

DOI: 10.5846/stxb202106241680

张鑫,尹文萍,谢菲,樊辉,陈飞.元江-李仙江流域亚洲象生境适宜性评价——基于荟萃分析和遥感大数据分析.生态学报,2022,42(12): 5067-5078.

Zhang X, Yin W P, Xie F, Fan H, Chen F. Habitat suitability evaluation of Asian elephants in the Yuanjiang-Lixianjiang River Basin based on meta-analysis and remote sensing big data. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(12): 5067-5078.

元江-李仙江流域亚洲象生境适宜性评价 ——基于荟萃分析和遥感大数据分析

张鑫^{1,2}, 尹文萍^{1,2}, 谢菲^{1,2}, 樊辉^{1,2,*}, 陈飞^{3,4}

1 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650091

2 云南省国际河流与跨境生态安全重点实验室, 昆明 650091

3 国家林业和草原局亚洲象研究中心, 昆明 650216

4 国家林业和草原局昆明勘察设计院, 昆明 650216

摘要:生境适宜性评价是物种保护和生境管理与规划的基础。近几十年来,云南境内野生亚洲象数量剧增,外扩迁移事件频发,而新迁入区域生境适宜状况因物种出现点数据缺乏而难以评价,掣肘迁移亚洲象保护与风险防范应急。以亚洲象新近迁入的元江-李仙江流域为案例区,采用荟萃分析统计亚洲象生境评价因子,结合相关性分析和方差膨胀因子独立性检验,筛选出生境评价因子;基于开源遥感数据产品量化生境因子,综合主成分分析和层次分析计算生境评价因子权重,采用生境适宜性指数(Habitat Suitability Index, HSI)模型评价元江-李仙江流域亚洲象生境适宜性,并分析其景观格局。结果表明:(1)元江-李仙江流域亚洲象生境适宜性空间格局主要表现为由下游至上游呈递减趋势,最适生境主要分布于流域下游段,而流域上游段适宜生境少;(2)元江流域生境适宜性低于李仙江流域,且其生境斑块连接度更低、破碎化更严重;(3)2021年“北移象群”北迁沿程生境适宜性由西南向东北呈下降趋势。基于亚洲象生境适宜性评价结果,科学引导野生亚洲象迁入适宜生境区,以规避人象冲突,保障外迁亚洲象群及其活动区居民生命财产安全,服务于区域生物多样性保护与乡村振兴。

关键词:生境适宜性指数;荟萃分析;遥感大数据;亚洲象;元江-李仙江流域

Habitat suitability evaluation of Asian elephants in the Yuanjiang-Lixianjiang River Basin based on meta-analysis and remote sensing big data

ZHANG Xin^{1,2}, YIN Wenping^{1,2}, XIE Fei^{1,2}, FAN Hui^{1,2,*}, CHEN Fei^{3,4}

1 Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University, Kunming 650091, China

2 Yunnan Key Laboratory of International Rivers and Transboundary Eco-security, Yunnan University, Kunming 650091, China

3 Asian Elephant Research Center of State Forestry and Grassland Administration, Kunming 650216, China

4 Kunming Institute of Survey and Design State Forestry and Grassland Administration, Kunming 650216, China

Abstract: Habitat suitability evaluation is a basis for species conservation, habitat management and planning. Over the past decades, the number of wild Asian elephants in Yunnan Province of China has increased sharply, and elephants' emigration from their original habitats frequently occurred. However, habitat quality in the newly inhabited areas is often poorly known due to lack of records in presence of Asian elephants, which hinders Asian elephant protection and risk prevention. The rapid development of remote sensing big data mapping technology provides new data sources for habitat suitability evaluation studies, and offers the possibility of identifying suitable habitats for species on a large regional scale more accurately and

基金项目:第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0402);国家自然科学基金项目(41971239,41461017)

收稿日期:2021-06-24; **网络出版日期:**2022-02-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fanhui@ynu.edu.cn

finely. In this study, a remote sensing big data-driven habitat suitability evaluation system for Asian elephants is constructed. We selected the Yuanjiang-Lixianjiang River Basin newly immigrated by Asian elephants as a case area, used meta-analysis to search for environmental factors related to Asian elephants habitat evaluation, and screened out habitat suitability evaluation factors by combining correlation analysis with variance inflation factor test. Subsequently, all habitat suitability evaluation factors were quantified based on open-source remote sensing data products and their weights were calculated using principal component analysis and analytic hierarchy process. Finally, we used a Habitat Suitability Index (HSI) model to determine the habitat suitability of Asian elephants in the study area and analyzed landscape patterns of habitats of Asian elephants. The results show that (1) the habitat suitability of Asian elephants in the Yuanjiang-Lixian River Basin decreased gradually upstream. The optimal habitat mainly occurred in the downstream basin, with a small distribution in the midstream basin and almost no distribution in the upstream basin. (2) The Yuanjiang River Basin was less suitable for Asian elephants than the Lixian River Basin because it had less connected and more fragmented habitat patches, which cannot meet the minimum home range requirements of Asian elephant populations and make it difficult to sustain a long-term survival of the “northward migration elephant herd”. (3) The habitat suitability decreased along the northward migration route of elephant herd called “northward migration elephant herd” roaming in 2021 with the decreased distribution of natural broad-leaved forests along the way. The findings provide a basis for scientifically guiding the elephant herd into suitable habitats to avoid the conflicts between the human and wild elephant and thereby to ensure the safety of the elephant herd and the affected residents, which will serve for the regional biodiversity conservation and rural revitalization.

Key Words: habitat suitability index; meta-analysis; remote sensing big data; Asian elephant; Yuanjiang-Lixianjiang River Basin

生境退化与破碎化加剧正导致全球生物多样性的快速丧失^[1-3]。生境适宜性评价通过综合多个与物种相关的气候、地形、地表覆被与人为干扰因子,量化物种的现有生境并预测其潜在生境,是物种保护和生境管理与规划的基础^[4]。生境适宜性评价应用广泛,目前,常用的生境适宜性评价方法包括生境适宜性指数(Habitat Suitability Index, HSI)模型、生态位因子分析(Ecological Niche Factor Analysis, ENFA)模型、最大熵(Maximum Entropy, MaxEnt)模型、生境质量(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs, InVEST)模型等^[5-8]。以往的生境适宜性研究大多根据经验选择生境因子,依赖于物种出现点数据赋予相应权重来衡量生境适宜性,遥感大数据在生境评价中的作用尚未得到充分挖掘。近年来,遥感大数据制图的迅速发展为生境适宜性评价研究提供了新的数据源^[9],如土地覆被、植被、气候、水体、人类干扰等遥感数据产品对目标地物较为全面、一致的多元信息描述^[10],为更准确、精细地辨识大区域范围内物种适宜生境提供了可能。因此,构建遥感大数据驱动的生境适宜性评价体系,对物种生境做出快速、准确的评价,是当前亟待解决的问题,对野生动物保护、生物多样性维持以及野生动物突发事件应急响应具有重要意义。

亚洲象(*Elephas maximus*)是生态系统的旗舰物种,在生态系统中发挥着重要作用^[11-12]。我国亚洲象主要分布在云南省南部西双版纳州、普洱市和临沧市等地^[13]。但自2020年3月以来,原栖息于西双版纳州国家级自然保护区勐养子保护区的“北移象群”从保护区出走,近数十年来首次进入元江流域,并持续向元江流域上游方向迁移。我国亚洲象家域范围生境适宜性已有广泛研究^[8, 14-15],但因亚洲象数十年未曾在邻近区域出现,故鲜有研究涉及亚洲象家域范围外的生境适宜性问题。此次“北移象群”突然迁入元江流域,该流域内是否存在适宜生境,其空间格局如何?是否能支撑该象群的长期生存?迁移路线是否为最适生境等问题尚不清楚,难以支撑迁移过程中亚洲象的保护和风险防范应急等。因此,本文基于遥感大数据驱动的生境适宜性指数(HSI)模型,采用荟萃分析挖掘并筛选出对亚洲象分布具有重要影响的生境因子,定量评价并对比分析元江-李仙江流域亚洲象生境适宜性格局,以期为迁移中亚洲象群的保护与风险防范应急调控、亚洲象后备生境规划等提供科学支撑。

1 研究区概况

元江-李仙江流域位于东经 $100^{\circ}06'$ — $103^{\circ}53'$, 北纬 $22^{\circ}27'$ — $25^{\circ}32'$, 处于云南省中部、东南部, 海拔范围 76—3344 m (图 1)。流域总面积 57376.39 km², 其中元江、李仙江流域面积分别为 23611.39 km² (占 41.15%) 和 33764.00 km² (占 58.85%)。流域涵盖中部高原温和区、元江炎热地区和热带季风林区三个气候区^[21], 年降水量 731—2307 mm^[22], 年均温度 14.8—23.8℃^[23]。流域内土地利用/土地覆被类型主要为林地、耕地、草地和灌木地, 而水体、湿地、建设用地、橡胶林和裸地分布较少, 其中橡胶林主要分布在元江、李仙江和藤条江下游。

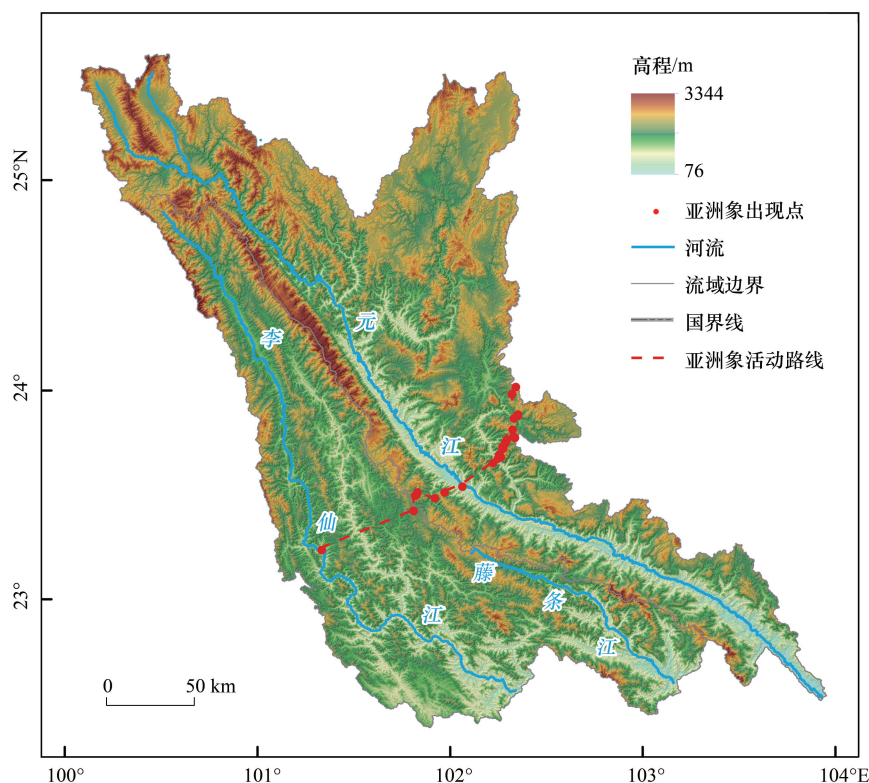


图 1 研究区位置及地形、亚洲象出现点和亚洲象活动路线

Fig.1 Location and topography of the study area, Asian elephant occurrence points and Asian elephant migration routes

国界线来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 <https://www.resdc.cn/>; 亚洲象出现点来自新闻媒体报道^[16—20], 活动路线依据出现点推测

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

使用的数据包括: 研究区 2020 年土地利用/土地覆被、地形、植被类型、归一化差异植被指数、降水量、河流、道路等数据。2020 年土地利用/土地覆被数据来源于 <http://www.globallandcover.com/>, 空间分辨率为 30 m, 由于该分类系统没有对橡胶林单独分类, 本文基于 2019 年云量小于 15% 的地表反射率 OLI 影像, 采用基于橡胶林物候的归一化燃烧指数 (Normalized Burn Ratio, NBR) 差值法提取了流域范围内的橡胶林分布^[24—25], 然后依据亚洲象对不同土地利用类型的偏好 (最小值为 0, 最大值为 10) 重新分类土地利用/土地覆被类型^[26]; 地形数据来源于 <http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/> 航天雷达地形测绘任务的数字高程模型 (Shuttle Radar Topography Mission Digital Elevation Model, SRTM DEM), 空间分辨率为 30 m; 植被类型数据来自中国科

学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=122>),依据亚洲象对不同植被类型的偏好作重分类^[26];归一化差异植被指数数据来自 <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/>,取 2013—2018 年逐年最大值合成后时序 NDVI 的中值;降水量数据来自 <https://www.worldclim.org/>,为 1970—2000 年降水量平均值;河流数据提取自云南省 1:25 万地形图;道路数据来自全国地理信息资源目录服务系统(<https://www.webmap.cn/main.do?method=index>)。对上述所有数据进行地理编码后,利用最邻近法(Nearest Neighbor)重采样至 30 m 空间分辨率,并进行相应处理(表 1)。

1.2 研究方法

1.2.1 生境评价因子选择

评价因子选择对于模型运行结果准确性至关重要^[27]。亚洲象对生境的选择利用主要受气候、地形、地表覆被、干扰等因素的影响^[28—29]。本文利用 Web of Science 和 CNKI 数据库检索出亚洲象生境适宜性相关文献。其中,Web of Science 的文献检索式为:(TS="habitat suitability" OR TS="habitat use" OR TS="habitat index" OR TS="habitat select") AND (TS="Asian elephant" OR TS="wild elephant"),CNKI 数据库的文献检索式为:(生境评价+生境适宜性+生境选择+栖息地适宜性+栖息地评价+栖息地选择)*亚洲象。根据检索到的文献统计生境评价因子词频,共检索到亚洲象生境适宜性评价文献 37 篇,涉及生境适宜性评价因子 142 个。参考亚洲象习性,依据统计结果选取出现频率较高的生境评价因子。

表 1 生境评价因子及处理方式
Table 1 Habitat evaluation factors and their processing methods

类型 Type	生境适宜性评价因子 Habitat evaluation factors	预处理处理方式 Preprocessing method
气候因子 Climatic factors	降水	原值
地形因子 Topographical factors	海拔/m	原值
	坡度/(°)	原值
	坡向	按方位进行重分类
	坡位	采用地形位置指数:将坡位分为:1-山脊、2-上坡位、3-中坡位、4-缓坡、5-下坡位、6-山谷
	地表粗糙度	原值
地表覆被因子 Land cover factors	土地利用/土地覆被	按亚洲象偏好重分类
	归一化植被指数	原值
	植被类型	按亚洲象偏好重分类
	森林频率	分区统计
	灌草丛频率	分区统计
	到森林的距离/m	欧氏距离
	到河流的距离/m	欧氏距离
	到居住点的距离/m	欧氏距离
干扰因子 Disturbing factors	到道路的距离/m	欧氏距离
	到耕地的距离/m	欧氏距离
	耕地频率	分区统计

为了消除评价因子间的多重共线性对模型预测结果的不利影响^[30],采用 Pearson 相关系数(Pearson Correlation Coefficient)和方差膨胀因子(Variance Inflation Factor, VIF)独立性检验筛选生境评价因子^[31]。当评价因子间的相关性大于 0.7 时,变量间存在共线性^[32];当评价因子的方差膨胀因子大于 10 时,变量间存在多重共线性^[33]。在计算 VIF 时,逐步剔除 VIF 值最高的评价因子,直到剩余评价因子的 VIF 值均小于 10。

2.2.2 生境适宜性模型

通过计算 HSI^[34]衡量亚洲象生境适宜性。计算公式为:

$$HSI = \sum_{i=1}^n w_i f_i \quad (1)$$

式中, f_i 为第 i 个评价因子, w_i 为第 i 个因子的权重, n 为评价因子的数量。评价因子权重计算有多种方法^[34—36], 本文综合层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 和主成分分析法 (Principal Components Analysis, PCA) 两种方法, 对两者的计算结果加权平均, 得到综合权重。AHP 是一种多准则的决策分析方法^[37], 通过比较两个影响因素之间的相对重要性来构建矩阵^[8, 15, 38—39], 再由矩阵的最大特征根及其对应的特征向量, 计算出各因素的权重; PCA 首先将原变量重新组合成主成分, 然后根据原变量的总方差和主成分的特征值计算原变量的权重^[35]。加权平均上述两种方法所得权重, 既能克服 AHP 的主观影响, 也能有效削减指标因子间相关性的影响, 从而提高模型结果的可靠性^[40]。

采用专家经验法重分类生境适宜性结果, 将亚洲象生境分为最适生境 (0.75—1)、较适生境 (0.6—0.75)、边际生境 (0.5—0.6) 和非生境 (0—0.5) 4 个等级^[8, 15, 39], 并计算不同纬度平均生境适宜性和 2021 年“北移象群”活动路线沿程生境适宜性及其趋势。

2.2.3 生境景观格局分析

采用斑块数 (Number of Patches, NP)、斑块密度 (Patch Density, PD)、最大斑块指数 (Largest Patch Index, LPI)、平均斑块面积 (Mean Patch Area, AREA_MN)、斑块分维数 (Fractal Dimension Index, FRAC) 和斑块连接度指数 (Connectance Index, CONNECT) 6 个指数来表征亚洲象生境景观格局特征, 这些指数由 FRAGSTATS 4.2 (https://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/downloads/fragstats_downloads.html) 计算得出。其中, NP 表示景观中某种类型斑块的数量; PD 表示景观中每平方公里的斑块数量, 代表景观整体斑块分化程度; LPI 表示某种类型的最大斑块面积占整个景观的总面积的百分比; AREA_MN 表示所有某种类型斑块的平均斑块的大小; FRAC 取值范围为 [1, 2], 值越接近 1, 表示斑块形状越接近欧几里得几何形状^[39]; CONNECT 取值范围 [0, 100], 0 表示阈值距离内生境间不存在连接状态、生境破碎化程度高, 100 代表阈值距离内所有生境处于连接状态。

3 结果与分析

3.1 元江-李仙江流域亚洲象生境格局

图 2 表明, 依据使用频次高低排序, 初步筛选出海拔、坡度、到水源距离、到居住点的距离、土地利用/土地覆被等 17 个亚洲象生境适宜性评价因子。

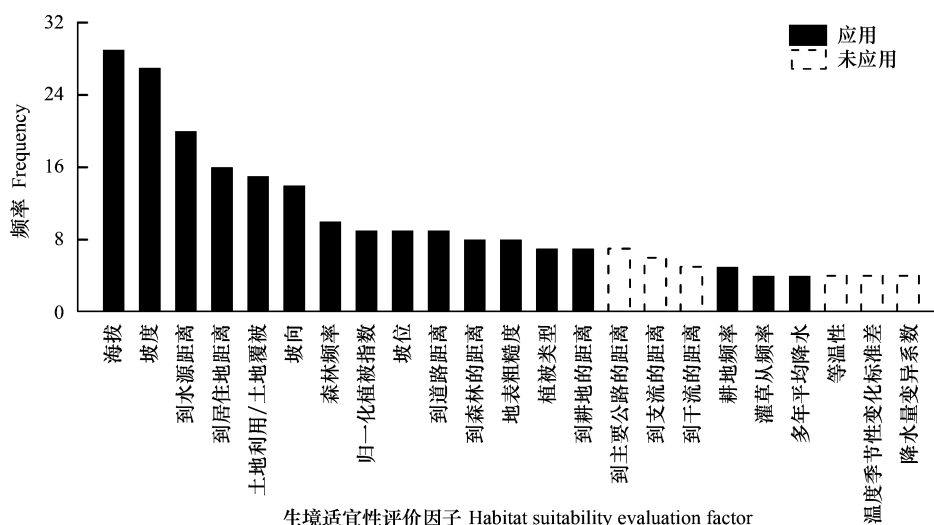


图 2 亚洲象生境适宜性评价因子使用频次

Fig.2 Frequency of Habitat suitability evaluation factors

由图 3 和图 4 可见,经相关性分析和方差膨胀因子检验筛选,森林频率和地表粗糙度两个因子被剔除,最终得到 15 个亚洲象生境适宜性评价因子。图 5 为基于开源遥感数据产品量化出的各生境适宜性评价因子空间格局,各因子的空间相似性较低;图 6 显示了结合 AHP 和 PCA 所得各生境适宜性评价因子的权重,其中土地利用/土地覆被的权重最高(0.1708),灌草丛频率的权重最低(0.0159)。

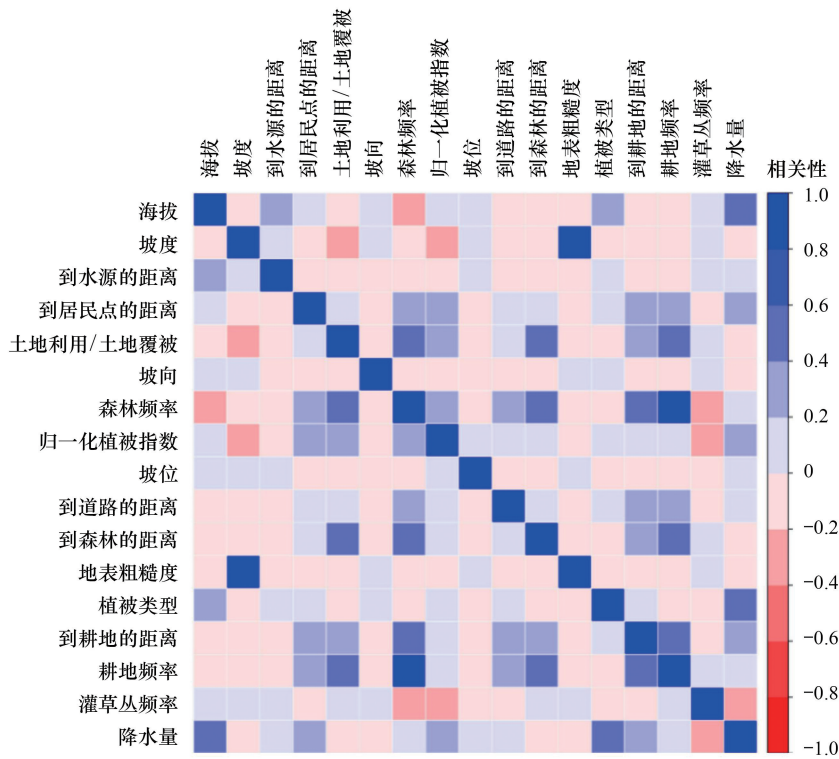


图 3 亚洲象生境适宜性评价因子相关性
Fig.3 Correlation of habitat suitability evaluation factors

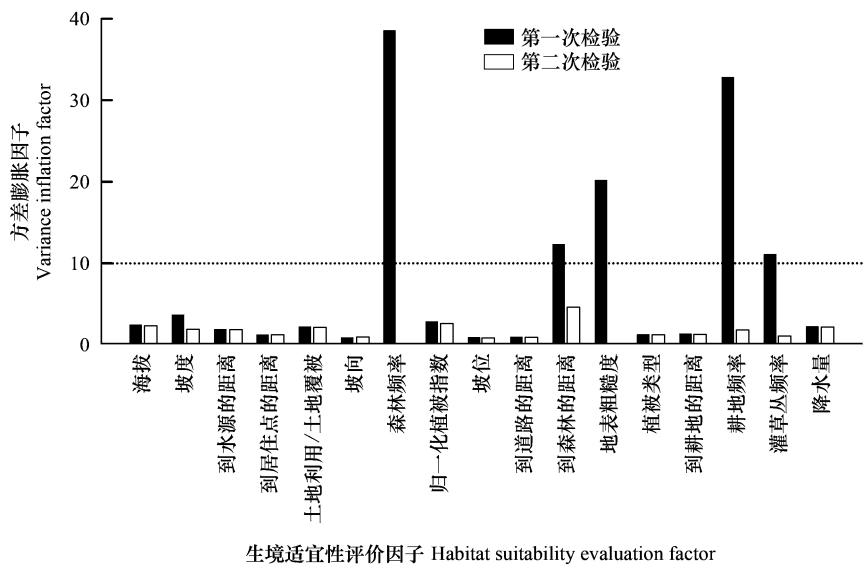


图 4 亚洲象生境适宜性评价因子方差膨胀因子:剔除森林频率和地表粗糙度前后
Fig.4 Variance inflation factor of habitat suitability evaluation factors: Before and after removing the factors of forest frequency and surface roughness

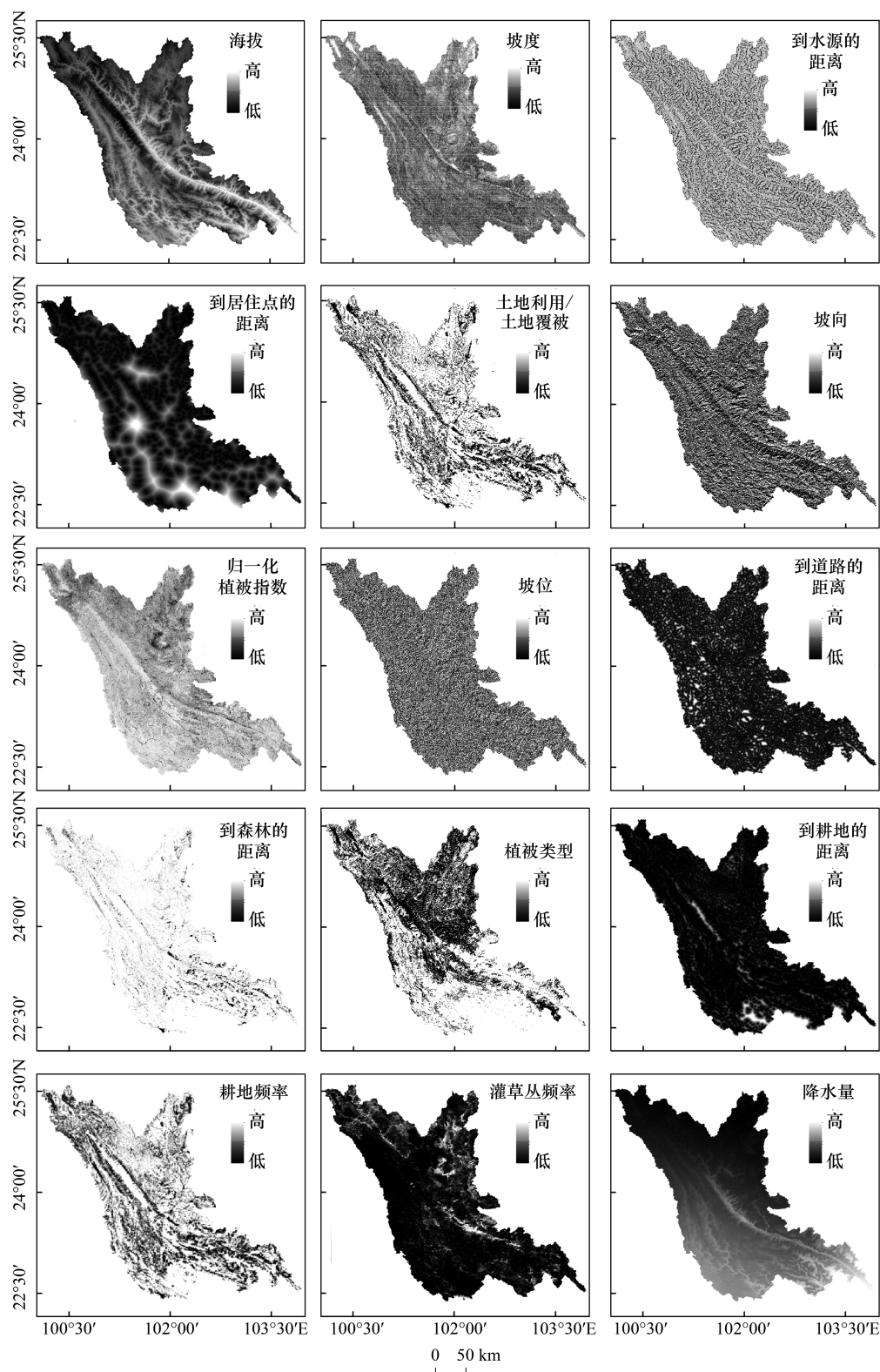


图5 亚洲象生境适宜性评价因子空间格局

Fig.5 Spatial patterns of habitat suitability evaluation factors for Asian elephants

由图7可知,研究区内亚洲象最适生境面积为 3271.27 km² (5.70%),较适和边际生境面积分别为 19278.97 km² (33.62%)和 16360.20 km² (28.52%)。分流域来看,元江流域内亚洲象的最适生境面积为 590.78 km² (1.75%),主要分布于元江流域下游中-越边境附近;较适生境和边际生境面积分别为8175.83 km²

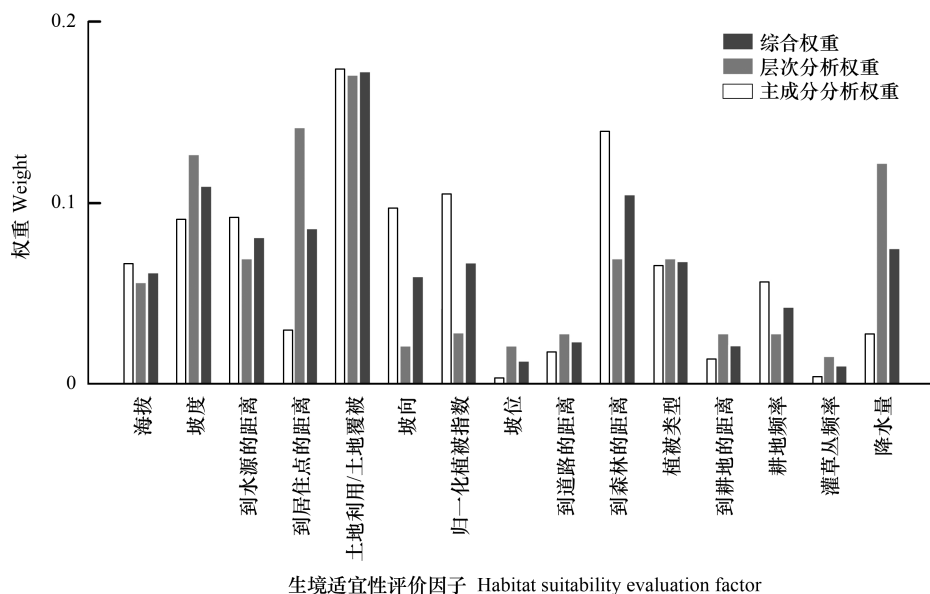


图 6 亚洲象生境适宜性评价因子权重

Fig.6 Weights of habitat suitability evaluation factors for Asian elephants

(24.21%) 和 12412.95 km² (36.76%)。李仙江流域内亚洲象最适生境面积为 2680.49 km² (11.35%), 主要分布于李仙江流域下游段, 且相对集中, 流域中游段仅有少量最适生境分布; 较适生境和边际生境面积分别为 11112.15 km² (47.06%) 和 3947.25 km² (16.72%)。图 7 进一步表明, 随纬度升高, 由南到北亚洲象生境适宜性总体上呈逐渐下降趋势。2021 年“北移象群”活动路线由西南向东北横贯流域中游, 沿程生境适宜性亦呈下降趋势。

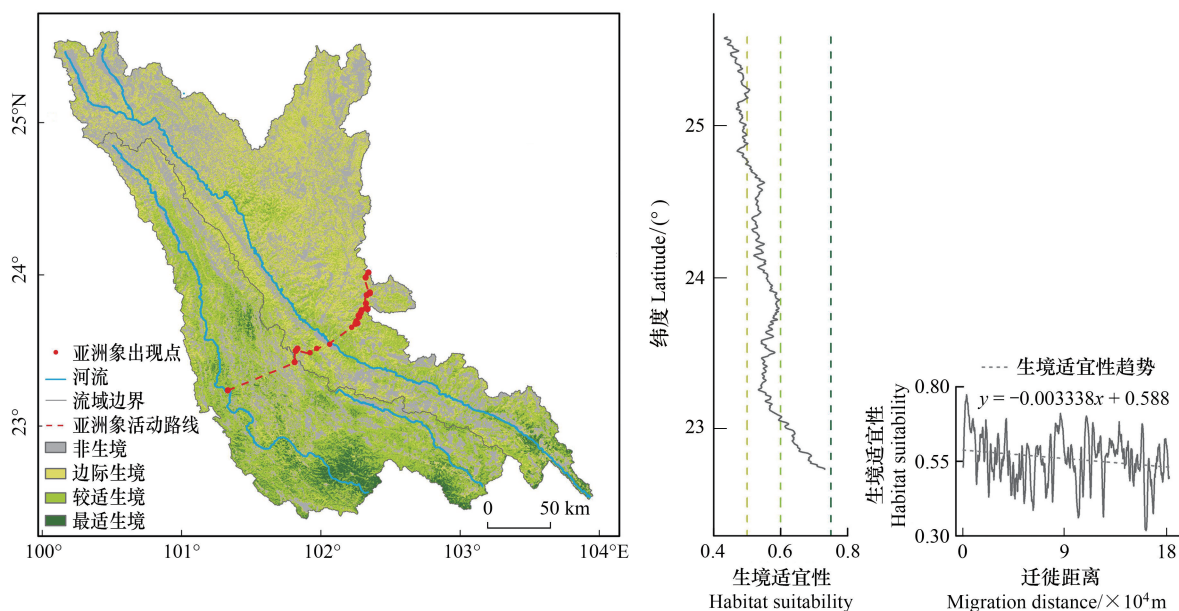


图 7 元江-李仙江流域亚洲象生境分布、不同纬度平均生境适宜性及生境适宜性随活动路线变化

Fig.7 The habitat distribution of Asian elephants in the Yuanjiang-Lixianjiang River Basin, the average habitat suitability along the latitude gradients and migration routes

3.2 生境景观格局

由图 8 可知,元江流域内三种亚洲象生境类型的 NP、LPI、AREA 表现为边际生境>较适生境>最适生境,PD 和 CONNECT 表现为最适生境>较适生境>边际生境;而李仙江流域内三种亚洲象生境类型的 NP 和 PD 表现为边际生境>最适生境>较适生境,LPI 和 AREA 表现为较适生境>最适生境>边际生境。元江流域亚洲象最适生境的 NP、LPI、AREA 和 FRAC 均小于李仙江流域,而 PD 和 CONNECT 高于李仙江流域。

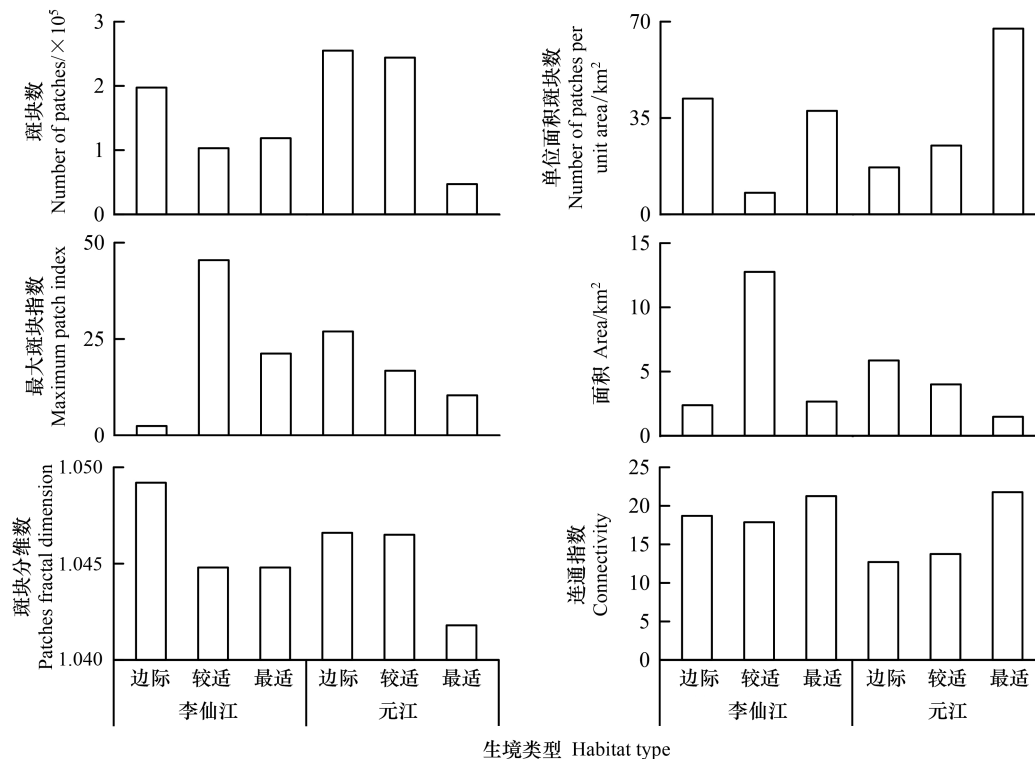


图 8 元江-李仙江流域亚洲象生境景观格局

Fig.8 Landscape indices of Asian elephants' habitats in the Yuanjiang-Lixian River basin

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 遥感大数据驱动的亚洲象生境适宜性评价:遥感大数据制图的迅速发展为大尺度生境研究提供了丰富的数据源^[9, 41—42]。基于已有亚洲象生境适宜性研究,采用荟萃分析挖掘并筛选出使用频率较高的生境因子,有效避免了生境因子选取的主观性干扰,并利用具有较好一致性、较高空间分辨率与精度且开源的遥感数据产品量化生境适宜性评价因子,构建了一套遥感大数据驱动的亚洲象生境适宜性评价体系,快速评价了元江-李仙江流域的亚洲象生境适宜性。与亚洲象生境适宜性评价常用的 ENFA 模型和 MaxEnt 模型相比^[5, 39],该方法不依赖亚洲象出现点数据,能有效规避人为景观(如耕地、居民点和城镇等)中的出现点导致的适宜生境误判^[15, 27]以及出现点观测数据获取周期长、获取难度大等问题。土地利用/土地覆被是影响亚洲象生境适宜性的重要因子。橡胶林种植作为影响我国亚洲象生境适宜性的主要土地利用/土地覆被类型^[39],在现有全球尺度土地利用/土地覆被数据产品(如 GlobeLand30)多被划归为林地^[9]。针对此,本研究基于 2019 年 Landsat 8 OLI 合成影像,采用基于橡胶林独特物候特征的 NBR 差值法提取研究区橡胶林种植范围,总体精度达 86.05%,为流域亚洲象适宜生境评价提供更为准确的数据支撑。此外,现有全球尺度土地利用/土地覆被数据集存在分类精度偏低、产品间空间一致性较差等问题^[43—44]。但随着土地利用/土地覆被遥感制图技术的

发展,全球尺度土地利用/土地覆被产品将愈加丰富^[9],未来可整合数据融合等技术,充分发挥多源遥感数据生产的土地利用/土地覆被数据集的各自优势特点,提高数据集精度^[43],更好地服务于亚洲象生境适宜性评价。遥感大数据驱动的适宜生境评价不仅极大地拓宽了传统生境适宜性评价的数据来源,提升了大尺度适宜生境制图的能力^[45],且具有较好的时效性,在野生动物突发事件应急处置与调控中极具潜力。而在本次亚洲象迁移应急响应中,主要依赖于无人机遥感技术监测象群动态^[46],而高空间分辨率、近实时的“空-天”遥感未能得到有效应用。未来迫切需要健全和完善现有地面野外观测网络^[47],整合高分辨率国产资源卫星数据^[48]、高分数据^[49],以及无人机遥感^[50-51]数据等,建立近实时“空-天-地”一体化的亚洲象监测与突发事件应急响应平台^[52-53],为亚洲象保护与应急管理及防控提供更全面、实时、精准的决策支持。

(2) 流域亚洲象适宜生境格局及其种群承载力:元江流域面积(23611.39 km²)远小于李仙江流域(33764.00 km²),但其较适和最适生境的 NP、PD 高于李仙江流域,而 AREA 却小于李仙江流域。因此,较于李仙江流域,元江流域亚洲象生境破碎化程度更高。两个流域 FRAC 均接近于 1,CONNECT 均处于较低水平,表明两个流域生境均曾受到一定程度的人类活动干扰^[8, 39],而元江流域较适生境和最适生境 LPI 小于李仙江流域,表明前者受到人类活动的干扰更为强烈^[54]。研究区内最适生境斑块主要位于李仙江流域下游段,其最适生境中最大斑块面积为 629.93 km²,而元江流域最适生境中最大斑块面积为 56.94 km²,远小于亚洲象种群最小家域面积(105 km²)^[55],表明元江流域生境无法支撑该象群的长期生存与种群维持。随着该象群向流域上游段迁移,受海拔、降水等因素的叠合影响,天然阔叶林分布减少,针叶林和灌草丛增多,象群生存所需的隐蔽场所和食物来源更为匮乏^[8],这可能是该象群进入元江流域后迁移速度加快的主要原因。目前,由于该象群逐渐远离亚洲象原栖息地,若长期滞留,极可能形成极小种群效应^[56],对其遗传多样性产生威胁。此外,元江流域上游段人口密度较大,远高于我国亚洲象生存可耐受的 20 人/km² 最大人口压力阈值^[57]。“北移象群”的突然迁入,已对当地居民的生命与财产安全构成极大威胁^[58-59],人象冲突潜在风险剧增。为规避此风险,亟需结合亚洲象生境适宜性、亚洲象行为生物学机制与规律^[60],尽快引导象群回归适宜生境区。本研究仅分析了元江-李仙江流域亚洲象生境现状,未回溯该流域亚洲象适宜生境历史格局及变化动态。因我国亚洲象种群数量持续增长对适宜生境需求势必上升,未来可结合长时序遥感大数据,开展对亚洲象适宜生境变化时空过程及驱动机制研究^[39],为我国亚洲象生境恢复及后备生境创建提供科学支撑。

4.2 结论

采用荟萃分析挖掘并筛选出亚洲象生境评价因子,结合相关性分析和 VIF 等方法诊断生境适宜性评价因子独立性,并基于开源遥感数据产品量化生境因子,构建 HSI 模型,探究了元江-李仙江流域亚洲象生境适宜性及其景观格局,得出以下结论:

(1) 元江-李仙江流域亚洲象生境适宜性主要表现为从下游到上游逐渐降低,最适生境较少且主要分布于流域下游段。

(2) 元江流域亚洲象生境适宜性低于李仙江流域,最适生境分布更少且破碎化更严重,无法满足亚洲象种群最小家域面积需求,难以独立维持“北移象群”的长期生存。

(3) 沿“北移象群”迁移活动路线,土地利用/覆被类型差异较大,天然阔叶林沿程分布减少,生境适宜性呈下降趋势。

参考文献(References):

- [1] Sodhi N S, Koh L P, Brook B W, Ng P K L. Southeast Asian biodiversity: an impending disaster. *Trends in Ecology & Evolution*, 2004, 19(12): 654-660.
- [2] Barlow J, Lennox G D, Ferreira J, Berenguer E, Lees A C, Mac Nally R, Thomson J R, de Barros Ferraz S F, Louzada J, Oliveira V H F, Parry L, de Castro Solar R R, Vieira I C G, Aragão L E O C, Begotti R A, Braga R F, Cardoso T M, de Oliveira R C Jr, Souza C M Jr, Moura N G, Nunes S S, Siqueira J V, Pardini R, Silveira J M, Vaz-de-Mello F Z, Veiga R C S, Venturieri A, Gardner T A. Anthropogenic disturbance in tropical forests can double biodiversity loss from deforestation. *Nature*, 2016, 535(7610): 144-147.

- [3] Habel J C, Schmitt T. Vanishing of the common species; empty habitats and the role of genetic diversity. *Biological Conservation*, 2018, 218: 211-216.
- [4] 钟明, 侍昊, 安树青, 冷欣, 李宁. 中国野生动物生境适宜性评价和生境破碎化研究. *生态科学*, 2016, 35(4): 205-209.
- [5] 杨楠, 马东源, 钟雪, 杨孔, 周志强, 周华龙, 周材权, 王彬. 基于 MaxEnt 模型的四川王朗国家级自然保护区蓝马鸡栖息地适宜性评价. *生态学报*, 2020, 40(19): 7064-7072.
- [6] 张学儒, 周杰, 李梦梅. 基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析. *地理学报*, 2020, 75(1): 160-178.
- [7] 刘玮, 辛美丽, 周健, 詹冬梅, 丁刚, 吴海一. 基于生境适宜性指数模型的俾岛海黍子生境层级分布. *应用生态学报*, 2021, 32(3): 1061-1068.
- [8] 刘鹏, 代娟, 曹大藩, 李志宏, 张立. 普洱市亚洲象栖息地适宜度评价. *生态学报*, 2016, 36(13): 4163-4170.
- [9] Grekousis G, Mountrakis G, Kavouras M. An overview of 21 global and 43 regional land-cover mapping products. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, 36(21): 5309-5335.
- [10] 熊丽君, 袁明珠, 吴建强. 大数据技术在生态环境领域的应用综述. *生态环境学报*, 2019, 28(12): 2454-2463.
- [11] Norris K, Terry A, Hansford J P, Turvey S T. Biodiversity conservation and the earth system; mind the gap. *Trends in Ecology & Evolution*, 2020, 35(10): 919-926.
- [12] Wright J P, Jones C G. The concept of organisms as ecosystem engineers ten years on; progress, limitations, and challenges. *BioScience*, 2006, 56(3): 203-209.
- [13] 赵宇, 金崑. 亚洲象分布、数量、栖息地状况及种群管理. *世界林业研究*, 2018, 31(2): 25-30.
- [14] 林柳, 金延飞, 陈德坤, 郭贤明, 罗爱东, 赵建伟, 王巧燕, 张立. 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. *生态学报*, 2014, 34(7): 1725-1735.
- [15] 林柳, 金延飞, 杨鸿培, 罗爱东, 郭贤明, 利繁, 张立. 西双版纳亚洲象的栖息地评价. *兽类学报*, 2015, 35(1): 1-13.
- [16] 普洱广播网. 17 头野生亚洲象进村入户搞破坏 当地加强监测预警. (2021-03-23) [2021-05-20]. http://www.pegbw.com/tp_nr.asp?id=25601.
- [17] 春城晚报. 野象春游! 17 头亚洲象从普洱墨江徒步到玉溪元江. (2021-04-18) [2021-05-20]. <http://news.sina.com.cn/o/2021-04-18/doc-ikmxzfmk7479567.shtml>.
- [18] 昆明信息港. 17 头亚洲象从普洱墨江“逛”到玉溪元江咪哩乡. (2021-04-20) [2021-05-20]. https://m.kunming.cn/news/c/2021-04-20/13209447.shtml#.
- [19] 腾讯网. 《亚洲象“北上旅行团”会不会来昆明》追踪|亚洲象研究专家监测“野象军团”. (2021-05-18) [2021-05-20]. <https://new.qq.com/omn/20210518/20210518A0D0RL00.html>.
- [20] 春城晚报. 野象活动线路图. (2021-06-01) [2021-06-21]. http://ccwb.yunnan.cn/html/2021-06/01/content_1418056.htm.
- [21] 谢淑琴. 红河流域水文特性. *水文*, 2002, 22(4): 57-58, 63-63.
- [22] 叶长青, 甘淑, 李运刚. 红河流域降水量的时空变异特征. *云南大学学报: 自然科学版*, 2008, 30(1): 54-60.
- [23] 杨李艳. 元江流域气候与土地利用变化对径流的影响模拟研究[D]. 昆明: 云南大学, 2018.
- [24] 刘怡媛, 肖池伟, 李鹏, 刘影, 饶滴滴. 基于 CR_{NBR} 物候算法的西双版纳橡胶成林提取及时空变化研究. *地球信息科学学报*, 2019, 21(3): 467-474.
- [25] Fan H, Fu X H, Zhang Z, Wu Q. Phenology-based vegetation index differencing for mapping of rubber plantations using landsat OLI data. *Remote Sensing*, 2015, 7(5): 6041-6058.
- [26] Sukumar R. *The Living Elephants: Evolutionary Ecology, Behavior, and Conservation*. New York: Oxford University Press, 2003.
- [27] Hirzel A H, Le Lay G. Habitat suitability modelling and niche theory. *Journal of Applied Ecology*, 2008, 45(5): 1372-1381.
- [28] Huang C, Li X Y, Khanal L, Jiang X L. Habitat suitability and connectivity inform a co-management policy of protected area network for Asian elephants in China. *PeerJ*, 2019, 7: e6791.
- [29] Kanagaraj R, Araujo M B, Barman R, Davidar P, De R, Digal D K, Gopi G V, Johnsingh A J T, Kakati K, Kramer-Schadt S, Lamichhane B R, Lyngdoh S, Madhusudan M D, Ul Islam Najar M, Parida J, Pradhan N M B, Puyravaud J P, Raghunath R, Rahim P P A, Muthamizh Selvan K, Subedi N, Trabucco A, Udayraj S, Wiegand T, Williams A C, Goyal S P. Predicting range shifts of Asian elephants under global change. *Diversity and Distributions*, 2019, 25(5): 822-838.
- [30] Dormann C F, Elith J, Bacher S, Buchmann C, Carl G, Carré G, Marquéz J R G, Gruber B, Lafourcade B, Leitão P J, Münkemüller T, McClean C, Osborne P E, Reineking B, Schröder B, Skidmore A K, Zurell D, Lautenbach S. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 2013, 36(1): 27-46.
- [31] Liao Z Y, Nobis M P, Xiong Q L, Tian X L, Wu X G, Pan K W, Zhang A P, Wang Y, Zhang L. Potential distributions of seven sympatric sclerophyllous oak species in Southwest China depend on climatic, non-climatic, and independent spatial drivers. *Annals of Forest Science*, 2021,

- 78(1): 5.
- [32] Neupane D, Kwon Y, Risch T S, Johnson R L. Changes in habitat suitability over a two decade Period before and after Asian elephant recolonization. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 22: e01023.
- [33] Kubota Y, Shiono T, Kusumoto B. Role of climate and geohistorical factors in driving plant richness patterns and endemism on the east Asian continental islands. *Ecography*, 2015, 38(6): 639-648.
- [34] Nyimbili P H, Erden T. A hybrid approach integrating entropy-AHP and GIS for suitability assessment of urban emergency facilities. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2020, 9(7): 419.
- [35] 李航鹤, 马腾辉, 王坤, 谭敏, 渠俊峰. 基于最小累积阻力模型(MCR)和空间主成分分析法(SPCA)的沛县北部生态安全格局构建研究. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(8): 1036-1045.
- [36] Hazarika R, Saikia A. The pachyderm and the pixel: an assessment of elephant habitat suitability in Sonitpur, India. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(15): 5317-5330.
- [37] Seyedmohammadi J, Sarmadian F, Jafarzadeh A A, McDowell R W. Development of a model using matter element, AHP and GIS techniques to assess the suitability of land for agriculture. *Geoderma*, 2019, 352: 80-95.
- [38] 张立. 中国亚洲象保护研究. 北京: 科学出版社, 2018.
- [39] 吴得卿, 魏建华, 樊辉. 南滚河流域土地利用变化对亚洲象生境的影响. *生态学报*, 2021, 41(16): 6476-6485.
- [40] 林玲, 王卫红, 冉茂莹, 耿诗画, 吴伟强. 王朗国家自然保护区大熊猫生境适宜性评价. *西南科技大学学报*, 2021, 36(1): 57-62.
- [41] Zacarias D, Loyola R. Distribution modelling and multi-scale landscape connectivity highlight important areas for the conservation of savannah elephants. *Biological Conservation*, 2018, 224: 1-8.
- [42] Jun C, Ban Y F, Li S N. Open access to Earth land-cover map. *Nature*, 2014, 514(7523): 434-434.
- [43] 宋宏利, 张晓楠, 陈宜金. 基于证据理论的多源遥感产品土地覆被分类精度优化. *农业工程学报*, 2014, 30(14): 132-139.
- [44] 白燕, 冯敏. 全球尺度多源土地覆被数据融合与评价研究. *地理学报*, 2018, 73(11): 2223-2235.
- [45] Mehler K, Burlakova L E, Karatayev A Y, Biesinger Z, Bruestle E, Valle-Levinson A, Castiglione C, Gorsky D. Integrating remote sensing and species distribution modelling to predict benthic communities in a Great Lakes connecting channel. *River Research and Applications*, 2017, 33(8): 1336-1344.
- [46] 环球无人机. 15 头野生亚洲象进入云南峨山县城 无人机持续跟踪监测. (2021-05-29)[2021-05-29]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1701034320630105166&wfr=spider&for=pc>.
- [47] 杨萍. 中国科学院野外科学观测研究网络未来发展的思考. *中国科学院院刊*, 2021, 36(1): 104-112.
- [48] 李一凡, 韩波, 王啸虎, 张宏宇, 雷勇, 张明磊. 资源一号业务卫星发展综述. *航天器工程*, 2020, 29(6): 1-9.
- [49] 王桥, 赵少华, 封红娥, 王玉, 白志杰, 孟斌, 陈辉. 国家城镇生态环境综合监测技术体系构建. *地球信息科学学报*, 2020, 22(10): 1921-1934.
- [50] 王方, 郑璇, 马杰, 王智红, 刘宇, 姚冲学, 李正玲, 陈明勇. 无人机技术在中国野生亚洲象调查研究及监测中的应用. *林业建设*, 2019, (6): 38-44.
- [51] 晏磊, 廖小罕, 周成虎, 樊邦奎, 龚健雅, 崔鹏, 郑玉权, 谭翔. 中国无人机遥感技术突破与产业发展综述. *地球信息科学学报*, 2019, 21(4): 475-495.
- [52] Stephenson P J. Integrating remote sensing into wildlife monitoring for conservation. *Environmental Conservation*, 2019, 46(3): 181-183.
- [53] 李德仁. 论空天地一体化对地观测网络. *地球信息科学学报*, 2012, 14(4): 419-425.
- [54] 石彩霞, 杨利, 钟佩君. 汨罗江国家湿地公园景观格局演变及其驱动力分析. *生态科学*, 2021, 40(3): 92-101.
- [55] Jathanna D, Karanth K U, Kumar N S, Karanth K K, Goswami V R. Patterns and determinants of habitat occupancy by the asian elephant in the western ghats of karnataka, India. *PLoS One*, 2015, 10(7): e0133233.
- [56] Clark T W, Seebeck J H. Management and Conservation of Small Populations. Brookfield: Chicago Zoological Society, 1990.
- [57] 孙刚, 许青, 金昆, 王振堂, 郎宇. 野象在中国的历史性消退及与人口压力关系的初步研究. *东北林业大学学报*, 1998, 26(4): 48-51.
- [58] 陈颖, 孙亚宽, 曹静瑄, 时坤. 亚洲象保护的机遇和挑战. *林业建设*, 2019, (6): 11-22.
- [59] 冯利民, 张立. 云南西双版纳尚勇保护区亚洲象对栖息地的选择. *兽类学报*, 2005, 25(3): 229-236.
- [60] 陈明勇, 姜志诚, 王方, 保明伟, 郑璇. 亚洲象行为学研究. 昆明: 云南科技出版社, 2018.