软件通过MaxEnt模型预测的黑鹿和小鹿的潜在适宜性栖息地预测数据计算Schoener' D(D)和Hellinger's-based I(I)值表示二者的生态位重叠度,D值和I值的取值范围在0—1之间,值越接近1,两物种的空间生态位分布越相似^[32-34]。

并通过ArcGIS 10.7确定两物种的同域分布区,首先将黑鹿和小鹿的预测图层重分类为不适宜栖息地、次适宜栖息地、适宜栖息地三种栖息地类型,并赋予新的像元值,将黑鹿栖息地栅格图层中不适宜栖息地的像

元赋值为“1”,次适宜栖息地的像元值为“2”,适宜栖息地的像元值为“3”,小鹿栖息地栅格图层中不适宜栖息地的像元值为“4”,次适宜栖息地的像元值为“5”,适宜栖息地的像元值为“6”。之后通过 ArcGIS 10.7 的栅格计算功能将已重分类的黑鹿和小鹿的栅格数据进行“乘”运算,从而得到不同质量栖息地的重叠栅格数据,其中像元栅格值为“4”的表示两个物种都不适宜的栖息地,像元栅格值为“5”的表示仅适于小鹿的次适宜栖息地,像元栅格值为“6”的表示仅适于小鹿的适宜栖息地,像元栅格值为“8”的表示仅适于黑鹿的次适宜栖息地,像元栅格值为“10”的表示二者共同的次适宜栖息地,像元值为“18”的表示二者共同的适宜栖息地^[35]。

2 结果

2.1 MaxEnt 模型预测精度

ROC 曲线评价结果表明,黑鹿潜在适宜栖息地预测模型的 AUC 值为 0.957(± 0.012) (图 3),小鹿潜在适宜栖息地预测模型的 AUC 值为 0.921(± 0.010) (图 3),表明 MaxEnt 模型对研究区域内黑鹿和小鹿的潜在适宜栖息地预测均达到优秀水平。

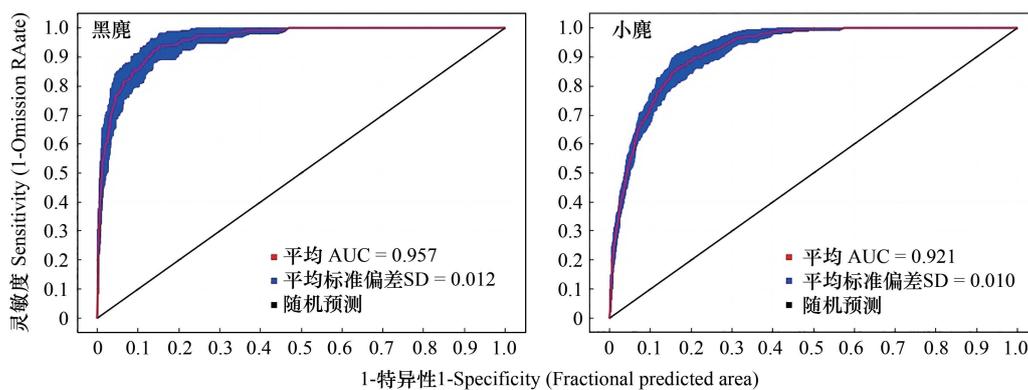


图 3 MaxEnt 模型预测的黑鹿和小鹿的 ROC 曲线

Fig.3 The ROC curves of black muntjac and small muntjac predicted by MaxEnt model

2.2 栖息地质量及重叠情况

根据 MaxEnt 模型得到黑鹿的 MTSS 和 BTPT 值分别为 0.221 和 0.048,小鹿的 MTSS 和 BTPT 值分别为 0.271 和 0.065。因此,黑鹿适宜栖息地、次适宜栖息地、不适宜栖息地的阈值分别为: $HIS \geq 0.221$ 、 $0.221 > HIS > 0.048$ 、 $HIS \leq 0.048$;小鹿适宜栖息地、次适宜栖息地、不适宜栖息地的阈值分别为: $HIS \geq 0.271$ 、 $0.271 > HIS > 0.065$ 、 $HIS \leq 0.065$ 。采用上述阈值对黑鹿和小鹿的潜在栖息地进行重分类,最终得到二者在研究区域的适宜性分布图。

MaxEnt 模型预测结果显示,研究区域内黑鹿的适宜栖息地、次适宜栖息地、不适宜栖息地面积分别为 180.73 km²、405.93 km²、1013.34 km²,分别占总面积的 11.30%、25.37%、63.33%(图 4 和表 1)。小鹿的适宜栖息地、次适宜栖息地、不适宜栖息地面积分别为 262.06 km²、399.87 km²、938.07 km²,分别占总面积的 16.38%、24.99%、58.63%(图 4 和表 1)。

ENMTools 软件计算得到生态位重叠指数 D 和 I 值分别为 0.82 和 0.97,表明清凉峰保护区内黑鹿和小鹿的空间生态位高度重叠。两物种适宜、次适宜栖息地重叠面积总和为 435.39 km²,分别占它们总适宜栖息地面积的 74.22%和 65.78%(表 2 和图 5)。其中,黑鹿和小鹿在浙江清凉峰国家级自然保护区内的重叠面积表现为龙塘山区域内最高,千顷塘次之,顺溪坞最低(表 3)。

2.3 栖息地选择与环境因子相关性

Jackknife 检验结果表明,各环境因子对黑鹿和小鹿的影响相似(表 4)。影响清凉峰保护区内黑鹿分布的主要环境因子有海拔(54.5%)、距居民点距离(13.2%)、距水源距离(10.7%)、植被类型(9.1%)、距道路距离

(6.6%),这些环境因子对黑鹿 MaxEnt 模型的累计贡献率达到 94.1%。影响清凉峰保护区内小鹿分布的主要环境因子为海拔(58.7%)、距居民点距离(9.7%)、距水源距离(9.4%)、距道路距离(8.1%)、植被类型(6.2%),对小鹿 MaxEnt 模型的累计贡献率达到 92.1%。坡度、坡向和 NDVI 对黑鹿和小鹿分布的影响都较小。

表 1 研究区域内黑鹿和小鹿不同质量栖息地及其重叠面积

Table 1 Different habitats and overlapping areas of black muntjac and small muntjac in the study area

栖息地质量等级 Habitat quality grade	黑鹿 <i>Muntiacus crinifrons</i>		小鹿 <i>Muntiacus reevesi</i>	
	面积 Area/km ²	百分比 Percentage /%	面积 Area/km ²	百分比 Percentage /%
适宜栖息地 Suitable habitat	180.73	11.30	262.06	16.38
次适宜栖息地 Suboptimal habitat	405.93	25.37	399.87	24.99
不适宜栖息地 unsuitable habitat	1013.34	63.33	938.07	58.63

表 2 黑鹿和小鹿潜在适宜栖息地重叠面积及比例

Table 2 The overlapping area and proportion of potential suitable habitats for black muntjac and small muntjac

栖息地质量等级 Habitat quality grade	重叠栖息地面积 Overlap habitate area/km ²	占黑鹿总适宜栖息地面积比例	占小鹿总适宜栖息地面积比例
		Proportion of total suitable habitat area for black muntjac /%	Proportion of total suitable habitat area for small muntjac /%
适宜栖息地 Suitable habitat	161.36	27.51	24.38
次适宜栖息地 Suboptimal habitat	274.03	46.71	41.40
总计 Total	435.39	74.22	65.78

总适宜栖息地面积包含适宜栖息地、次适宜栖息地面积

表 3 清凉峰各保护区黑鹿和小鹿适宜栖息地及重叠面积

Table 3 Suitable habitats and overlapping areas of black muntjac and small muntjac in each protection area of Qingliangfeng

保护区 Protected area	黑鹿总适宜栖息地面积 Total suitable habitat area for black muntjac/km ²	小鹿总适宜栖息地面积 Total suitable habitat area for small muntjac/km ²	重叠栖息地 Overlap habitat		
			面积 Area/km ²	占黑鹿总适宜栖息地面积比例 Proportion of total suitable habitat area for black muntjac /%	占小鹿总适宜栖息地面积比例 Proportion of total suitable habitat area for small muntjac /%
龙塘山区域 Longtangshan area	38.76	39.50	33.48	86.38	84.76
千顷塘区域 Qianqingtang area	54.60	56.60	35.11	64.30	62.03
顺溪坞区域 Shunxiwu area	5.67	4.40	3.25	57.32	73.86

总适宜栖息地面积包含适宜栖息地和次适宜栖息地面积

表 4 环境变量的贡献率/%

Table 4 Contribution rate of environmental variables

变量 Variable	贡献率 Contribution rate/%	
	黑鹿 <i>Muntiacus crinifrons</i>	小鹿 <i>Muntiacus reevesi</i>
高程 Elevation	54.5	58.7
坡度 Slope	0.8	3.8
坡向 Aspect	3.1	2.9
距水源距离 Distance to river	10.7	9.4
距道路距离 Distance to roads	6.6	8.1
距居民点距离 Distance to residential location	13.2	9.7
植被类型 Vegetation type	9.1	6.2
归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index	2.1	1.2

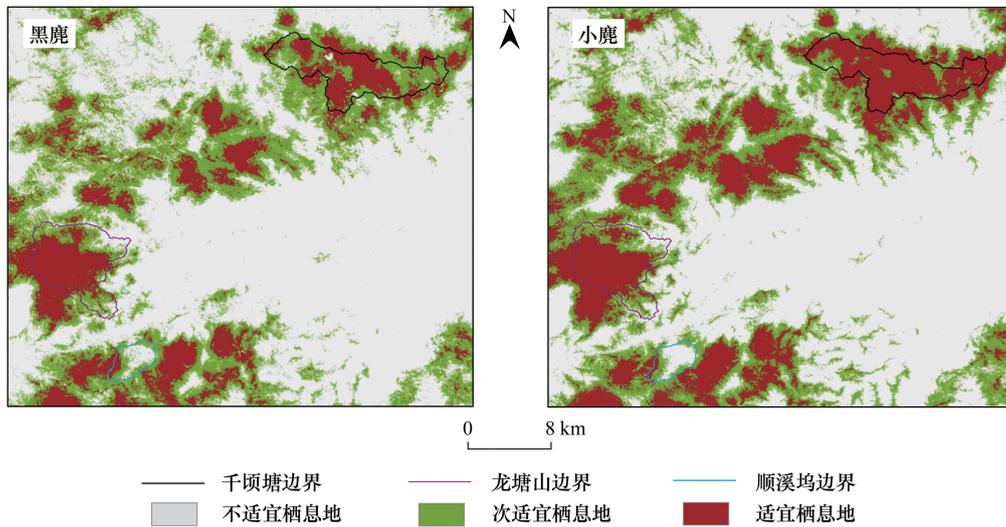


图 4 研究区域内黑鹿与小鹿的适宜栖息地分布

Fig.4 Suitable habitat distribution of black muntjac and small muntjac in the study area

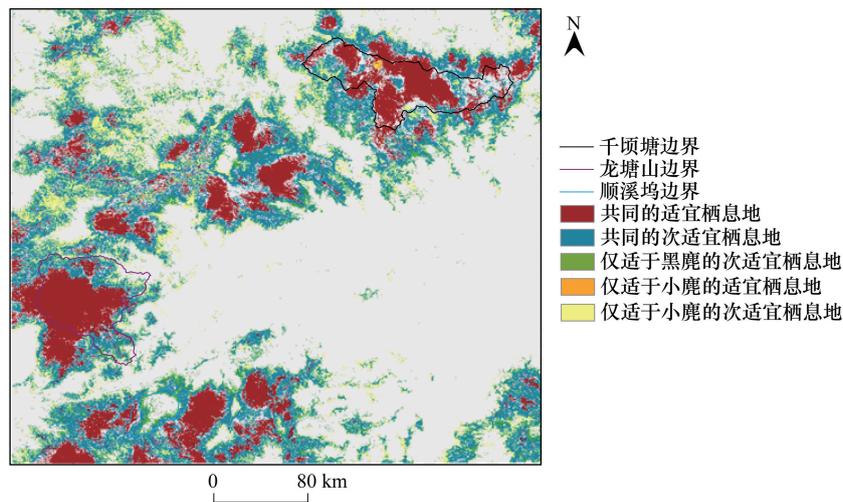


图 5 研究区域内黑鹿和小鹿适宜栖息地重叠分布图

Fig.5 Overlapping distribution map of suitable habitats for black muntjac and small muntjac in the study area

3 讨论

3.1 潜在栖息地及重叠分析

MaxEnt 模型预测结果表明,黑鹿和小鹿主要分布在龙塘山区域西南部、千顷塘区域中部和顺溪坞区域西北部,在千顷塘区域与龙塘山区域之间的山脉和顺溪坞南部山区有部分潜在栖息地分散分布,但在东南部没有它们的潜在栖息地分布,这与东南部为居民主要生活区域有关。模型预测发现黑鹿和小鹿的栖息地呈现破碎化分布,其中龙塘山区域和千顷塘区域都具有适于黑鹿和小鹿栖息的场所,但红外相机仅在龙塘山区域监测到了黑鹿的出现。龙塘山、千顷塘和顺溪坞区域同属于天目山山脉,但又是三个相互独立的保护区域。龙塘山区域与千顷塘区域间存在阳光村、东塔村、桥川村等多个居民点,与顺溪坞区域之间有杭瑞高速及较大面积居民点,这些区域人口密度高,使得黑鹿种群难以扩大其栖息地面积,也加大了与天目山保护区内黑鹿种

群进行基因交流的难度,长期的近亲繁殖会导致黑鹿的种群衰退。小鹿的分布较黑鹿更为广泛,其在龙塘山区域和千顷塘区域都有分布,而由于各区域间的干扰程度较高,使得两个区域内小鹿种群的基因交流存在较大的障碍。

本研究发现黑鹿与小鹿的潜在栖息地高度重叠,且黑鹿的总适宜栖息地的分布基本包含于小鹿的总适宜栖息地区域,仅有少部分栖息地不与小鹿的栖息地重叠。龚旭等^[21]与和梅香等^[35]的研究也表明相似种之间的适宜栖息地重叠程度较高。栖息地选择的差异是同域物种能够共存的首要原因^[8],物种常选择最能满足自身生存的栖息地,食物丰富度、水源、隐蔽条件等常是影响野生动物栖息地选择的主要原因^[28]。

3.2 栖息地选择的关键因子

研究表明,海拔是影响黑鹿和小鹿栖息地选择的主要环境因子,也是所有环境因子中对二者栖息地选择影响最大的。黑鹿和小鹿对海拔的选择具有相似之处,它们的分布均随海拔的增加而增加,但黑鹿主要栖息于>1300 m 的海拔范围内,小鹿的分布范围更为广泛,主要选择在>800 m 海拔范围,这与陈智强等^[36]和邹启先等^[37]的研究相似,即黑鹿主要栖息在高海拔地区,小鹿则偏好于中高海拔。且在全球气候变暖的背景下,二者的分布也呈现向高海拔地区移动^[38]。同时清凉峰保护区周边社区呈典型的山地社区经济特征,刘周等^[39]研究表明在千顷塘区域常存在人类干扰、家畜干扰、家犬干扰,其中发现家畜干扰存在与中高海拔、中低海拔和谷地。这使得黑鹿和小鹿的取食地面积缩小,为获取更高质量的食物而往高海拔地区迁移。

水源和干扰因子对黑鹿和小鹿栖息地的选择也具有重要影响。黑鹿的分布在 150 m 范围内先随水源距离的增加而减少,在 150—500 m 范围内略有回升,500 m 之后随水源距离的增加而减少;小鹿则主要分布在距水源 500 m 范围内。在水源附近常具有较高的食物丰富度,黑鹿体型较大,需要补充更多的食物和水分,因此常选择在水源附近活动。而水源附近常具有较高的物种竞争,这可能也是黑鹿在 150 m 范围内呈降低趋势的原因。小鹿体型小,通过食物本身所含水分和露水即可满足自身需求^[40—41],虽也主要选择在距水源距离较近的区域内活动,但对水源距离选择性相对较弱。黑鹿和小鹿的分布都随距居民点距离增加而增加,并在 3.5 km 处达到最高,这与鹿属动物胆小机警、常选择远离人类干扰强烈区域(如村庄)的习性相一致。二者对道路距离的选择存在一定的差异,黑鹿的分布在距道路距离 750 m 处达到最高,而小鹿的分布则随道路距离的增加而减少。黑鹿体型大,警戒距离远,因此通常在距道路较远处活动,而小鹿并没有强烈的规避道路的行为,这与袁智文等^[42]研究发现的千顷塘周围区域内华南梅花鹿对道路距离的选择一致,因为道路两边开阔且具有较高的食物丰富度。

黑鹿和小鹿对植被类型的选择也具有相似之处,黑鹿主要选择针阔混交林和阔叶林,小鹿则主要选择针阔混交林,针阔混交林郁闭度较低,有利于林下小生境的积温^[43],能为二者提供一定的热量,同时也有利于它们发现危险源并及时躲避,这两类林相还可以为二者提供充足的食物和活动空间,阔叶林也能为黑鹿提供一定的隐蔽条件^[10]。

根据上述模型结果发现黑鹿和小鹿对不同环境因子的选择具有相似性和差异性,这些差异可能是使同域分布的具有较大重叠面积的黑鹿和小鹿能够相互适应、长期共存的主要原因之一^[35]。

3.3 物种保护建议

本研究通过最大熵模型明确了二者的潜在适宜栖息地分布、重叠情况以及不同环境因子对黑鹿和小鹿分布的影响,因此对今后的保护管理和监测规划提出以下建议:第一、各保护区域间的山脉均存在黑鹿和小鹿的潜在栖息地,表明二者的保护仍存在较大空缺,因此建议扩大清凉峰保护区范围,将龙塘山区域和千顷塘区域的中间山脉扩为保护区范围,增强保护区的连通性,加强对其中野生动物的保护;同时扩大对黑鹿和小鹿的监测范围,针对二者可能分布的区域建议增加红外相机监测或样线调查,以此了解二者的分布情况及活动模式,同时对它们进行整合管理。第二、研究结果(图 4)显示,适宜栖息地被分隔为数个“生境岛屿”,这可能影响了黑鹿的扩散,因此,建议建立生态廊道,使黑鹿能够迁移到潜在适宜栖息地,从而扩大种群数量和分布范围,以及增加不同种群间的基因交流。第三、黑鹿和小鹿栖息地重叠程度较高,可能存在较强的种间作用,因此,

建议加强对它们的整合管理和保护。

参考文献 (References):

- [1] Wu W, Li Y H, Hu Y M. Simulation of potential habitat overlap between red deer (*Cervus elaphus*) and roe deer (*Capreolus capreolus*) in northeastern China. PeerJ, 2016, 4: e1756.
- [2] 华俊钦, 石江艳, 李建强, 杨海, 徐基良. 基于物种分布的森林生态系统类型自然保护区功能区划评价——以河南连康山国家级自然保护区为例. 生态学报, 2020, 40(20): 7287-7298.
- [3] 罗莲莲, 周宏, 唐俊峰, 韦伟, 韩菡, 张泽钧, 洪明生. 大熊猫与同域动物在海拔分布上的生态位分化. 兽类学报, 2020, 40(4): 337-345.
- [4] Ajmal A. Relative abundance, prey preference and niche partitioning of snow leopard (*Uncia uncia*) and Tibetan wolf (*Canis lupus chanku*) in Karakoram Pamir mountains. Journal of Biodiversity & Endangered Species, 2021, 9(12): 1.
- [5] Zhao N X, Zhang X M, Shan G Y, Ye X P. Evaluating the effects of climate change on spatial aggregation of giant pandas and sympatric species in a mountainous landscape. Animals, 2021, 11(11): 3332.
- [6] 赵国静, 宫一男, 杨海涛, 谢冰, 王天明, 葛剑平, 冯利民. 东北虎豹国家公园东部的野猪生境利用和活动节律初步研究. 兽类学报, 2019, 39(4): 431-441.
- [7] 储诚进, 王西石, 刘宇, 蒋林, 何芳良. 物种共存理论研究进展. 生物多样性, 2017, 25(4): 345-354.
- [8] Schoener T W. Resource partitioning in ecological communities. Science, 1974, 185(4145): 27-39.
- [9] 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.
- [10] 李琼雯, 李双, 曹铭昌, 徐海根. 钱江源国家公园黑麂 (*Muntiacus crinifrons*) 生境适宜性评价及廊道设计. 生态与农村环境学报, 2021, 37(6): 778-785.
- [11] 余建平, 陈小南, 余顺海, 乐志芳, 申小莉, 曹铭昌. 基于 MAXENT 模型的古田山保护区黑麂生境适宜性评价. 兽类学报, 2020, 40(2): 143-151.
- [12] 郑祥, 鲍毅新, 葛宝明, 郑荣泉. 黑麂栖息地利用的季节变化. 兽类学报, 2006, 26(2): 201-205.
- [13] Yin Y, Fan H Z, Zhou B T, Hu Y B, Fan G Y, Wang J H, Zhou F, Nie W H, Zhang C Z, Liu L, Zhong Z Y, Zhu W B, Liu G C, Lin Z S, Liu C, Zhou J, Huang G P, Li Z H, Yu J P, Zhang Y L, Yang Y, Zhuo B Z, Zhang B W, Chang J, Qian H Y, Peng Y M, Chen X Q, Chen L, Li Z P, Zhou Q, Wang W, Wei F W. Molecular mechanisms and topological consequences of drastic chromosomal rearrangements of muntjac deer. Nature Communications, 2021, 12(1): 6858.
- [14] 李晟, 张晓峰, 陈鹏, 王军, 向定乾, 董伟, 张希明, 何百锁, 孙瑞谦, 赵纳勋, 王大军. 秦岭南坡森林有蹄类群落组成与垂直分布特征. 动物学杂志, 2014, 49(5): 633-643.
- [15] 杨婵, 万雅琼, 黄小富, 袁旭东, 周洪艳, 方浩存, 黎大勇, 李佳琦. 基于红外相机技术的小鹿 (*Muntiacus reevesi*) 活动节律. 广西师范大学学报: 自然科学版, 2021, 39(1): 65-70.
- [16] 邹启先, 彭彩涛, 杨雄威, 李光容, 穆浪, 粟海军. 两种同域分布鹿科动物的共存时空格局. 野生动物学报, 2021, 42(1): 5-13.
- [17] 戚伟尧, 陈智强, 王芳, 韦力, 林植华. 遂昌牛头山两种麂属动物的生态位分化. 丽水学院学报, 2020, 42(2): 33-38.
- [18] Dong X, Zhang J D, Gu X D, Wang Y J, Bai W K, Huang Q. Evaluating habitat suitability and potential dispersal corridors across the distribution landscape of the Chinese red panda (*Ailurus styani*) in Sichuan, China. Global Ecology and Conservation, 2021, 28: e01705.
- [19] Quevedo P, Von Hardenberg A, Pastore H, Álvarez J, Corti P. Predicting the potential distribution of the Endangered huemul deer *Hippocamelus bisulcus* in North Patagonia. Oryx, 2017, 51(2): 315-323.
- [20] 郭彦龙, 赵泽芳, 乔慧捷, 王然, 卫海燕, 王璐坤, 顾蔚, 李新. 物种分布模型面临的挑战与发展趋势. 地球科学进展, 2020, 35(12): 1292-1305.
- [21] 龚旭, 付强, 王磊, 杨彪, 张全建, 张远彬. 四川鞍子河保护地水鹿和羚牛栖息地适宜性评价与重叠性分析. 生态学报, 2020, 40(14): 4842-4851.
- [22] Paul S, Sarkar D, Patil A, Ghosh T, Talukdar G, Kumar M, Habib B, Nigam P, Mohan D, Pandav B, Mondol S. Assessment of endemic northern swamp deer (*Rucervus duvaucelii duvaucelii*) distribution and identification of priority conservation areas through modeling and field surveys across north India. Global Ecology and Conservation, 2020, 24: e01263.
- [23] 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.
- [24] 郭瑞, 许丽娟, 王旭池, 刘伟, 范鹏来, 徐爱春. 浙江清凉峰国家级自然保护区千顷塘区域鸟兽资源的红外相机调查. 兽类学报, 2020, 40(2): 183-192.

- [25] 黄凯, 万雅琼, 李佳琦, 朱宇静, 孙治宇, 夏万才, 黎大勇, 任宝平. 四川白河国家级自然保护区鸟兽红外相机监测. 生物多样性, 2021, 29(4): 554-559.
- [26] 李晟, 王大军, 陈祥辉, 卜红亮, 刘小庚, 靳彤. 四川老河沟保护地 2011—2015 年野生动物红外相机监测数据集. 生物多样性, 2021, 29(9): 1170-1174.
- [27] 刘佳, 林建忠, 李生强, 李友邦, 姚正明, 魏鲁明, 谭成江, 周岐海, 黄乘明. 利用红外相机对贵州茂兰自然保护区兽类和鸟类资源的初步调查. 兽类学报, 2018, 38(3): 323-330.
- [28] 鲁庆彬, 游卫云, 高欣, 于江傲, 杨仙玉, 周圻, 章叔岩, 翁东明. 清凉峰小鹿生境选择影响因子评价. 浙江林业科技, 2007, 27(1): 28-32.
- [29] 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鹿保护的有效性评估. 生物多样性, 2019, 27(1): 5-12.
- [30] Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 2008, 31(2): 161-175.
- [31] 刘红彩, 赵纳勋, 庄钰琪, 杨梅玲, 赵惠茹, 叶新平. 基于 MaxEnt 模型的秦岭山地斑羚生境适宜性评价. 生态学报, 2022, 42(10): 4181-4188.
- [32] Warren D L, Glor R E, Turelli M. Environmental niche equivalency versus conservatism: quantitative approaches to niche evolution. *Evolution*, 2008, 62(11): 2868-2883.
- [33] Warren D L, Glor R E, Turelli M. ENMTools: a toolbox for comparative studies of environmental niche models. *Ecography*, 2010, 33(3): 607-611.
- [34] 夏珊珊, 胡大明, 邓玥, 钟雪, 白文科, 张晋东, 王彬, 周材权. 同域分布红腹锦鸡和红腹角雉在不同空间尺度下的生境分化. 生态学报, 2019, 39(5): 1627-1638.
- [35] 和梅香, 陈俚心, 罗概, 古晓东, 王戈, 冉江洪. 凉山山系大熊猫和黑熊适宜生境预测及重叠分析. 生物多样性, 2018, 26(11): 1180-1189.
- [36] 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 模型的黑鹿 (*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.
- [37] 邹启先, 彭彩淳, 杨雄威, 李光容, 穆浪, 粟海军. 两种同域分布鹿科动物的共存时空格局. 野生动物学报, 2021, 42(1): 5-13.
- [38] Root T L, Price J T, Hall K R, Schneider S H, Rosenzweig C, Pounds J A. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 2003, 421(6918): 57-60.
- [39] 刘周, 周虎, 郭瑞, 章书声, 许丽娟, 罗远, 徐爱春. 浙江清凉峰国家级自然保护区华南梅花鹿栖息地内人为干扰类型及时空分布格局. 兽类学报, 2020, 40(4): 355-363.
- [40] 余建平, 陈小南, 任鹏, 龚堃, 鲍毅新. 基于样线法和非损伤性标志重捕法对古田山小鹿种群现状评价. 兽类学报, 2017, 37(4): 354-362.
- [41] 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.
- [42] 袁智文, 徐爱春, 俞平新, 郭瑞, 李春林. 浙江清凉峰国家级自然保护区华南梅花鹿栖息地适宜性评价. 生态学报, 2020, 40(18): 6672-6677.
- [43] Althoff D P, Storm G L, Dewalle D R. Daytime habitat selection by cottontails in central Pennsylvania. *The Journal of Wildlife Management*, 1997, 61(2): 450-459.