

亚洲象保护区外的栖息地偏好空间模拟评估

文芒才¹, 陈颖⁴, 宗春森², 丁念繁³, 陶庆⁵

(1. 西双版纳州亚洲象保护管理中心, 云南 景洪 666100; 2. 云南西双版纳国家级自然保护区科学研究所, 云南 景洪 666100; 3. 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083; 4. 香港大学生物科学学院, 中国 香港 999077; 5. 云南西双版纳国家级自然保护区管护局, 云南 景洪 666100)

摘要: 栖息地丧失和破碎化已成为野生动物和生物多样性保护面临的巨大威胁之一。本研究基于 3 年 (2019—2021) 无人机调查收集到的亚洲象分布数据, 构建了多变量多尺度物种分布模型, 评估了地形地貌、土地利用、线性基础设施和居民点等环境变量对亚洲象分布的影响。在研究期间无人机共监测到 10 719 个亚洲象分布位点, 其中旱季共收集到 5 088 个分布点, 雨季 5 630 个分布点。研究结果显示, 海拔、橡胶林延展度、农田延展度、森林延展度、景观延展度、荒地破碎度、农田破碎度、密林破碎度和道路密度, 共 9 个变量对亚洲象分布的影响比较大。2021 年, 西双版纳州面积的 27%, 约 5 181 km² 为亚洲象适宜栖息地, 可容纳约 347 (187—554) 头亚洲象; 适宜栖息地主要分布在与普洱临界区域的西双版纳州北部, 以及呈斑块状分布在西双版纳州南部的尚勇保护区的西部、东北部和勐腊保护区周边, 但北部适宜栖息地内的农田被亚洲象觅食或踩踏的概率高, 南部适宜栖息地被橡胶林蚕食的风险高, 处于中老缅边境的布龙州级保护区和易武州级保护区分布有少量的亚洲象适宜栖息地。研究结果将为云南亚洲象国家公园的规划和亚洲象种群管理提供有价值的科技支撑。

关键词: 亚洲象; 栖息地; 破碎化; 人象冲突; 无人机

Spatial evaluation of habitat suitability outside the Nature Reserves for Asian elephants

WEN Mancai¹, CHEN Ying⁴, ZONG Chunmiao², DING Nianfan³, TAO Qing⁵

(1. Xishuangbanna Dai Autonomous Prefecture Asian Elephant Conservation and Management Center, Jihong 666100; 2. Research Institute of Xishuangbanna National Nature Reserve, Jihong 666100; 3. Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 4. School of Biological Sciences, The University of Hong Kong, Hong Kong 999077; 5. Administration of Xishuangbanna National Nature Reserve, Jihong 666100)

Abstract: Habitat loss and fragmentation is one of the main threats to wildlife and biodiversity conservation. This study collected three years (2019—2021) elephant presence data across the entire Xishuangbanna State, built multiscale multivariable species distribution models to evaluate the impact of topography, land use, linear infrastructure and villages to the probability of elephant presence. We collected a total of 10 710 elephant presence locations, including 1 088 ones in dry season and 5 630 in rainy season. Nine out of 39 predictors influenced the probability of elephant presence most, including elevation, extensiveness of rubber plantation, cropland, mixed forest and landscape, patch density of bare land, cropland and dense forest, and road density. A total of 5 181 km² occupying 27% of Xishuangbanna state was predicted to be suitable for elephants, supporting approximately 347 (187—554) elephants. Suitable habitat mainly distributed in northern Xishuangbanna adjoining Pu'er and fragmented patches sat in southern Xishuangbanna surrounding Shangyong and Mengla reserves. However, the large area of cropland within the predicted suitable habitat was prone to be raided by elephants while the suitable habitats in Southern Xishuangbanna was at risk of being encroached by rubber plantations. There were small patches of habitat predicted to be suitable in Bulong and Yiwu reserves. This study provided science-based evidence for planning of the to be established Asian elephant national park and management of wild elephant populations in Yunnan Province.

Key words: Asian elephant; habitat; fragmentation; human elephant conflicts; drones

引言

栖息地丧失和破碎化已经成为野生动物和生物多样性保护面临的巨大威胁之一^[1]。亚洲象作为陆地最大的哺乳动物也面临同样的威胁, 全球种群分

布高度破碎化, 如 189 个野生种群零散地分布在 13 个分布国中^[2]。中国亚洲象在历史上曾广泛分布在黄河以北的区域, 但目前主要分布在云南^[3]。自 1989 年《中华人民共和国野生动物保护法》颁布以来, 亚洲象作为国家一级保护野生动物, 受到严

收稿日期: 2024-01-16

作者简介: 文芒才, 男, 高级工程师, 从事资源管理与监测工作。

通信作者: 陶庆: 男, 高级工程师, 长期从事自然保护工作。

格的法律保护,野生种群数量由 20 世纪 60 年代的 146 头增长到近年的 293 头^[4]。然而,在人类主导的景观地内,为大型陆生哺乳动物保留足够的适宜栖息地变得愈加困难。尤其在云南省,随着人口数量的增加,城镇化的迅速发展,线性基础设施的快速推进,橡胶林、咖啡、茶叶等经济作物的种植面积不断增大,自然景观地变得日益破碎。研究显示,亚洲象的适宜栖息地正在随着森林的丧失和破碎化逐渐减少^[5]。

目前,中国政府正在积极推动亚洲象国家公园的规划和建设。尽管以往基于亚洲象分布数据对栖息地适宜度的研究已取得一定进展,但因模型对分布数据的取样强度和取样覆盖面都有较高的要求,栖息地质量评估的准确性仍有待提高。虽然传统的调查方法包括样线、痕迹调查,覆盖面广,但易受地形地貌所限。痕迹调查可结合非损伤性取样,借助分子生物学分析,评估种群的遗传结构和遗传多样性,但对样本的新鲜程度要求较高,实验分析和测序成本也相对较高。近年来,自动红外相机技术逐步应用到野生动物调查中,相比较于传统调查方法优势明显,能获得连续的生物多样性调查数据,但受限于高成本投入,如相机的布设受地形地貌的限制,相机易损耗,雨季损耗尤其高,相机被偷或被破坏后数据随之丢失,数据需及时收回,人力成本投入高。因无人机相对成本低、能耗小、操作灵活等优点,不受复杂地形的影响,使得无人机技术逐渐在许多领域,如林业调查、地形勘探和测绘工程中被广泛应用。无人机调查也在近年应用到

亚洲象种群监测中,可以在确保调查人员安全的前提下,获得亚洲象分布、数量和活动轨迹的信息,并可及时发送预警信息,是减少人象冲突的有效方式^[6]。在西双版纳亚洲象群按分布地分为 5 个单元种群,分别为勐旺乡、勐养、勐腊、尚勇和勐海种群^[7]。

本研究基于连续 3 年无人机监测收集到的覆盖西双版纳州的亚洲象分布数据,构建多尺度多变量的物种分布模型,评估地形地貌、景观破碎化程度、土地利用、线性基础设施和城镇用地对亚洲象分布的影响,并预测适宜栖息地,估算潜在适宜栖息地内的种群承载力。研究结果将为亚洲象国家公园的规划和亚洲象种群管理提供科技支撑。

1 方法

1.1 研究区域

西双版纳傣族自治州(图 1)面积 19 124 km² (N 21°10'—22°40', E 99°55'—101°50'),人口 130.6 万,东南与老挝相连,西南与缅甸接壤。西双版纳州地处滇西横断山系的最南端,属无量山脉和怒山山脉的余脉。中部为澜沧江及其支流侵蚀形成的宽谷盆地,主要属于低山至中山中切割及浅切割地形。海拔 477~2 429m,其中山地面积占土地面积的 95%,坝子面积则为总面积的 5%。垂直分布于海拔 800~1 500m 的低中区的南亚热带,全州河流属澜沧江水系,计有大小河流 2 762 条,河网总长度 12 177 km,密度为 0.633 km/km²。气候与

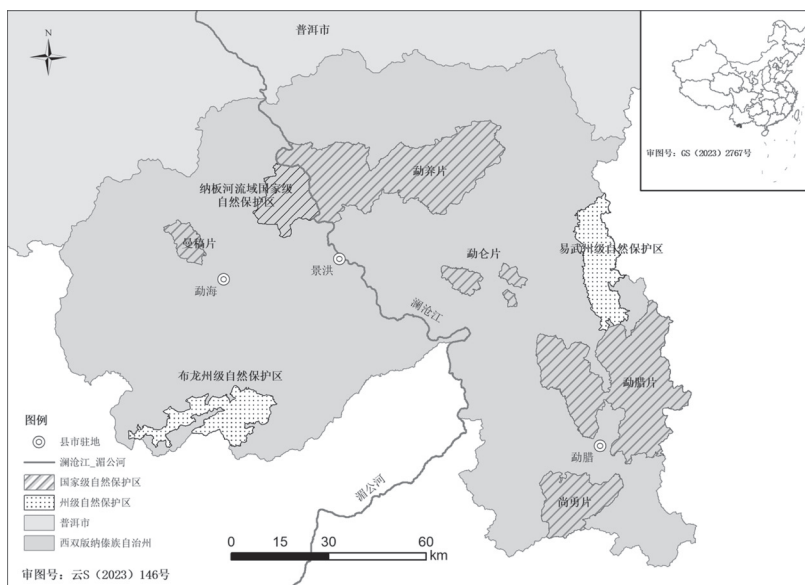


图 1 研究区域位置示意图
Fig.1 Sketch map of the study area

自然植被属于西部季风热带气候,干湿季明显。西双版纳州森林覆盖率达81.3% (15 500 km²),是中国第二大橡胶生产基地,橡胶林主要分布在西双版纳州南部,毗邻缅甸和老挝。西双版纳州保护区有西双版纳国家级自然保护区、纳版河国家级自然保护区、布龙和易武州级自然保护区,其中西双版纳州国家级自然保护区由地域上互不相连的勐养、勐腊、尚勇、曼稿、勐仑五个子保护区组成。保护区内植被类型主要有热带季节性雨林、热带雨林、山地雨林,季风常绿阔叶林、热性竹林等。亚洲象分布在西双版纳州的3个地级市:勐海、景洪和勐腊,种群主要分布在西双版纳国家级自然保护区的勐养、勐腊和尚勇保护区,其中勐腊和尚勇象群仍与老挝北部的丰沙里省和南塔省的象群有交流。基于无人机特点,在森林郁闭度较高,无人机监测到亚洲象的难度大,所以研究区域以保护区外开阔地域,如农田、林缘或林窗等空旷地带为主要研究区域。

1.2 无人机监测数据收集

从2016年起,监测人员采用无人机监测亚洲象的种群动态。自2019年起,重点追踪造成较多伤亡和人象冲突的勐海象群的动态分布,并在2020年和2021年逐渐将监测区域拓展至西双版纳州南部的勐腊-尚勇种群,实现全年度多种群多方位的跟踪监测。因保护区内森林郁闭度较高,无人机监测到亚洲象的难度大,所以监测区域以保护区外的开阔地域,如农田、林缘或林窗等空旷地带为主。共有8名监测人员和4台无人机(型号大疆精灵4pro)参与了本研究的数据收集。调查初期,先与当地护林员交流,收集其负责辖区内亚洲象活动的大概位置,根据掌握到的信息确定调查范围。由无人机小组在象群可能的活动区域展开搜索,发现象群后,采用照相和摄像两种形式拍摄,白天采用光学镜头,夜间采用热成像镜头。本研究包括完整的3年(2019—2021)共36个月的监测数据,每日收集6~21个数量不等的亚洲象分布位点数据。研究期间拍摄到亚洲象觅食、行走、饮水、玩耍等行为。

1.3 数据分析

首先校对无人机收集到的亚洲象分布位点,检查地理坐标的准确性,排除偏差较大落到西双版纳州以外的位点,删除重复点。将数据按年份和季节分类,分成5组数据集,分别为2019年、2020年、2021年,以及综合全部数据后重新划分为旱季(11

月到次年4月)和雨季(5月到10月)2个子数据集。每组数据集80%的数据用来构建最大熵物种分布模型(Maxent),剩余20%的数据用来验证模型的表现度^[8]。在物种分布模型中,共测量了39个代表地形地貌(海拔、坡度、河流密度)、景观地组成(如森林、草地或灌丛的占比)、破碎度(如单一土地利用类型的斑块密度)和人为干扰(道路密度、村庄密度、农田、建筑物占比)的变量(表1)。这些变量常被用来评估亚洲象的栖息地适宜度^[7-8]。除此之外,还将林地划分为3类。将郁闭度小于20%的区域划分为稀疏林地,郁闭度在21%~40%之间为开阔林地,郁闭度大于41%则为密林^[9]。检验森林密度和郁闭度对亚洲象分布的影响。

鉴于亚洲象家域大,活动区域广,每日行走距离远,我们认为环境变量的景观尺度对亚洲象分布的影响不容忽略。对39个环境变量(表1)分别测量了7组景观尺度,分别为0.5、1、2、4、8、16和32 km。这些尺度的选取考虑到亚洲象的家域和移动速度,如亚洲象家域面积9~800 km²^[10],马来西亚半岛佩戴项圈的野象每日行走约0.1~1.1 km,沙巴州野象每日行走1.3~1.8 km,缅甸野象每日行走约3.9 km^[11-13]。将0.5 km和1 km归为小尺度,2 km和4 km归为中间尺度,8 km、16 km和32 km归为广尺度。统一所有环境变量的图层精度为250 m网格大小。

构建物种分布模型的步骤如下。首先,构建了273个单尺度单变量模型,这包括39个环境变量的7个尺度,筛选出每个环境变量表现最优的尺度。通过比较AUC值(Area Under Curve)、训练数据和测试数据模型间的AUC差值筛选最优模型,表现度较好的模型拥有更高的AUC值和更小的AUC差值。之后,进行39个变量的最优尺度间的相关性检验,剔除相关度指标超过0.7的变量组合中模型表现度逊色的变量。借助R语言包中的'MaxentVariableSelection'工具包^[14]筛选出环境变量间的最优组合,筛选的标准为:相关度临界值为0.7,贡献度临界值为0.02,约束指数(regulation multiplier)以0.5为间隔,从1到6逐次筛选。然后,构建多尺度多变量Maxent物种分布模型,每个变量均使用其最优尺度。通过两种方式纠正取样偏差:(1)每个250 m方格内只保留一个亚洲象出现位点;(2)将亚洲象分布位点数据构建7个空间尺度的高斯(Gaussian)密度曲线表面,将它

表 1 用于评估亚洲象栖息地适宜性的环境因子及其数据来源
Tab. 1 Environmental variables and data source for evaluating habitat suitability for Asian elephant

类别	变量	数据源
地形地貌	海拔	Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) ^[18]
	坡度	SRTM 提取
	河流密度	National Catalogue Service for Geographic Information (NCSGI) v 2016, Ministry of Natural Resources, China
	道路密度	NCSGI, v 2016
	村落密度	NCSGI, v 2016
人类活动	城市夜灯分布	Operational Linescan System (DMSP/OLS), National Oceanic and Atmospheric Administration
	农田破碎度	Global Land Cover (FROM-GLC2017), Tsinghua University
	农田延展度	FROM-GLC2017
	农田占比	FROM-GLC2017
	胶林破碎度	Hole-filled SRTM for the globe Version.CGIAR-CSI SRTM 90m Database ^[19]
	胶林延展度	(Xiao et al. 2021)
	胶林占比	(Xiao et al. 2021)
	建筑物密度	FROM-GLC2017
	建筑物延展度	FROM-GLC2017
	建筑物占比	FROM-GLC2017
	景观破碎度	FROM-GLC2017
	景观斑块密度	FROM-GLC2017
	景观完整度	FROM-GLC2017
	混合林破碎度	FROM-GLC2017
	混合林延展度	FROM-GLC2017
	混合林占比	FROM-GLC2017
	草地灌丛破碎度	FROM-GLC2017
	草地灌丛延展度	FROM-GLC2017
	草地灌丛占比	FROM-GLC2017
	荒地破碎度	FROM-GLC2017
	荒地延展度	FROM-GLC2017
	荒地占比	FROM-GLC2017
环境变量	森林破碎度	Global Forest Change (GFC) ^[20]
	森林版块密度	GFC
	森林延展度	GFC
	非林地破碎度	GFC
	非林地延展度	GFC
	非林地占比	GFC
	密林破碎度	GFC
	密林延展度	GFC
	密林占比	GFC
	疏林地破碎度	GFC
	疏林地延展度	GFC
	疏林地占比	GFC

们作为偏差（bias）文档，使背景点的选取密度与位点出现点的密度保持一致。最优模型界定为最高 AUC 值，最小的 AUC 差值和最大训练数据的灵敏度和专一度测试值（MTSS），后者量化出现点被错误地预测为缺失位点的比例，因此值越小越好。使用 MTSS 临界值将栖息地预测图划分为适宜（亚洲象出现的概率 $p >$ 临界值）和非适宜（ $p <$ 临界值）

栖息地，并将适宜栖息地预测图与农田和橡胶林的分布相叠加。

2 结果

无人机监测在研究期间共收集到 10 719 个亚洲象分布位点，包括 2019 年的 2 042 个亚洲象监

测点，2020 年 4 747 个分布点，2021 年 3 929 个分布点，其中旱季共收集到 5 088 个分布点，雨季 5 630 个分布点。筛掉空间相关度较高的位点，每个 250 米方格内仅保留一个位点，不同年份和季节用于构建模型的位点分别为：2019 年 684 个位点，2020 年 1 668 个位点，2021 年 2 512 个位点，旱季 2 291 个位点和雨季 2 812 个位点。

2.1 环境变量的尺度对亚洲象出现概率的影响

单一变量单一尺度的物种分布模型结果显示，亚洲象的分布对每一个环境变量测量的空间尺度有一定的选择性，不同的环境变量影响亚洲象分布的最优尺度有所差异。总体而言，环境变量在较广尺度对亚洲象分布影响的概率更大。共 31 个（80%）环境变量对亚洲象分布的影响最优尺度为广尺度，其中 12 个（31%）变量最优尺度为 8 km，9 个变量为 16 km，10 个变量为 32 km，包括 10 个与人类活动相关的变量和 21 个环境变量。只有 5 个变量在 2 km 或 4 km 尺度影响亚洲象的分布最为显著，仅有 3 个变量的最优尺度筛选为小尺度（0.5 km）。

将每个环境变量表现最优的尺度保留，不同变量随机组合，筛选出表现度最佳的模型。不同年度和季节最优模型的 AUC 值分别为 2019 年 0.909，2020 年 0.826，2021 年 0.784，旱季 0.801 和雨季 0.768，最大训练数据的灵敏度和特异性测试的遗漏率值均小于 0.1，说明最优模型的预测准确度较高。无论年度还是季节模型，共 9 个变量被保留，它们的组合对亚洲象分布概率的影响最大，分别为海拔、胶林延展度、农田延展度、森林延展度、景观地延展度和荒地破碎度(斑块密度)、农田破碎度、密林破碎度和道路（表 2）。其中，6 个变量的组合共解释了超过 90% 的亚洲象分布概率，分别为海拔（16.9%~30.1%），胶林延展度（19.2%~36.9%），农田延展度（14.3%~20.9%），密林破碎度（1.7%~10.3%），农田破碎度（3.4%~35.2%）和荒地破碎度（6.4%~14.7%）。无论是年度模型还是季节模型，道路密度和自然村落的密度对亚洲象分布概率的影响均较低，其中道路密度对模型仅有 0.5%~3.5% 的贡献度（图 2）。总体而言，

表 2 不同环境变量的最优尺度及在不同年份和季节模型中的贡献度占比
Tab. 2 The optimal scale of each environmental variable and their percent contribution to the final models across years and seasons %

	2019 年	2020 年	2021 年	旱季	雨季	最优尺度 /km
胶林延展度	36.9	19.2	25.8	31.5	27.7	16
海拔	3.3	19.5	30.1	16.9	25.7	0.5
庄稼地破碎度	35.2	28.7	3.4	15.1	11.2	8
荒地破碎度	8.2	8.6	13.5	14.7	6.4	32
庄稼地延展度	2.5	18	16.3	14.3	20.9	4
密林破碎度	10.3	1.7	7	4.7	4.5	32
道路	0.5	3.5	2.4	2.1	3.2	4
景观延展度	0	0.4	0.3	0.4	0.4	8
森林延展度	3	0.4	1.2	0.3	0	16

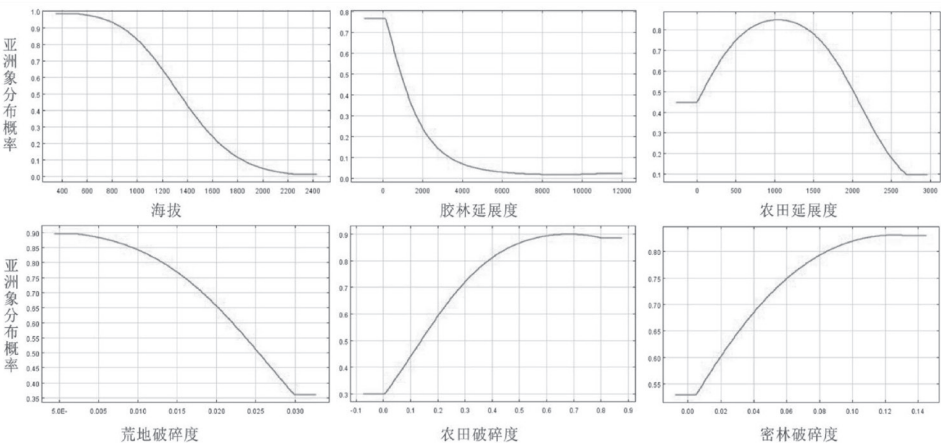


图 2 环境变量对亚洲象分布的响应曲线
Fig.2 Response curves of key environmental variables influencing the probability of Asian elephant presence

海拔 1 000 m 以下的区域更适宜亚洲象生存, 而当海拔超过 2 200 m, 亚洲象出现的概率极低。胶林斑块越大, 即延展度越高, 亚洲象分布概率越低。而农田和密林破碎度越高的区域, 亚洲象出现的概率反而增大。农田延展度对亚洲象分布概率的影响较为复杂。当农田斑块的农田边缘离中心点的距离小于 1 km 时, 斑块越大, 亚洲象分布概率随之增大; 而超过这个距离, 亚洲象分布的概率随之降低。

2.2 适宜栖息地面积和分布

表 3 西双版纳州不同年份和季度适宜亚洲象栖息的地域面积和潜在的环境承载力

Tab. 3 Area of suitable habitat and estimation of the carrying capacity in Xishuangbanna State across years and seasons

	2019 年	2020 年	2021 年	旱季	雨季
适宜栖息地面积 /km ²	1 605	4 116	5 181	4 568	5 596
非适宜栖息地面积 /km ²	17 399	14 888	13 824	14 436	13 409
适宜栖息地在西双版纳州的面积占比 %	8	22	27	24	29
亚洲象环境承载力 (若密度为 6.7 头 /100 km ²)	108	276	347	306	375
亚洲象环境承载力 (若密度为 3.6 头 /100 km ²)	58	148	187	164	201
亚洲象环境承载力 (若密度为 10.7 头 /100 km ²)	172	440	554	489	599

适宜栖息地主要分布在西双版纳州北部与普洱临界区域 (图 2), 包括勐养保护区北部、勐海和勐旺。勐养保护区内的适宜栖息地的分布斑块化程度高, 而勐养保护区北部适宜栖息地分布相对完整, 此区域适宜栖息地相连, 呈条状分布。另外, 适宜栖息地还呈斑块状零散地分布在西双版纳州南部的尚勇保护区的西部和东北部, 以及勐腊保护区周边。除了勐养、勐海、勐旺、勐腊和尚勇已知亚洲象活动的区域, 位于中缅边境的布龙州级保护区和中老

西双版纳州 2021 年适宜亚洲象栖息的面积为 5 181 km² (表 3), 占整个州面积的 27%, 2019 和 2020 适宜栖息地面积分别为 1 605 和 4 116 km², 旱季和雨季的面积为 4 568 km² 和 5 596 km²。以每 100 平方公里可以容纳 6.7 (3.6~10.7) 头亚洲象为基准^[15-16], 现存适宜栖息地可容纳亚洲象 347 (187~554) 头。由于雨季食物资源更为丰富, 雨季的种群承载力 375 (201~599) 头高于旱季 306 (164~489) 头。

审图号: 云S (2023) 146号

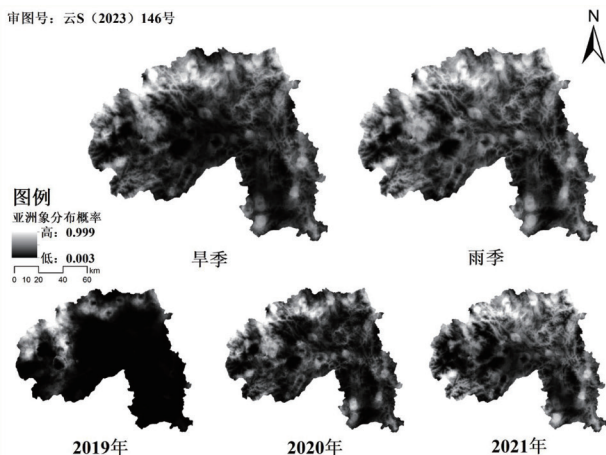


图 3 西双版纳州不同年份和季度亚洲象适宜栖息地的分布预测图

Fig.3 Habitat suitability mapping for Asian elephant in Xishuangbanna State across years and seasons

边境的易武州级保护区分布有少量的亚洲象适宜栖息地 (图 3)。雨季亚洲象适宜栖息地的分布与全年 (2021 年) 的分布格局相似, 而旱季较雨季适宜栖息地的分布则有所收缩 (图 4)。将亚洲象分布的适宜栖息地与农田和胶林的分布重叠, 发现西双版纳州北部与普洱临界处适宜亚洲象栖息的生境内分布的农田, 被亚洲象觅食或踩踏, 发生人象冲突的概率高。西双版纳州南部适宜栖息地被橡胶林蚕食的风险高 (图 5)。



图 4 西双版纳州 2021 全年和旱季适宜栖息地分布图
Fig.4 Distribution of suitable habitat for Asian elephant in 2021 and dry season only in Xishuangbanna State

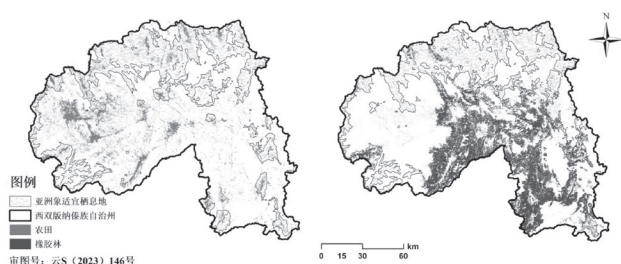


图5 西双版纳州2021年亚洲象适宜栖息地、农田和橡胶林的分布图

Fig.5 Distribution of suitable habitat for Asian elephant in 2021, and their interaction with cropland and rubber plantation in Xishuangbanna State

3 讨论

通过构建物种分布模型,分析了连续3年无人机监测到的多个亚洲象种群的数据,比较了不同年度和季节间亚洲象适宜栖息地的分布异同,研究结果详实可靠,可为制定科学有效的亚洲象保护和种群管理政策提供科学依据,并服务于亚洲象国家公园的规划、建设与管理。仅仅3年时间,无人机就收集到超过一万多条亚洲象到保护区外活动的数据,说明亚洲象在保护区外的活动频率高。亚洲象离开保护区到人类主导的景观地活动,人象冲突的概率增大,人象关系的管理是一个棘手但无法逃避的问题,需提前做好统筹规划。

没有比较2019年和2020或2021年亚洲象适宜栖息地分布的差异,认为差异来源主要受数据取样强度的限制。因为2019年由于资金所限,无人机项目主要覆盖在版纳普洱交接区域,重点监测勐海象群的分布,为制定预警系统,减少人类的损失和伤亡收集实时数据。在2020年和2021年,亚洲象分布数据逐步拓展至整个西双版纳州,数据更为全面,因此这两年的预测结果更能反映西双版纳州亚洲象适宜栖息地分布的真实情况。

西双版纳州保存着我国最大的野生亚洲象种群,数量超过国内种群的三分之二,对亚洲象保护的地域价值重大。本研究预测的亚洲象适宜栖息地主要分布在保护区外,代表着亚洲象种群增长的外扩区域。按国内亚洲象群密度均值的保守估算,现存适宜栖息地内可承载比现有象群多近一倍数目的亚洲象个体,即象群的增长仍有较大空间。尽管适宜栖息地分布集中的西双版纳州北部,此处仍有空间来承载更多头数的亚洲象;可是此区域也是城镇

化发展程度高,自然村和建筑物分布密集的区域,潜在的人象冲突是亚洲象种群保护和管理需谨慎考虑的问题。西双版纳州在2021年人口密度已达到66人/km²,随着近年来不断涌入的外来人口,未来人与亚洲象活动空间的重叠区域会更广,人象冲突发生的概率也会增大。

海拔作为影响亚洲象分布的关键因子之一,已被许多研究证实^[17]。本研究显示亚洲象极少分布在海拔2200m以上的区域,1200m以下的区域更适宜亚洲象生存。而近年来,取代天然林种植的橡胶林,分布在坡度平缓,低海拔区域,约在800m~1000m或1200m以下区域,对相似的地形地貌的选择偏好,橡胶林对天然林的替代和蚕食,对亚洲象分布的负面影响不容忽视。研究发现,亚洲象分布的概率随着橡胶林延展度的增大而降低,意味着橡胶林的种植是造成亚洲象适宜栖息地面积日益减少的关键驱动因子。

农田延展度在1km以内。随着农田斑块的增大,亚洲象分布概率增大。集中分布的农作物,相比于需要花费更多的时间和体力在天然林中觅食的草本植物,可为亚洲象提供美味可口、营养丰富、能量值高和觅食时间易预测(农作物成熟期时间相对固定)的优质食物来源。自1989年起,亚洲象作为国家一级保护野生动物,受到《中华人民共和国野生动物保护法》的严格保护,对人的惧怕程度降低,近年来亚洲象觅食农作物的事件频繁发生。尽管如此,包括亚洲象在内的野生动物对人类的风险规避依然存在。当农田的斑块半径超过1km,亚洲象分布概率随着斑块面积的增大而降低。这是因为大面积的农田常种植在人类居住区附近,看守和维护强度高,是典型的人类活动为主的地方。当森林和农田的破碎化程度增大时,亚洲象分布概率增加,因为密林可以为亚洲象提供遮蔽,为其提供避开人类活动集中的时间段和地域觅食农作物的避风港。虽然荒地或裸地在全州占比并不高,但荒地破碎度对亚洲象分布的影响不容忽视。我们认为荒地破碎度与森林占比成显著负相关(相关指数 r 高达0.73)。荒地破碎度越低,即森林占比越高,亚洲象分布的概率越高。同时需要注意的是,因保护区内森林覆盖度高,林冠盖度大,亚洲象的分布监测概率极大降低。无人机收集的亚洲象分布位点主要代表了保护区外部的亚洲象分布情况,因此森林相关指标(森林占比、延展度和破碎度)对亚洲象分布的影响有可能被弱化。

勐海象群的管理一直是个棘手的问题。该象群活动区域位于版纳和普洱交界处。此区域亚洲象适宜栖息地面积广,可承载更多头数的亚洲象,虽目前不在保护区内,未来可纳入亚洲象国家公园的范围内。只是此区域内的农田被象群踩踏和觅食的风险极高,需谨慎管理人象冲突事宜,也需综合考虑此区域的功能定位。定位为亚洲象种群保护和增长的空间,或者界定功能定位为以人类活动为主导的居民区,但两种定位彼此不兼容。

西双版纳州南部的勐腊-尚勇种群位于中老边境,与老挝象群存在基因交流,对维持和提高我国象群的遗传多样性水平意义重大,但尚勇保护区周边已密集种植橡胶林,加之尚勇和勐腊之间高速公路和铁路的建成通车,尚勇象群与勐腊象群间的连通被阻断的风险增大,由此产生的孤岛效应会造成孤立小种群,灭绝风险加大,长远存续堪忧。橡胶价格近年持续走低,可通过退胶还林或种植其他替代性农作物或经济作物来降低风险。位于中缅边境区域的布龙州级保护区,可作为亚洲象种群增长的外扩空间,位于中老边境的易武州级保护区可作为连接尚勇-勐腊种群和北部勐养种群的纽带。

收集亚洲象的活动和移动数据对了解此物种的家域大小,不同季节对家域内栖息地的利用程度,追踪分布动态,估算种群密度,设计种群间的廊道都具有极高的价值。虽然目前国内对亚洲象的追踪和分布的调查常局限于传统的样线和痕迹调查以及自动红外相机监测,尚未为亚洲象佩戴项圈获取实时监测数据,无人机收集到的分布数据可通过不断地积累,实现获取长期连续监测数据的可能,进而实现对种群的持续追踪,未来的应用价值和空间广阔。

参考文献:

- [1] Pimm S L, Jenkins C N, Abell R, et al. The biodiversity of species and their rates of extinction, distribution, and protection [J]. *Science*, 2014, 344(6187): 1246752.
- [2] Williams C, Tiwari S, Goswami V, et al. *Elephas maximus*. The IUCN Red List of Threatened Species 2020: e.T7140A45818198 [M]. 2020.
- [3] 陈颖,孙亚宽,曹静瑄,等. 亚洲象保护的机遇和挑战 [J]. *林业建设*, 2019(6): 11-22.
- [4] Campos-Arceiz A, de la Torre J A, Wei K, et al. The return of the elephants: How two groups of dispersing elephants attracted the attention of billions and what can we learn from their behavior [J]. *Conservation Letters*, 2021: 12836.
- [5] 赵宇,金崑. 亚洲象分布,数量,栖息地状况及种群管理 [J]. *世界林业研究*, 2018, 31(2): 25-30.
- [6] 王方,郑璇,马杰,等. 无人机技术在中国野生亚洲象调查研究及监测中的应用 [J]. *林业建设*, 2019(6): 38-44.
- [7] 王巧燕,陶永祥,李俊松,等. 西双版纳地区野生亚洲象种群分布及变迁原因分析. *林业调查规划*, 2017,42(4):113-118.
- [8] 林柳,金延飞,陈德坤,等. 西双版纳国家级自然保护区勐腊子保护区亚洲象种群和栖息地评价 [J]. *生态学报*, 2014, 34(7): 1725-1735.
- [9] Taher T M, Lihan T, Arifin N A T, et al. Characteristic of habitat suitability for the Asian elephant in the fragmented Ulu Jelai Forest Reserve, Peninsular Malaysia [J]. *Tropical Ecology*, 10 March 2021:347-358.
- [10] Penjor U, Kaszta Z, Macdonald D W, et al. Prioritizing areas for conservation outside the existing protected area network in Bhutan: the use of multi-species, multi-scale habitat suitability models [J]. *Landscape Ecology*, 2021, 36(1):1281-309.
- [11] Fernando P, Wikramanayake E D, Janaka H, et al. Ranging behavior of the Asian elephant in Sri Lanka [J]. *Mammalian Biology*, 2008, 73(1): 2-13.
- [12] Bahar A, Abu Kasim N, Hambali K. Home range and movement patterns of Asian elephant (*Elephas maximus*) in Gua Musang, Kelantan, Malaysia [J]. *Malayan Nature Journal*, 2018, 70(12): 21-32.
- [13] Alfred R, Ahmad A H, Payne J, et al. Home range and ranging behaviour of Bornean elephant (*Elephas maximus borneensis*) females [J]. *Plos One*, 2012, 7(2): e31400.
- [14] Moßbrucker A M, Fleming C H, Imron M A, et al. AKDEC home range size and habitat selection of Sumatran elephants [J]. *Wildlife research*, 2016, 43(7): 66-75.
- [15] Jueterbock A. R package Maxent Variable Selection: selecting the best set of relevant environmental variables along with the optimal regularization multiplier for Maxent niche modeling [J]. *R Foundation for Statistical Computing*, 2015:1-11.
- [16] Sun Y, Chen Y, D í az-Sacco J J, et al. Assessing population structure and body condition to inform conservation strategies for a small isolated Asian elephant (*Elephas maximus*) population in southwest China [J]. *Plos One*, 2021, 16(3): e0248210.
- [17] 杨子诚,陈颖,李俊松,等. 基于红外相机技术对亚洲象个体识别和种群数量的评估 [J]. *兽类学报*, 2018, 38(1): 18-27.
- [18] Jarvis A, Reuter, H I, Nelson A. Guevara E. Hole-filled SRTM for the globe (Version 4). [M]. CGIAR-CSI SRTM 90m Database. 2008: 25-54.
- [19] Xiao C, Li P, Feng Z, et al. Latest 30-m map of mature rubber plantations in Mainland Southeast Asia and Yunnan province of China: Spatial patterns and geographical characteristics [J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2021, 45(5): 736-756.
- [20] Hansen M C, Potapov P V, Moore R, et al. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change [J]. *Science*, 2013, 342(6160): 850-853.