



海南大田国家级自然保护区 海南坡鹿生境适宜性动态评价

王虹博^{1,2}, 符明利³, 韦玲艳^{1,2}, 王永师^{1,2}, 符运南³, 饶晓东^{1,2*}, 龚文峰^{1,2*}

- (1. 海南大学热带农林学院, 海口, 570228;
2. 海南大学智慧林业重点实验室, 海口, 570228;
3. 海南大田国家级自然保护区管理局, 东方, 572600)

稿件运行过程

收稿日期: 2024-06-28

修回日期: 2024-08-17



关键词: 海南坡鹿;

大田国家级自然保护区;

HSI模型;

栖息地评价

Keywords: Hainan Eld's deer (*Rucervus eldii hainanus*);

Datian National Nature Reserve;

HSI model;

Habitat evaluation

中图分类号: Q958.1

文献标志码: A

文章编号:

2310-1490(2025)-02-0237-14

DOI: 10.12375/ysdwxb.20250201

摘要

适宜的栖息地是野生动物种群资源发展的重要保障,明确其时空变化特征对野生动物物种保护与管理具有重要意义。基于自然因素和人为干扰因素的8个评价指标,采用栖息地适宜性指数(HSI)模型对1988—2023年海南大田国家级自然保护区海南坡鹿(*Rucervus eldii hainanus*)的栖息地适宜性进行综合评价。结果表明:(1)2023年,卫星项圈跟踪数据显示海南坡鹿出现在评价结果为“最适宜”“适宜”和“次适宜”区域的记录比例达99.91%;(2)1988—2023年,“最适宜”和“适宜”区域面积整体均呈增减反复波动变化趋势,“最适宜”区域总面积减少93.40 hm²,“适宜”区域总面积增加161.13 hm²;(3)1988—1993年、1998—2003年和2018—2023年,研究区“次适宜→适宜”“适宜→最适宜”和“适宜→次适宜”的转移面积较大,分别为265.46、178.45、347.67 hm²;(4)“最适宜”区域重心变化最复杂,整体向东北方向偏移,迁移均值为495.15 m,“适宜”区域重心迁移距离最大,整体向东南方向偏移,迁移均值为528.79 m;(5)保护区海南坡鹿的栖息地适宜性具有显著的空间自相关,热点区域自保护区西部逐渐扩散到南部和北部,冷点区域一直围绕保护区边缘分布。本研究结果对恢复海南坡鹿种群数量和提高栖息地管理质量具有指导意义。

Habitat Suitability Dynamic Evaluation of Hainan Eld's Deer in Hainan Datian National Nature Reserve

基金项目: 国家自然科学基金项目(32360386, 32360250); 海南省自然科学基金高层次人才项目(621RC507); 2024年中央财政林业草原生态保护恢复资金项目(HNDT-2024-02); 海口市智慧林业重点实验室平台资助项目(2020-057)

第一作者简介: 王虹博(1999—), 男, 硕士研究生; 主要从事资源环境遥感与GIS应用研究。E-mail: hbw5890@163.com

* 通信作者: 饶晓东, E-mail: 993676@hainanu.edu.cn; 龚文峰, E-mail: gwf101@163.com

WANG Hongbo^{1,2}, FU Mingli³, WEI Lingyan^{1,2},
WANG Yongshi^{1,2}, FU Yunnan³, RAO Xiaodong^{1,2*}, GONG Wenfeng^{1,2*}

- (1. School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou, 570228, China;
2. Intelligent Forestry Key Laboratory, Hainan University, Haikou, 570228, China;
3. Hainan Datian National Nature Reserve Administration, Dongfang, 572600, China)

Abstract: Suitable habitat is an important guarantee for the development of wildlife population resources, and clarifying its spatial and temporal change characteristics is of great significance for wildlife species conservation and management. This study used the habitat suitability index (HSI) model to comprehensively evaluate the habitat suitability of the Hainan Eld's deer (*Rucervus eldii hainanus*) in Hainan Datian Nature Reserve from 1988 to 2023 based on eight evaluation indexes of natural and anthropogenic disturbance factors. The results were as follows: (1) Satellite collar tracking data in 2023 shows that the fitting accuracy of Hainan Eld's deer in the evaluation results of "most suitable", "suitable" and "sub-suitable" areas is 99.91%. (2) From 1988 to 2023, the "most suitable" and the "suitable" area showed an overall trend of increasing and decreasing with repeated fluctuations, with the "most suitable" total area decreasing by 93.40 hm², the "suitable" total area increasing by 161.13 hm². (3) From 1988 to 1993, from 1998 to 2003 and from 2018 to 2023, "low suitable → suitable", "suitable → most suitable" and "suitable → low suitable" transfer area is large, which were 265.46, 178.45, and 347.67 hm², respectively. (4) The change of the center of gravity of the "most suitable" was the most complicated, and the whole area shifted to the northeast, with the migration distance of 495.15 m. The migration distance of the center of gravity of the "suitable" was the largest, and the whole area shifted to the southeast, with the migration distance of 528.79 m. (5) The habitat suitability of the Hainan Eld's deer in Datian Reserve has significant spatial autocorrelation and aggregation phenomenon, with the hotspot area gradually spreading to the south and north from the west of the reserve, and the cold spot area has been distributed around the edge of the reserve. The results of this study have guiding significance for restoring the population size of Hainan Eld's deer and improving the quality of habitat management.

栖息地是动物赖以生存和繁衍的场所,是维持其正常生命活动所依赖的各种环境资源的总和^[1]。适宜的栖息地环境条件是维持野生动物生存与发展的重要保障^[2],同时,对栖息地进行评估和预测是对物种进行有效保护的基础^[3]。然而,人为干扰、栖息地退化和气候变化等因素的进一步加剧^[4-6],直接导致野生动物的栖息地呈现被破坏、丧失及片段化的困境^[7-8]。因此,评估野生动物栖息地对掌握野生动物在栖息地中的生存现状、探究栖息地与野生动物种群数量的协调关系具有重要作用^[9]。

目前通常使用栖息地适宜性指数(habitat suitability index, HSI)模型、生态位因子分析(ecological-niche factor analysis, ENFA)模型和最大熵(maximum entropy, MaxEnt)模型等对野生动物栖息地进行评价^[10-13]。HSI模型在定量评价野生动物的生境适宜性和推断野生动物的最适环境条件等领域取得了较

好的研究结果^[14-16],尤其在野生动物栖息地评价及其栖息地选择偏好方面^[16-17]。如陆尧等^[18]、易炜等^[19]和朱若雅等^[20]通过构建不同环境因子权重的HSI模型来探讨鱼类栖息地分布与环境因子的关系;王志强等^[21]、郭殿繁等^[22]利用地理信息系统技术,构建HSI模型对扎龙保护区丹顶鹤(*Grus japonensis*)的繁殖栖息地进行评价;Rittenhouse *et al.*^[23]以美国密苏里州棕林鸫(*Hylocichla mustelina*)和黄胸大鹀(*Icteria virens*)的HSI模型结果为基础,研究野生动物栖息地与人口统计学之间的关系。然而,应用该模型评价鹿科(Cervidae)动物栖息地的研究相对较少。

海南坡鹿(*Rucervus eldii hainanus*)主要栖息于海拔200 m以下地势平缓的稀树草原、丘陵或平地,在海南方言中“坡”即“平地”的意思,故得名坡鹿^[24],是国家一级重点保护野生动物^[25],也被《中国濒危动

物红皮书: 兽类》列为易危种^[26], 具有极高的保护价值。海南大田国家级自然保护区(以下简称“大田保护区”)为海南坡鹿的主要分布区之一, 其种群数量达到300余头^[27-28]。海南坡鹿性喜群居, 活动节律主要表现为晨昏高峰活动模式^[29], 食性偏好选择草本植物的嫩叶、茎和某些灌木的花和果实等^[30], 发情交配期为1—6月, 高峰期为3—4月^[31], 主要栖息生境为乔木密度适中的落叶季雨林、稀树灌木草地和热带草原^[32]。近年来, 我国学者对海南坡鹿的起源、食性及模拟生境改造等进行了相关研究^[24, 32-33], 但对海南坡鹿栖息地的研究仅限于初步调查或单因子分析^[24, 27, 31-34]。迄今, 尚无基于多环境因子的大田保护区海南坡鹿栖息地适宜性评价的研究, 且未见长时间序列探究海南坡鹿栖息地时空演变的相关报道。因此, 加强对海南大田保护区海南坡鹿生境和种群的研究, 对保护海南坡鹿、监测栖息地和制定相关政策具有重要意义。

基于此, 本研究综合自然因素和人为干扰因素, 以1988—2023年Landsat TM/ETM+/OLI和Sentinel-2为主要数据, 选取归一化植被指数(normalized differential vegetation index, NDVI)、土地利用类型、距水源距离、距道路距离、距居民点距离、海拔、坡度和坡向8个指标因子, 耦合GIS和HSI模型完成大田保护区海南坡鹿栖息地适宜性评价。基于海南坡鹿项圈跟踪数据, 揭示海南坡鹿种群空间分布格局; 基于转移矩阵、重心迁移和空间自相关方法探究海南坡鹿栖息地时空演变特征, 以此揭示海南坡鹿栖息地对其种群分布的影响机制, 该结果对海南坡鹿种群数量监测和栖息地改造及修复具有重要的指导意义。

1 研究区概况

海南大田国家级自然保护区位于海南省东方市(19°5′—19°17′ N, 108°47′—108°49′ E), 属地势较

平缓的丘陵地区, 总面积约为1 310 hm²。保护区属热带季风气候, 具有明显的干湿季, 年均降雨量约1 012 mm, 年平均气温23~25℃。保护区主要保护对象为海南坡鹿, 此外, 也有缅甸蟒(*Python bivittatus*)、海南兔(*Lepus hainanus*)和红原鸡(*Gallus gallus*)等野生动物。保护区内的主要植被类型包含落叶季雨林、灌丛林、低平地热带草原、人工草地和人工林^[35]。

2 研究方法

2.1 数据来源

研究区遥感影像和DEM数据源自于欧洲航天局(<https://dataspace.copernicus.eu>)和地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)。DEM数据的空间分辨率为30 m, Sentinel-2数据(2018年和2023年)空间分辨率为10 m, Landsat TM/ETM+/OLI数据(1988、1993、1998、2003、2008、2013年)空间分辨率为30 m。保护区边界图、海南坡鹿种群数量、海南坡鹿监测数据及其他部分基础数据源自海南大田国家级自然保护区管理局。

2.2 环境因子数据处理

评价因子的选择和等级的划分是野生动物栖息地评价十分重要的过程^[36]。前人研究表明, 植被盖度、植被类型、人为干扰和距水源距离等因子对野生动物的栖息地选择影响较大^[37-39]。本研究参考相关野生动物栖息地评价成果^[37-39], 基于实际外业调查和海南坡鹿监测的基础数据, 完成海南坡鹿栖息地适宜性评价指标因子的选择(表1)。参照已有鹿科动物生境偏好成果和分级标准^[37-38], 并基于ArcGIS 10.8软件实现评价指标的定量赋值, 赋值标准: 最适宜(high suitable, HS)(3分), 较适宜(more suitable, MS)(2分)和不适宜(non-suitable, NS)(1分)。

表1 海南大田国家级自然保护区海南坡鹿栖息地评价单因子等级划分

Table 1 The habitat evaluation of Hainan Eld's deer single factor classification in Hainan Datian National Nature Reserve

分级标准 Grading standards	海拔/m Elevation	坡度/(°) Slope	坡向/(°) Aspect	距水源距离/m Distance from water sources	土地利用类型 Land use type	植被指数 NDVI	距居民点距离/m Distance from settlements	距道路距离/m Distance from roads
不适宜NS	>60	>20	无	>1 000	非植被区域	≤0.2	≤500	≤150
较适宜MS	<35	(10, 20]	(0, 112.5), (247.5, 360)	(500~1 000]	灌木林地, 有林地	(0.5, 1.0]	(500, 1 000]	(150, 300]
最适宜HS	[35, 60]	≤10	[112.5, 247.5]	≤500	草地, 疏林地	(0.2, 0.5]	>1 000	>300

(1) 归一化植被指数(NDVI)

利用 ENVI 5.6 软件完成序列遥感影像的辐射定标和大气校正,基于 NDVI 计算公式定量获取研究区的 NDVI 数值。参照表 1 的分类标准,基于 ArcGIS 完成研究区 NDVI 的重分类和赋值(地形、水源和人为干扰因子的重分类和赋值操作与此相同)。

(2) 土地利用类型

在 ArcGIS 支持下,采用最大似然法和目视解译相结合的方法,完成 8 期遥感影像的分类处理,定量获取研究区的土地利用数据,结合研究区土地利用现状和参照表 1,将其分为草地、疏林地和有林地等,在此基础上完成地类的重分类和赋值。

(3) 地形因子

利用 ArcGIS 空间分析模块完成 DEM 数据处理,定量提取研究区海拔、坡度和坡向数据。

(4) 水源因子

利用 ArcGIS 软件对遥感影像提取研究区水系,并使用欧氏距离工具提取距水源距离数据。

(5) 人为干扰因子

利用 ArcGIS 软件解译遥感影像提取居民点和道路,并使用欧式距离工具提取距居民点和距道路距离数据。

2.3 生境评价适宜性模型

经实地考察和交流发现,海南坡鹿与马麝(*Moschus sifanicus*)在回避人为干扰区、偏好在灌丛和距水源较近的生境中活动等栖息地选择习性^[39]较相似,本研究在参考马麝生境偏好^[39]的基础上,基于保护区地理特征和海南坡鹿生活习性确定每个生境因子的重要性,并结合层次分析法计算得到 8 个因子对应的权重,耦合 GIS 和 HSI 模型完成海南坡鹿的栖息地适宜性评估。HSI 的计算公式^[14]为

$$I_{HS} = \sum_u W_u S_u, u = 1, 2, 3, \dots, 8. \quad (1)$$

式中: $S_1 \sim S_8$ 依次为坡度、坡向、海拔、距居民点距离、距道路距离、距水源距离、土地利用类型和 NDVI; W_u 为权重值, $W_1 \sim W_8$ 分别取 0.10、0.05、0.05、0.10、0.10、0.20、0.20、0.20。基于 ArcGIS 完成 HSI 模型评价结果的重分类和归一化等处理,对评价结果重分类:不适宜生境($0 \leq I_{HS} < 0.60$)、次适宜生境($0.60 \leq I_{HS} < 0.75$)、适宜生境($0.75 \leq I_{HS} < 0.85$)和最适宜生境($0.85 \leq I_{HS} \leq 1$)。

2.4 转移矩阵

基于 ArcGIS 空间叠加功能构建 1988—1993 年、1998—2003 年、2008—2013 年和 2018—2023 年海南坡鹿栖息地转移概率矩阵,以期定量分析不同时期大田保护区海南坡鹿栖息地的时空变化特征。计算公式^[40]为

$$D_{ij} = \sum_j^n \left(\frac{dS_{i-j}}{S_i} \right) \times 100\%. \quad (2)$$

式中: S_i 为第 i 类海南坡鹿栖息地评价类型总面积; dS_{i-j} 为某一时间段第 i 类栖息地评价类型转化为第 j 类栖息地评价类型的面积总和; n 表示保护区海南坡鹿栖息地评价等级总数; D_{ij} 为 5 年间第 i 类栖息地评价类型转化为第 j 类栖息地评价类型的转移概率。

2.5 重心迁移模型

重心迁移模型能够反映不同栖息地重心的空间转移情况,体现栖息地适宜性重心的迁移方向和迁移距离等空间动态变化规律。本研究基于 ArcGIS 标准差椭圆和平均中心工具计算不同时期海南坡鹿栖息地的重心并绘制重心移动路径图。重心坐标运算公式^[41]为

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{t,i} X_i}{\sum_{i=1}^n C_{t,i}}, \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{t,i} Y_i}{\sum_{i=1}^n C_{t,i}}. \quad (3)$$

式中: \bar{X} 和 \bar{Y} 分别是重心经度和纬度, $C_{t,i}$ 是第 t 年第 i 个栖息地适宜性等级分区面积, X_i 、 Y_i 分别为第 i 个栖息地适宜性等级斑块几何中心经纬度, n 为该种栖息地斑块总数。

2.6 空间分异特征

空间自相关分析是研究邻近位置属性相关性的空间统计学方法,是检验要素属性值是否显著地与其相邻空间点属性值相关联的重要指标。为探究大田保护区海南坡鹿栖息地的时空分布格局及分异特征,本研究利用 Geoda 软件计算 Moran's I ,以全面反映保护区内海南坡鹿栖息地的空间关联性和时空差异,并基于 LISA 进行局部空间自相关分析,探究海南坡鹿栖息地局部空间异常特征。Moran's I 计算公式^[42]为

$$I_{Global} = \frac{n \sum_i \sum_j o_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\left(\sum_i \sum_j o_{ij} \right) \sum_i (x_i - \bar{x})^2}. \quad (4)$$

$$I_{Llobal} = \frac{(x_i - \bar{x})}{s^2} \sum_{q=1}^n o_{ij} (x_i - \bar{x}). \quad (5)$$

式中： I_{Global} 为全局空间自相关结果， I_{Local} 为局部空间自相关结果， o_{ij} 为空间权重矩阵， x_i 和 x_j 是变量 x 在相邻配对单元栅格的 i 和 j 属性值， \bar{x} 为属性值的平均值， n 为研究单元数， s^2 为得分值的方差。当 $I > 0$ 时，表明存在空间正相关，呈趋同集聚，值越大空间聚集程度越高；相反，当 $I < 0$ 时，表明存在空间负相关，呈离散分布；当 $I = 0$ 时，表明不存在空间相关性。

3 结果

3.1 HSI模型评价结果适宜性验证

为验证HSI模型评价结果的精度，使用6只佩戴

卫星跟踪项圈的海南坡鹿跟踪数据进行对比。在去除异常记录后，共收集到6 317条跟踪数据，以此数据验证2023年的海南坡鹿栖息地适宜性评价结果（图1）。海南坡鹿出现在栖息地评价结果为“最适宜”“适宜”（suitable, SU）和“次适宜”（low suitable, LS）区域的记录分别有1 905、2 164、2 242条，分别占总记录的30.16%、34.26%、35.49%，追踪数据位于“不适宜”区域的记录仅有6条，占总记录的0.09%，海南坡鹿出现在“次适宜”及以上生境的记录比例高达99.91%。因此，HSI模型对海南坡鹿栖息地适宜性评价拟合度较高。

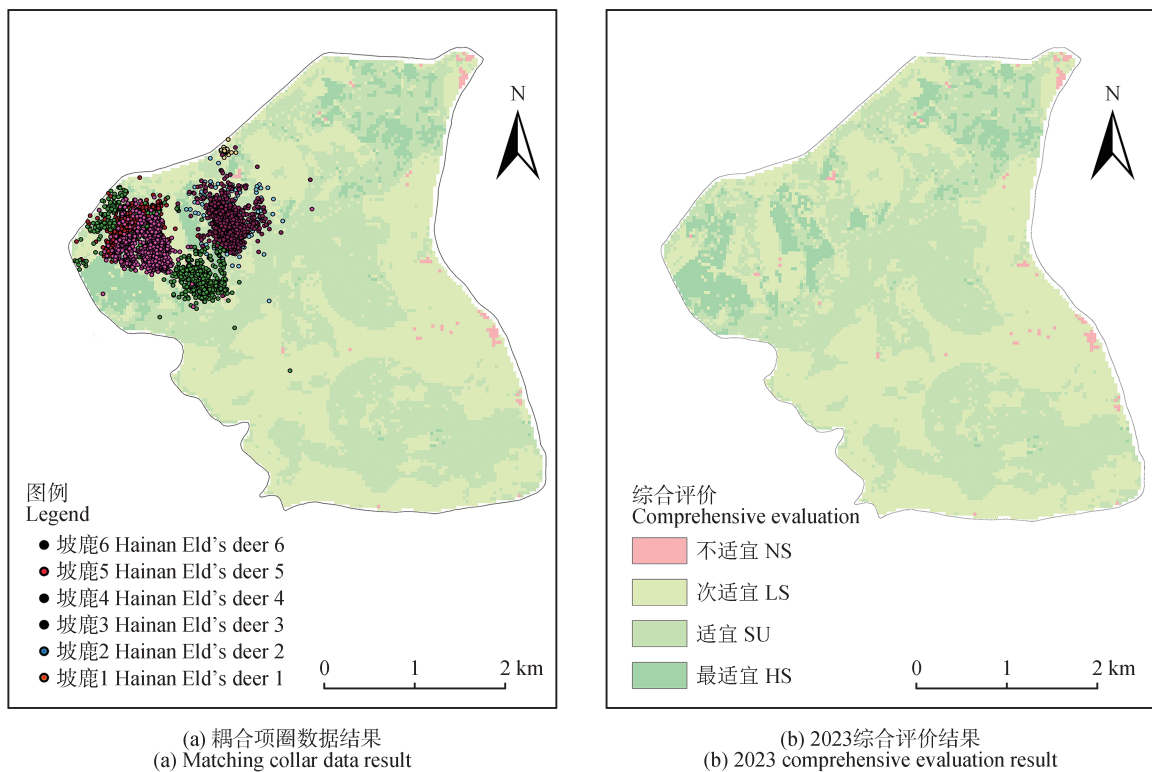


图1 HSI模型结果验证分析

Figure 1 HSI model results verification analysis

3.2 海南坡鹿栖息地适宜性空间统计分析

从空间分布看，“最适宜”区域在1988年以团块状存在于保护区西部和北部；而1993—2013年则不规则地分散在保护区西部和北部，破碎化程度较高，同时，呈片状分布在保护区南部且分布格局上无明显变化；2018年仅在保护区南部有相对完整的片状分布区域；2023年则主要集中分布在保护区西部和东北部。“适宜”和“次适宜”区域在研究期间面积占比较大，均以团块状分布在保护区内，连接性相对较强；“不适宜”区域不规则地分布在保护区边缘（图2）。

1988—2023年，大田保护区海南坡鹿栖息地评价等级为“最适宜”面积在2018年达到最大，为447.50 hm²，占保护区总面积的34.16%，1993年占比最小，仅占8.17%；“适宜”面积在2008年最大，为816.52 hm²，除1988年外，“适宜”面积均占保护区总面积的40.00%以上；“次适宜”面积在1988年最大，为689.58 hm²，2018年前大体呈下降趋势，但2023年出现明显增长，相比2018年涨幅达265.15%；在研究期间，“不适宜”面积占比均小于4.00%，1988和2023年的“不适宜”面积占比均仅为0.61%（表2）。

1988—2023年,“最适宜”面积变化较复杂。2003年以前呈先减少再增加的趋势,2003年以后大体呈先减少再增加然后再显著减少的趋势,共减少93.40 hm²;“适宜”面积呈增减反复波动的变化趋势,共增加161.13 hm²;“次适宜”面积大体呈减少趋

势,共减少67.72 hm²;“不适宜”面积大体呈先增加再减少的变化趋势,共增加0.10 hm²。“最适宜”和“适宜”两个高级别栖息地面积共增加67.73 hm²,说明在保护区生态修复和人工湖泊修建等措施下,保护区高级别栖息地适宜性整体上有所提高。

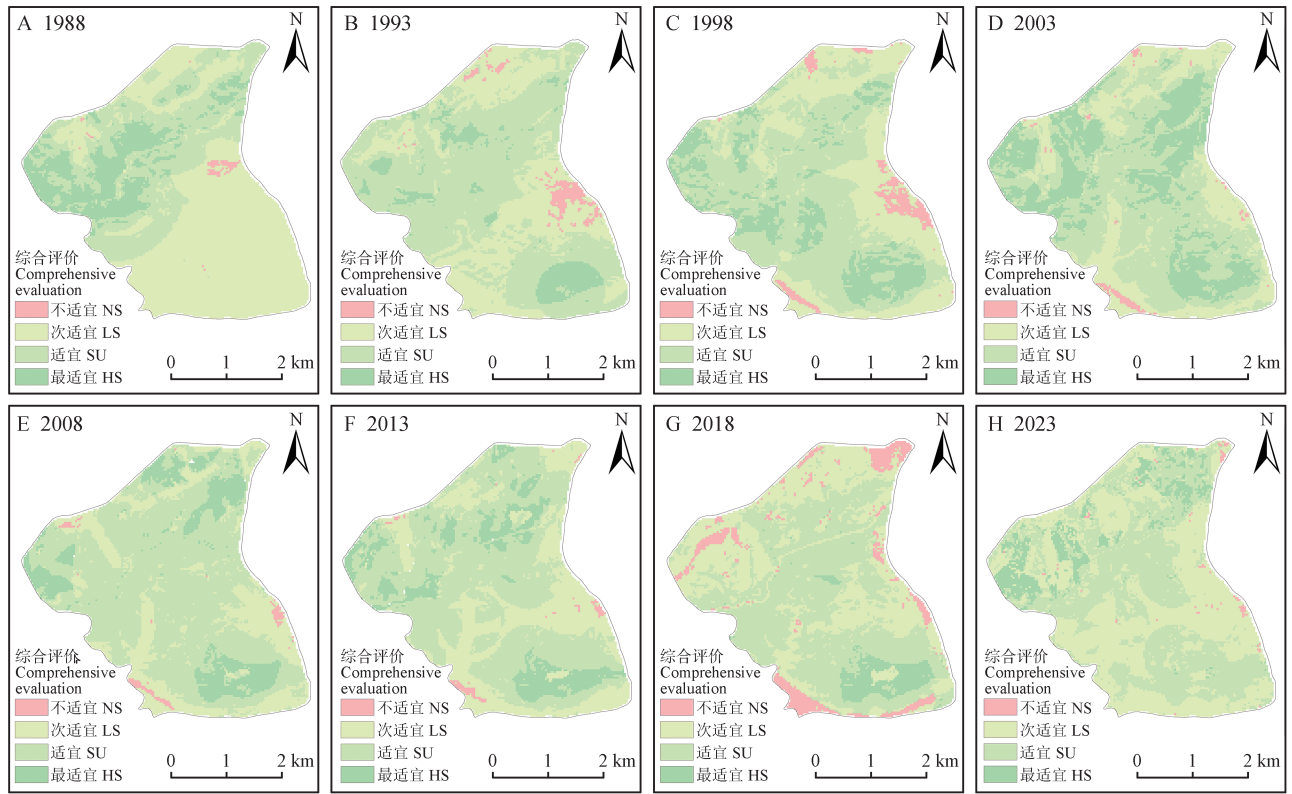


图2 1988—2023年研究区海南坡鹿栖息地综合评价结果

Figure 2 Comprehensive evaluation results of Hainan Eld's deer habitat of the study area from 1988 to 2023

表2 1988—2023年研究区海南坡鹿栖息地综合评价统计

Table 2 Statistical table of comprehensive evaluation of Hainan Eld's deer habitat of the study area from 1988 to 2023

年份 Year	不适宜 NS		次适宜 LS		适宜 SU		最适宜 HS	
	面积 /hm ² Area	占比 /% Percentage	面积 /hm ² Area	占比 /% Percentage	面积 /hm ² Area	占比 /% Percentage	面积 /hm ² Area	占比 /% Percentage
1988	7.99	0.61	689.58	52.64	407.80	31.13	204.62	15.62
1993	33.01	2.52	425.36	32.47	744.47	56.83	107.03	8.17
1998	45.46	3.47	393.66	30.05	658.01	50.23	212.88	16.25
2003	13.76	1.05	304.71	23.26	611.64	46.69	363.26	27.73
2008	13.36	1.02	303.40	23.16	816.52	62.33	176.72	13.49
2013	10.87	0.83	388.02	29.62	733.08	55.96	178.03	13.59
2018	18.73	1.43	170.30	13.00	673.60	51.42	447.50	34.16
2023	8.09	0.61	621.86	47.47	568.93	43.43	111.22	8.49

3.3 栖息地适宜性时空演变情况

1988—1993年,“次适宜→适宜”面积最多,为265.46 hm²,其次为“最适宜→适宜”,转入156.6 hm²,

此时期“适宜”面积共增加422.43 hm²;1998—2003年,“适宜→最适宜”面积最大,为178.45 hm²,“次适宜→适宜”次之,转入面积为161.30 hm²,其他

年份其他等级转入“最适宜”的面积均不超过100.00 hm²；2008—2013年，“适宜→次适宜”面积较大，为155.50 hm²，其余转入面积均不超过95.00 hm²，在一定程度上呈现出研究区海南坡鹿栖息地适宜性由高级别向低级别转移的变化趋势；2018—2023年，

转入面积最明显的为“适宜→次适宜”，达347.67 hm²，同时“最适宜→适宜”面积为258.12 hm²，此时期栖息地适宜性从高级别向低级别转移的变化趋势更加显著；“不适宜”面积在研究期间占比均较小，无明显时空演变特征(表3)。

表3 1988—2023年研究区海南坡鹿栖息地等级转移矩阵结果
Table 3 Hainan Eld's deer habitat grade transfer matrix of the study area from 1988 to 2023

转移方向 Transfer direction	1988—1993年 From 1988 to 1993	1998—2003年 From 1998 to 2003	2008—2013年 From 2008 to 2013	2018—2023年 From 2018 to 2023
不适宜→次适宜 NS→LS	7.28	34.84	6.27	11.43
不适宜→适宜 NS→SU	0.37	2.12	0.55	2.52
不适宜→最适宜 NS→HS	0	0.18	0	0.18
次适宜→不适宜 LS→NS	30.51	5.16	4.33	2.34
次适宜→适宜 LS→SU	265.46	161.30	76.41	28.98
次适宜→最适宜 LS→HS	53.28	44.43	5.35	5.58
适宜→不适宜 SU→NS	1.94	0.55	0	2.52
适宜→次适宜 SU→LS	70.70	84.71	155.50	347.67
适宜→最适宜 SU→HS	16.04	178.45	94.20	39.06
最适宜→不适宜 HS→NS	0	0	0	0.72
最适宜→次适宜 HS→LS	9.40	3.23	7.93	110.88
最适宜→适宜 HS→SU	156.60	70.88	90.24	258.12

1988—1993年和1998—2003年，海南坡鹿栖息地适宜性评价结果转移方向主要表现为由低级别向高级别，表明该时期保护区海南坡鹿栖息地适宜性有明显提升，这与管理局采取的增加人工水域、草地面积和对实验区进行人工林改造及压灌等生态措施息息相关。但在2008—2013年和2018—2023年，由高级别向低级别的转移趋势更加显著，表明保护区栖息地适宜性有明显下降，这可能与保护区近年来修建和更新防火道路、草地生态防火和新增灌溉设施等人为干扰有关。

3.4 不同等级的栖息地评价重心迁移

基于1988—2023年大田保护区海南坡鹿栖息地重心迁移结果分析可知：大田保护区海南坡鹿不同级别的栖息地重心迁移结果均围绕研究区最大的水系鹅炸河变化(图3)。1988—2023年，“次适宜”等级重心迁移幅度最小，迁移均值仅为279.10 m(表4)，而“最适宜”等级重心迁移的迁移均值达495.15 m，“适宜”等级重心迁移的迁移均值为528.79 m，“不适宜”等级重心迁移的迁移均值达518.64 m，说明1988—2023年大田保护区海南坡鹿栖息地适宜性不

同等级的区域变化较小，整体波动范围不大。

“不适宜”等级在1988—2003年出现东北—西南方向的折返运动，2003—2008年出现小幅的南下，2008—2023年整体上显著地向东北方向迁移；“次适宜”等级在1988—2003年呈“Z”字形轨迹移动，整体向东南方向偏移，2003—2008和2013—2018年向东北方向有小距离迁移，但在2018—2023年向西北方向迁移显著；“适宜”等级在1988—2008年保持“Z”字形运动轨迹，整体向东南方向偏移，2008—2018年表现出先向正西再向正北迁移的移动轨迹，2018—2023年呈明显的向西北方向迁移的态势；“最适宜”等级在1988—1993年呈明显的南下趋势，1993—2003年整体向东南方向迁移，2003—2023年表现出西北—东南的折返态势，整体向西北方向有较大幅度的位移。研究结果说明，2008—2023年保护区“最适宜”重心整体由鹅炸河北部向东北方向迁移，“适宜”重心由鹅炸河北部向鹅炸河南部的核心区迁移，保护区内适宜海南坡鹿种群活动和休憩的栖息地范围有所增加，但鹅炸河南部的核心区也存在保护区管理局对其利用率较低的问题。

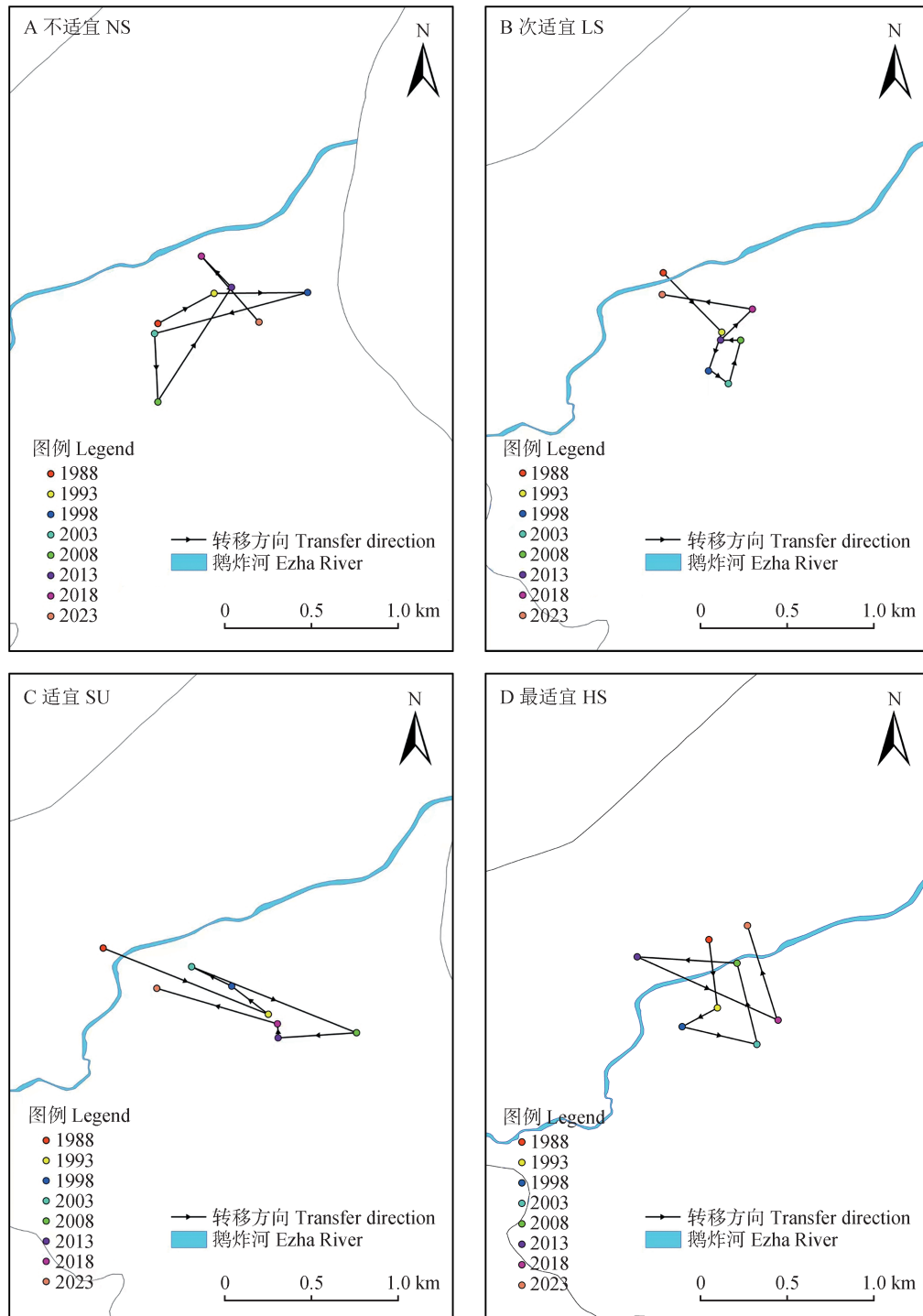


图3 1988—2023年研究区海南坡鹿栖息地重心迁移结果

Figure 3 Habitat center of gravity shift results of Hainan Eld's deer of the study area from 1988 to 2023

3.5 空间自相关分析

研究期间的大田保护区海南坡鹿栖息地适宜性全局空间自相关结果均大于0,其中,1988和1998年的Moran's *I*超过0.500,而1993、2008、2013和2023年的Moran's *I*低于0.400(图4)。研究期间研究区海南坡鹿栖息地适宜性呈显著的正相关,即高级别适

宜性栖息地与高级别适宜性栖息地呈显著正相关,低级别适宜性栖息地与低级别适宜性栖息地呈显著正相关,在一定程度上说明大田保护区内不同级别的栖息地在空间上相互影响,但空间相关性持续波动,整体呈下降趋势。

表4 不同时期研究区海南坡鹿栖息地重心迁移距离

Table 4 Habitat center of gravity migration distance of Hainan Eld's deer of the study area in different time periods

m

年份 Year	不适宜 NS	次适宜 LS	适宜 SU	最适宜 HS
1988—1993	352.04	466.95	988.64	391.34
1993—1998	510.37	233.46	259.54	220.77
1998—2003	867.63	134.65	248.10	420.77
2003—2008	392.63	262.88	987.11	478.46
2008—2013	773.34	109.07	433.61	546.69
2013—2018	242.57	247.56	87.92	850.25
2018—2023	491.91	499.14	696.64	557.80
迁移均值 Migration mean distance	518.64	279.10	528.79	495.15

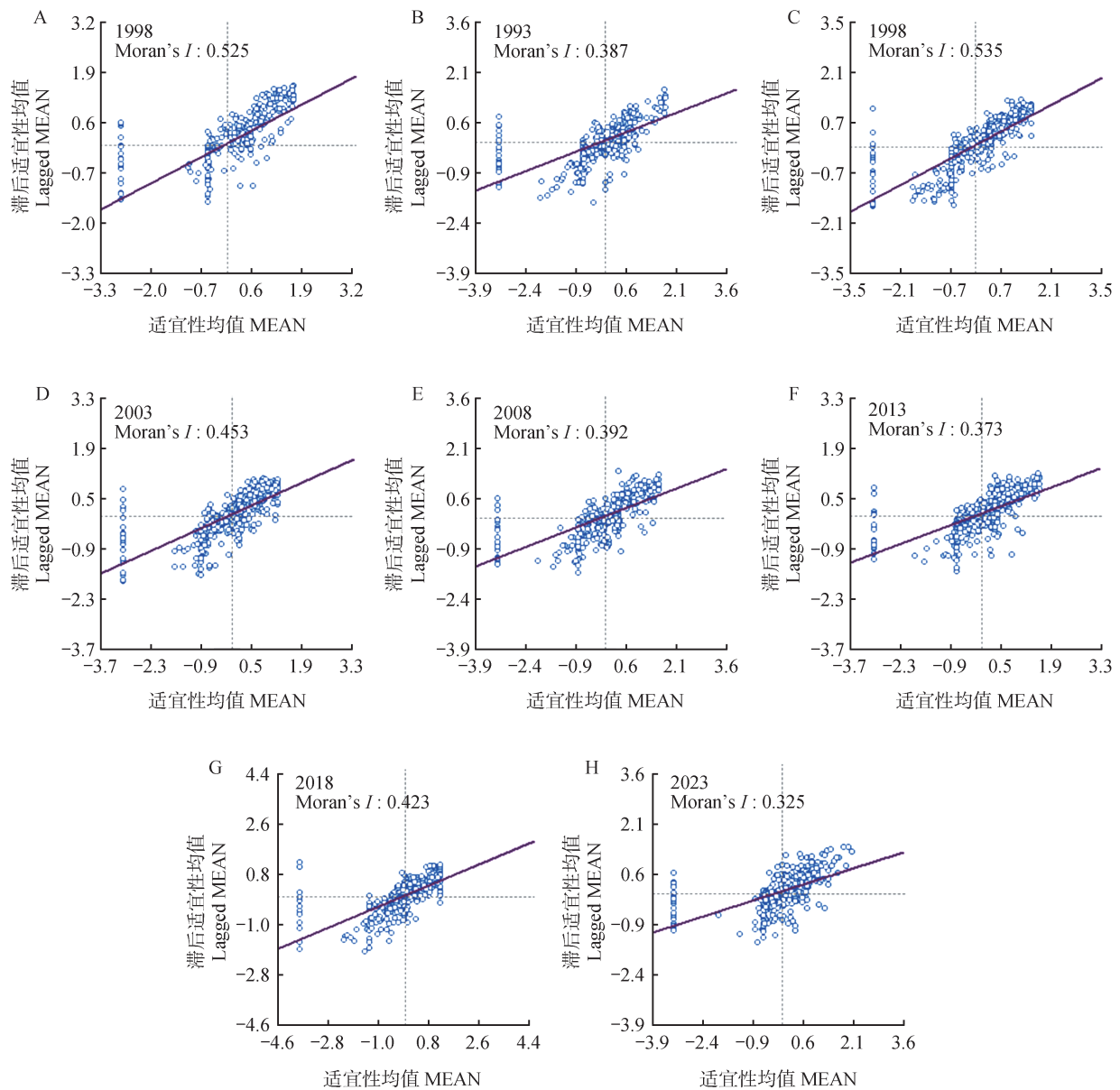


图4 1988—2023年研究区海南坡鹿栖息地适宜性全局空间自相关

Figure 4 Global spatial autocorrelation of Hainan Eld's deer habitat suitability of the study area from 1988 to 2023

为了更直观地显示大田保护区栖息地评价等级的空间分布格局,利用GeoDa软件完成研究区栖息地评价等级的LISA分析。局部自相关结果表明,保护区整体以内部为高-高集聚区(热点区域)和边缘为低-低集聚区(冷点区域)的空间分布特征为主(图5)。1988—2023年,研究区热点区域多出现在保护区西部、东北部和南部,与“最适宜”和“适宜”区域高度重合,其主要植被类型为低平地草原和稀树灌丛林,人为干扰较少,该区域是海南坡鹿种群的主要分布区。高-低或低-高集聚区分布相对较少,其主要

在高级别栖息地与低级别栖息地的交汇处,土地类型多为有林地和稀疏灌木林地,该区域有少量海南坡鹿分布。低-低集聚区的冷点区域一直围绕保护区的边缘分布,与“不适宜”区域空间分布格局一致,其用地类型多为建筑用地和植被密度过大的林地,几乎没有海南坡鹿分布。同时研究结果表明,自1993年开始,热点区域在空间上扩散到保护区的南部和北部,但其连接性和完整性也出现了明显降低,说明栖息地适宜性的空间异质性出现了一定变化。

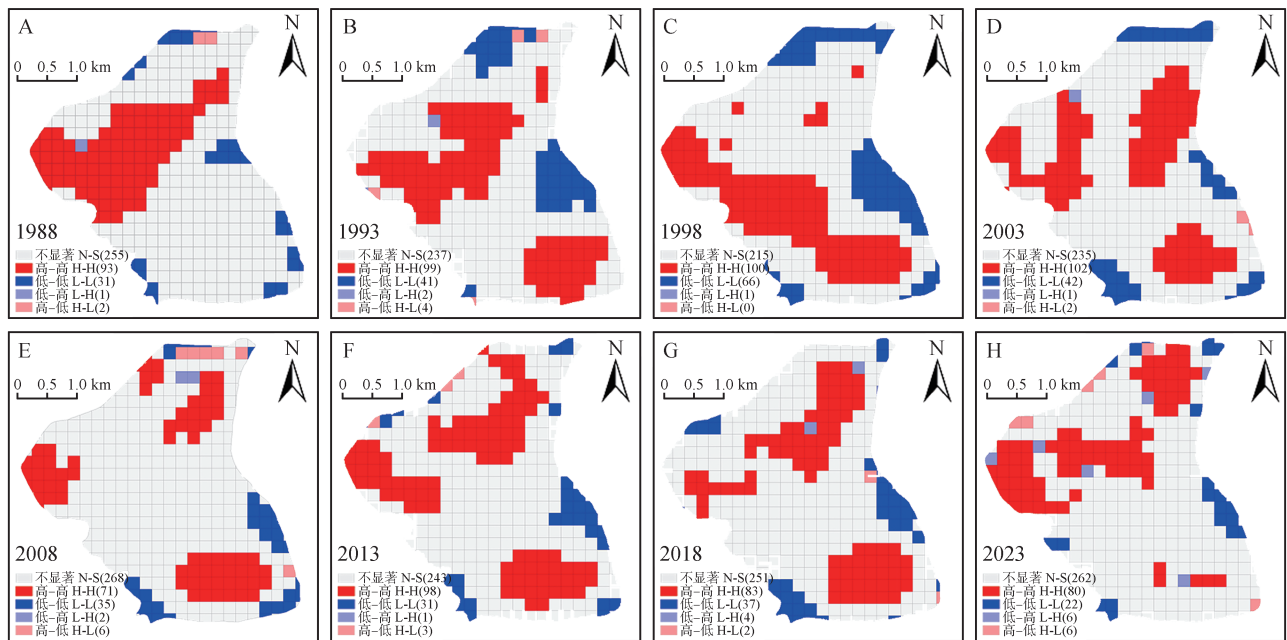


图5 1988—2023年研究区海南坡鹿栖息地适宜性局部空间自相关

Figure 5 Local spatial autocorrelation of Hainan Eld's deer habitat suitability of the study area from 1988 to 2023

4 讨论

濒危物种的保护不仅需要维持其种群数量,还要保护其栖息地,而了解和掌握物种的空间分布格局及其对栖息地的利用特征是制定相关保护和管理策略的前提和基础^[43-45]。植被类型是影响东北梅花鹿(*Cervus nippon hortulorum*)、马麝和麋鹿(*Elaphurus davidianus*)等动物选择栖息地的重要因子,在长期的进化过程中动物逐渐适应在疏林灌丛、草地等植被中进行觅食、卧息等活动^[37,39,46]。大田保护区的植被多以低平地热带草原和稀树灌丛为主,且项圈卫星追踪数据显示海南坡鹿的活动范围集中分布于保护区西部和北部,该区域的本底景观主要为热带草原、灌丛和人工草地^[27,47],说明实验区整体上较适

宜海南坡鹿的生存。水源也是影响动物选择栖息地的重要因素之一,本研究显示评价结果为“适宜”区域的面积得到显著增加(161.13 hm²),表明保护区修建人工水域、种植牧草等行为对栖息地适宜性有明显的促进作用。已有研究表明,海南坡鹿对接近水源的区域具有明显的选择性^[33],本研究结果显示高级别适宜性的栖息地重心围绕保护区最大的水系鹅炸河迁移,且“最适宜”栖息地重心距水源距离最小,与前人研究结果相吻合。池塘、湖泊等水源区域除食物资源丰富外,也能满足海南坡鹿的日常饮水需求。此外,距道路距离和距居民点距离对有蹄类动物的分布也有重要影响^[48-49]。2008—2013年和2018—2023年的转移矩阵结果表明,海南坡鹿栖息地适宜性转移方向主要表现为由高级别向低级别转

移,这可能与近年来保护区为方便监测海南坡鹿种群而新增巡护道路、防火道路等其他建筑用地带来的人为干扰有关。因此,在今后规划新的人工建筑时应充分评估其可能对海南坡鹿栖息地适宜性产生的影响。空间自相关结果显示研究区西部和北部生境最适宜海南坡鹿生存,南部有片状区域也适合海南坡鹿活动,但实际上海南坡鹿种群主要集中分布在保护区西部和北部,南部核心区鲜有海南坡鹿活动痕迹,这可能与核心区林地密度较大,海南坡鹿缺乏充足的活动空间和喜食的植物来源不足有关。

对强烈依赖自然保护区的野生动物来说,自然保护区是其栖息地保护最重要的途径和保障^[46,50],但近年来,保护区内一些原始林区和灌木丛遭到破坏^[31,33],全球气候变暖带来的气温升高和极端天气频发等影响^[5,51],外加耐旱的禾本科(Poaceae)草本植物的增加和外来物种的入侵,在一定程度上侵占了海南坡鹿的栖息空间和食物资源,使海南坡鹿面临新的生存压力^[27]。基于此,本研究从多维度出发提出海南大田坡鹿种群监测及其栖息地保护建议:(1)充分利用保护区南部核心区的高级别适宜性栖息地,可考虑采用压灌、抚育间伐和人工种植柱花草等方式改变保护区南部有林地的植被群落结构,通过合理的人为干预经营活动来扩大海南坡鹿的栖息地并进行高效利用,借助对环境因素中植被状况的改变来吸引海南坡鹿在此活动、采食,促进海南坡鹿种群数量增长。(2)对保护区西部的热带草原和东北部的灌丛草地、疏林地而言,人为干扰状况颇为严重,除生态放火、旱季种植牧草、常规保护和巡视等必要的人工干预外,保护区应从多方面降低人为干扰给海南坡鹿的影响,如减少大型交通工具的使用,减少与海南坡鹿保护无关的人为活动,合理规划保护区外围的缓冲地带从而降低外部带来的噪音干扰和开发建设干扰等,尽量给海南坡鹿相对自然的栖息地环境。(3)重视保护区内高级别栖息地破碎化问题,开展栖息地景观特征动态监测,结合多时相遥感数据,结合相应的地面调查以定期了解栖息地变化情况,对适宜性高的栖息地斑块,在注意其本身完整性的同时,如果附近存在其他适宜栖息地斑块可考虑建立走廊带,通过林地植被自然演替和人工促进更新方式建立起实际的交流通道。

5 结论

本研究综合自然因素和人为干扰因素,耦合HSI模型和GIS完成大田保护区海南坡鹿栖息地适宜性评价。结果表明,HSI模型在海南坡鹿栖息地适宜性评价方面具有良好的应用前景。水源和植被因素是影响海南坡鹿栖息地选择的重要环境因子。海南坡鹿栖息地适宜区域集中分布于保护区西部和北部,边缘区域适宜性较低。1988—2023年,“最适宜”面积变化较复杂,总面积减少93.40 hm²,重心整体向保护区东北方向迁移;“适宜”重心整体向保护区东南方向迁移且转移幅度最大,迁移均值为528.79 m,总面积增加161.13 hm²。2008—2013年和2018—2023年,栖息地由高级别向低级别转移明显,且栖息地斑块破碎化严重,这与保护区新增巡护道路、人类活动干扰等因素密切相关。栖息地空间自相关特征明显,呈持续聚集现象,热点区域由西部聚集趋向南部和北部分散分布,冷点区域则始终分布在保护区边缘地区。本研究对海南坡鹿种群分布调查的时空尺度和空间分布分析深度还存在一定的局限性,应继续针对这一问题开展系统地调查和研究,可探究不同因子对海南坡鹿栖息地适宜性影响的贡献率,强化海南坡鹿种群数量与其栖息地空间自相关特征的关联研究,为海南坡鹿的保护、管理和栖息地监测提供更多技术参考和理论依据。

参考文献:

- [1] JONES J. Habitat selection studies in avian ecology: a critical review[J]. *The Auk*, 2001, 118(2): 557-562.
- [2] LIU Z R, YIN H, WANG Y, *et al.* Research progress on animal habitat constructions from the perspective of urban biodiversity improvement [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2024, 11: 1133879.
- [3] 欧阳志云, 刘建国, 肖寒, 等. 卧龙自然保护区大熊猫生境评价[J]. *生态学报*, 2001, 21(11): 1869-1874.
OUYANG Z Y, LIU J G, XIAO H, *et al.* An assessment of giant panda habitat in Wolong Nature Reserve [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(11): 1869-1874.
- [4] 满慧, 黄保祥, 齐进哲, 等. 蟒河国家级自然保护区华北豹栖息地选择[J]. *野生动物学报*, 2022, 43(3): 585-594.
MAN H, HUANG B X, QI J Z, *et al.* North China leopard habitat selection in Manghe National Natural Reserve [J]. *Chinese Journal of Wildlife*, 2022, 43(3): 585-594.
- [5] 吴慧, 徐学红, 冯晓娟, 等. 全球视角下的中国生物多样性监测进展与展望[J]. *生物多样性*, 2022, 30(10): 196-210.

- WU H, XU X H, FENG X J, *et al.* Progress and prospect of China biodiversity monitoring from a global perspective[J]. *Biodiversity Science*, 2022, 30(10): 196–210.
- [6] 张琼悦, 邓卓迪, 胡学斌, 等. 粤港澳大湾区城市化进程对区域内鸟类分布及栖息地连通性的影响[J]. *生物多样性*, 2023, 31(3): 72–84.
- ZHANG Q Y, DENG Z D, HU X B, *et al.* The impact of urbanization on regional bird distribution and habitat connectivity in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Biodiversity Science*, 2023, 31(3): 72–84.
- [7] 魏辅文, 聂永刚, 苗海霞, 等. 生物多样性丧失机制研究进展[J]. *科学通报*, 2014, 59(6): 430–437.
- WEI F W, NIE Y G, MIAO H X, *et al.* Advancements of the researches on biodiversity loss mechanisms[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(6): 430–437.
- [8] 黄青东智, 陈刘阳, 李尚鹏, 等. 道路对三江源国家公园黄河源区藏野驴和藏原羚种群数量及其栖息地的影响[J]. *兽类学报*, 2022, 42(1): 34–48.
- HUANGQINGDONGZHI, CHEN L Y, LI S P, *et al.* Effects of roads on the abundance and habitat of Tibetan wild ass and Tibetan gazelle in the Yellow River Source Zone of Sanjiangyuan National Park[J]. *Acta Theriologica Sinica*, 2022, 42(1): 34–48.
- [9] 刘鹏, 代娟, 曹大藩, 等. 普洱市亚洲象栖息地适宜度评价[J]. *生态学报*, 2016, 36(13): 4163–4170.
- LIU P, DAI J, CAO D F, *et al.* Habitat suitability assessment for Asian elephant in Pu'er prefecture in the Yunnan Province of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(13): 4163–4170.
- [10] SHARMA S, ARUNACHALAM K, BHAVSAR D, *et al.* Modeling habitat suitability of *Perilla frutescens* with MaxEnt in Uttarakhand: a conservation approach[J]. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 2018, 10: 99–105.
- [11] BASILLE M, CALENGE C, MARBOUTIN É, *et al.* Assessing habitat selection using multivariate statistics: some refinements of the ecological-niche factor analysis[J]. *Ecological Modelling*, 2008, 211(1/2): 233–240.
- [12] BACON L, HINGRAT Y, JIGUET F, *et al.* Habitat suitability and demography, a time-dependent relationship[J]. *Ecology and Evolution*, 2017, 7(7): 2214–2222.
- [13] 袁智文, 徐爱春, 俞平新, 等. 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[J]. *生态学报*, 2020, 40(18): 6672–6677.
- YUAN Z W, XU A C, YU P X, *et al.* Habitat suitability assessment for sika deer in Qingliangfeng National Nature Reserve, Zhejiang Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(18): 6672–6677.
- [14] 曾浩威, 凌成星, 张军, 等. 基于融合MaxEnt和HSI模型的驼鹿生境适宜性评价[J]. *林业资源管理*, 2023(4): 115–122.
- ZENG H W, LING C X, ZHANG J, *et al.* Habitat suitability assessment of moose based on combined MaxEnt and HSI model[J]. *Forest Resources Management*, 2023(4): 115–122.
- [15] 滕雨欣, 张梦园, 李德政, 等. 山东省烟台市东岛咀滨海绿地鸟类多样性及栖息地适宜性评价[J]. *风景园林*, 2023, 30(5): 36–43.
- TENG Y X, ZHANG M Y, LI D Z, *et al.* Evaluation of bird diversity and habitat suitability in coastal green space of Dongdao Tsui, Yantai City, Shandong Province[J]. *Landscape Architecture*, 2023, 30(5): 36–43.
- [16] 周鑫, 张丽源, 何晨翔, 等. 基于栖息地适宜性指数模型及最大熵模型的弧边招潮蟹生境适宜性比较[J]. *大连海洋大学学报*, 2023, 38(5): 819–827.
- ZHOU X, ZHANG L Y, HE C X, *et al.* Comparison of habitat suitability of fiddler crab (*Uca arcuata*) based on habitat suitability index model and maximum entropy model[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2023, 38(5): 819–827.
- [17] 龚彩霞, 陈新军, 高峰, 等. 栖息地适宜性指数在渔业科学中的应用进展[J]. *上海海洋大学学报*, 2011, 20(2): 260–269.
- GONG C X, CHEN X J, GAO F, *et al.* Review on habitat suitability index in fishery science[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2011, 20(2): 260–269.
- [18] 陆尧, 陈新军, 汪金涛, 等. 西北太平洋柔鱼适宜栖息地动态变化研究[J]. *渔业科学进展*, 2019, 40(5): 19–25.
- LU Y, CHEN X J, WANG J T, *et al.* Dynamics of suitable habitat of *Ommastrephes bartramii* in the northwest Pacific Ocean[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2019, 40(5): 19–25.
- [19] 易炜, 郭爱, 陈新军. 不同环境因子权重对东海鲈鱼栖息地模型的影响研究[J]. *海洋学报*, 2017, 39(12): 90–97.
- YI W, GUO A, CHEN X J. A study on influence of different environmental factors weights on the habitat model for *Scomber japonicus*[J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39(12): 90–97.
- [20] 朱若雅, 许子安, 汪金涛, 等. 基于捕捞努力量的中西太平洋鳀鱼栖息地适宜性指数模型优化[J]. *广东海洋大学学报*, 2022, 42(6): 81–87.
- ZHU R Y, XU Z A, WANG J T, *et al.* Optimization of habitat suitability index models of skipjack tuna based on fishing effort in the western and Central Pacific Ocean[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2022, 42(6): 81–87.
- [21] 王志强, 陈志超, 郝成元. 基于HSI模型的扎龙国家级自然保护区丹顶鹤繁殖生境适宜性评价[J]. *湿地科学*, 2009, 7(3): 197–201.
- WANG Z Q, CHEN Z C, HAO C Y. Breeding habitat suitability evaluation of red-crown crane in Zhalong National Nature Reserve by the method of habitat suitability index[J]. *Wetland Science*, 2009, 7(3): 197–201.
- [22] 郭殿繁, 臧淑英, 那晓东. 扎龙保护区丹顶鹤栖息地适宜性评价[J]. *地理与地理信息科学*, 2015, 31(1): 54–58; 2.
- GUO D F, ZANG S Y, NA X D. Habitat suitability evaluation of red-crowned crane in Zhalong National Nature Reserve[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2015, 31(1): 54–58; 2.
- [23] RITTENHOUSE C D, THOMPSON F R, III, DIJAK W D, *et al.* Evaluation of habitat suitability models for forest passerines

- using demographic data [J]. *The Journal of Wildlife Management*, 2010, 74(3): 411-422.
- [24] 张琼, 曾治高, 孙丽风, 等. 海南坡鹿的起源、进化及保护 [J]. *兽类学报*, 2009, 29(4): 365-371.
ZHANG Q, ZENG Z G, SUN L F, *et al.* The origin and phylogenetics of Hainan Eld's deer and implications for Eld's deer conservation [J]. *Acta Theriologica Sinica*, 2009, 29(4): 365-371.
- [25] 国家重点保护野生动物名录(2021年2月1日修订)[J]. *野生动物学报*, 2021, 42(2): 605-640.
List of national key protected wild animals in China (revised on February 1, 2021)[J]. *Chinese Journal of Wildlife*, 2021, 42(2): 605-640.
- [26] 汪松. 中国濒危动物红皮书: 兽类[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 84.
WANG S. *China red data book of endangered animals: mammalia*[M]. Beijing: Science Press, 1998: 84.
- [27] 符明利, 文小梅, 冯英, 等. 大田保护区火烧草地植被对海南坡鹿栖息地的影响[J]. *热带林业*, 2018, 46(4): 33-36.
FU M L, WEN X M, FENG Y, *et al.* Effects of burning grassland vegetation in Datian Nature Reserve on *Cervus eldi hainanus* [J]. *Tropical Forestry*, 2018, 46(4): 33-36.
- [28] 符明利. 影响大田保护区海南坡鹿种群发展的主要因子及保护对策[J]. *热带林业*, 2023, 51(2): 50-53.
FU M L. Main factors and protection countermeasures affecting the development of *Cervus eldi hainanus* population in Datian Protected Area[J]. *Tropical Forestry*, 2023, 51(2): 50-53.
- [29] 王琦, 朱宜君, 颜文博, 等. 圈养和迁地坡鹿释放早期的空间行为比较[J]. *动物学杂志*, 2021, 56(4): 500-508.
WANG Q, ZHU Y J, YAN W B, *et al.* Early post-release spatial behavior of captive and introduced Eld's deer[J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2021, 56(4): 500-508.
- [30] 孙丽风, 滕丽微, 张琼, 等. 海南坡鹿对采食场地及食物的选择[J]. *动物学杂志*, 2009, 44(3): 36-42.
SUN L F, TENG L W, ZHANG Q, *et al.* Selection of Hainan Eld's deer on foraging sites and food items[J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2009, 44(3): 36-42.
- [31] 李善元. 海南坡鹿的习性与驯养[J]. *特产研究*, 1993(1): 57.
LI S Y. Habits and domestication of Hainan Eld's deer[J]. *Special Wild Economic Animal and Plant Research*, 1993(1): 57.
- [32] 周圻, 何瑞国, 李翔, 等. 海南坡鹿饲草粗蛋白质和微量元素含量与喜食性的关系[J]. *草地学报*, 2004, 12(1): 36-39.
ZHOU Q, HE R G, LI X, *et al.* A study on the relations between forage crude protein and microelements content and Eld's deer feed preference[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2004, 12(1): 36-39.
- [33] 张建飞, 冯源, 饶晓东, 等. 海南坡鹿展区模拟生境改造: 以海南热带野生动植物园为例[J]. *野生动物学报*, 2023, 44(4): 744-752.
ZHANG J F, FENG Y, RAO X D, *et al.* Simulated habitat modification at Hainan Eld's deer exhibition area: a case study from Hainan Tropical Wildlife Park and Botanical Garden [J]. *Chinese Journal of Wildlife*, 2023, 44(4): 744-752.
- [34] 周圻, 黄晓英, 何瑞国, 等. 围栏内海南坡鹿饲草相对可采食资源量测定[J]. *草业科学*, 2004, 21(11): 56-59.
ZHOU Q, HUANG X Y, HE R G, *et al.* Determination of relative edible forage biomass by Hainan Eld's deer in the enclosure [J]. *Pratacultural Science*, 2004, 21(11): 56-59.
- [35] 袁喜才, 卢柏威, 李善元. 海南坡鹿繁殖习性的研究[J]. *兽类学报*, 1988, 8(2): 89-94.
YUAN X C, LU B W, LI S Y. Reproductive behavior of brow-antlered deer, *Cervus eldi hainanus* [J]. *Acta Theriologica Sinica*, 1988, 8(2): 89-94.
- [36] 张嘉帅, 王宇, 祁娴, 等. 基于GIS的南京沿江湿地水禽栖息地适宜性评价[C]//持续发展 理性规划: 2017中国城市规划年会论文集(08城市生态规划). 东莞: 中国城市规划学会, 2017: 785-796.
ZHANG J S, WANG Y, QI X, *et al.* GIS-based habitat suitability evaluation for waterfowl in Nanjing Riverine Wetlands [C]// Sustainable development rational planning: proceedings of the 2017 China urban planning annual conference (08 urban ecological planning). Dongguan: Urban Planning Society of China, 2017: 785-796.
- [37] 王启蕃, 陈红, 牛莹莹, 等. 黑龙江省老爷岭南部东北梅花鹿栖息地适宜性评价及廊道构建[J]. *兽类学报*, 2023, 43(5): 489-500.
WANG Q F, CHEN H, NIU Y Y, *et al.* Habitat suitability evaluation and corridor construction for sika deer (*Cervus nippon hortulorum*) in southern Laoyeling, Heilongjiang Province [J]. *Acta Theriologica Sinica*, 2023, 43(5): 489-500.
- [38] 胡继平, 杨筱, 姜鑫贵, 等. 基于层次分析法的野生动物及其栖息地生态影响评价研究[J]. *西部林业科学*, 2022, 51(3): 24-31.
HU J P, YANG X, JIANG X G, *et al.* A system of ecological impact assessment of wildlife and its habitat based on AHP [J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2022, 51(3): 24-31.
- [39] 张洪峰, 胡罕, 苏丽娜, 等. 青海三江源自然保护区马麝栖息地适宜性评价[J]. *西北农业学报*, 2017, 26(8): 1141-1147.
ZHANG H F, HU H, SU L N, *et al.* Habitat suitability assessment of musk deer (*Moschus sifanicus*) in Sanjiangyuan Nature Reserve, Qinghai Province [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2017, 26(8): 1141-1147.
- [40] 魏静, 刘丽丽, 王红云, 等. 1990—2020年太行山区土地利用景观格局时空变化[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(7): 1123-1133.
WEI J, LIU L L, WANG H Y, *et al.* Spatiotemporal patterns of land-use change in the Taihang Mountain (1990-2020)[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(7): 1123-1133.
- [41] 李蕊, 陈国清, 李玮贤, 等. 基于遥感生态指数的神东矿区1995—2020年生态环境质量的时空变化特征分析[J]. *水土*

- 保持通报, 2021, 41(3): 143-151.
- LI R, CHEN G Q, LI W X, *et al.* Spatiotemporal analysis of eco-environmental benefits in Shenfu-Dongsheng mining area during 1995-2020 based on RSEI[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(3): 143-151.
- [42] 何钊全, 尚雪, 张铜会, 等. 近20年陕北黄土丘陵区景观生态风险时空变化及其冷热点格局[J]. *生态学杂志*, 2023, 42(10): 2514-2525.
- HE Z Q, SHANG X, ZHANG T H, *et al.* Spatiotemporal variations of landscape ecological risk and its cold-hot spot pattern in the loess hills of northern Shaanxi over the past 20 years[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(10): 2514-2525.
- [43] ZHU S X, LI L, WU G S, *et al.* Assessing the impact of village development on the habitat quality of Yunnan snub-nosed monkeys using the INVEST model [J]. *Biology*, 2022, 11(10): 1487.
- [44] ANGOLD P G, SADLER J P, HILL M O, *et al.* Biodiversity in urban habitat patches [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 360(1/2/3): 196-204.
- [45] 龚旭, 付强, 王磊, 等. 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[J]. *生态学报*, 2020, 40(14): 4842-4851.
- GONG X, FU Q, WANG L, *et al.* Habitat suitability assessment and overlap analysis of *Rusa unicolor* and *Budorcas taxicolor* in Anzihe Reserve, Sichuan Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(14): 4842-4851.
- [46] 杨丽雯, 张渊媛, 杨峥, 等. 基于最大熵模型的麋鹿潜在栖息地分析与保护对策[J]. *生态学杂志*, 2024, 43(8): 2539-2550.
- YANG L W, ZHANG Y Y, YANG Z, *et al.* Potential habitat analysis and future conservation strategies of Péré David's deer based on MaxEnt model [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(8): 2539-2550.
- [47] 朱宜君. 海南坡鹿的运动生态学研究[D]. 汉中: 陕西理工大学, 2021.
- ZHU Y J. Movement ecology of the Hainan Eld's deer [D]. Hanzhong: Shaanxi University of Technology, 2021.
- [48] 周靖杰. 公路对黑龙江省林区有蹄类动物的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
- ZHOU J J. The highway's influence on ungulate in Heilongjiang Province [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011.
- [49] 李莹, 徐文轩, 杨维康, 等. 卡拉麦里山有蹄类自然保护区鹅喉羚生境适宜性评价[J]. *兽类学报*, 2010, 30(1): 11-20.
- LI Y, XU W X, YANG W K, *et al.* Habitat suitability assessment of *Gazella subgutturosa* in Kalamaili Mountain Nature Reserve [J]. *Acta Theriologica Sinica*, 2010, 30(1): 11-20.
- [50] 王丽冰, 颜亨梅, 卢学理, 等. 海南猴猕岭自然保护区野放海南坡鹿的生境选择[J]. *四川动物*, 2010, 29(6): 929-932.
- WANG L B, YAN H M, LU X L, *et al.* Habitat selection of the released Hainan Eld's deer in Houmiling Nature Reserve [J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2010, 29(6): 929-932.
- [51] 符运南, 何斌斌, 王菊, 等. 大田海南坡鹿保护区生境改造及重建的探讨和研究[J]. *热带林业*, 2016, 44(4): 26-30.
- FU Y N, HE B B, WANG J, *et al.* Discussion and research on habitat reform and reconstruction of Hainan Eld's deer protection area in Datian Town [J]. *Tropical Forestry*, 2016, 44(4): 26-30.