

基于 MaxEnt 模型的湖北石首麋鹿国家级自然保护区散养麋鹿夏季生境适宜性评价

杨超¹ 范韦莹^{1,3} 蔡晓斌¹ 王学雷¹ 张玉铭² 李鹏飞²¹

(1. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院/环境与

灾害监测评估湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 湖北石首麋鹿国家级自然保护区管理处, 湖北 石首 434400;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

【摘要】: 科学评价散养麋鹿(*Elaphurus davidianus*)生境的适宜性, 可为散养麋鹿生境改造及野化麋鹿栖息地保护与管理提供科学依据。为了开展湖北石首麋鹿国家级自然保护区围栏内散养麋鹿的生境改造和有效管理, 2019年5~8月, 采用无人机航拍和实地调查获取了围栏内散养麋鹿的分布位点数据, 并基于 GoogleEarth 影像数据对麋鹿生境类型进行面向对象的解译分类, 分析了散养麋鹿种群的分布与不同生境类型的关系, 运用 MaxEnt 模型对围栏内散养麋鹿夏季的生境适宜性进行了评价。结果显示, MaxEnt 模型的评价效果达到了优秀水平(训练集 AUC=0.910), 裸地距离、泥滩地距离和林地距离是夏季麋鹿生境的主要环境特征变量, 综合贡献值分别为 35.2%、34.5%和 15.7%。生境因子的敏感性分析表明, 随着距泥滩地距离、低草地距离、裸地距离的增加, 生境适宜度逐渐降低, 散养麋鹿的出现概率也逐渐降低; 保护区核心区内麋鹿生境适宜区类型主要以低草地和泥滩地为主, 适宜区面积为 338.84hm², 占核心区总面积的 27.41%。夏季麋鹿在保护区内倾向于栖息在保护区核心区中南部的泥滩地、低草地和裸地等生境类型上, 在该保护区有限环境容纳量的背景下, 应加强保护区内部麋鹿适宜栖息地生境类型的营造, 同时推动新的麋鹿迁地保护区建立。

【关键词】: 麋鹿 MaxEnt 模型 生境适宜性 生境修复 湖北石首麋鹿国家级自然保护区

【中图分类号】: Q958.1 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)02-0336-09

物种保护不仅要保护物种种群, 更要保护它们的生境, 对珍稀濒危有蹄类野生动物而言尤为重要^[1,2]。因此, 明确物种的生境需求及其适宜生境的空间分布格局, 是保护野生动物生境的关键前提和基础^[3]。

作者简介: 杨超(1990~), 男, 助理研究员, 主要研究方向为湿地生态与环境遥感. E-mail: cyang@apm.ac.cn; 张玉铭 E-mail: zhangym01@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41801100)

目前, 预测物种适宜生境空间分布的模型可分为机理模型、回归模型和生态位模型^[4]。其中, 机理模型依据物种的生理生态需要进行建模预测, 但对生境因子的等级划分及权重确定上存在较强的主观性^[5]; 回归模型往往需要获取真实可靠的“非出现点”数据才能够较准确预测, 而此类数据往往比较难以获取^[6]; 作为生态位模型的代表, 最大熵模型(MaxEnt)基于生态位原理, 通过应用物种分布位点数据和环境变量数据, 能对物种生境适宜性进行评价^[7,8]。该模型避免了机理模型的主观性和回归模型输入参数不容易获取等缺点, 在涉及少量样本时具有更高的预测准确性^[9,10]。目前该模型已被广泛应用于白头叶猴^[11]、野牛^[12]、豹猫^[13]、岩羊^[14]、川金丝猴^[15]、大熊猫^[16]、中华斑羚^[17]、雪豹^[18]等珍稀濒危物种的生境适宜性评价中。

麋鹿为大型有蹄类、典型湿地物种、中国特有种, 国家 I 级重点保护野生动物, 曾广泛分布于长江中下游沼泽平原湿地, 约 1900 年在中国绝迹^[19,20]。中国于 1985 年起开始实施麋鹿重引入项目, 先后引入 94 头麋鹿至湖北石首麋鹿国家级自然保护区。受 1998 年特大洪水的影响, 部分麋鹿从该保护区围栏内逃逸至长江中游荆江段两岸的洲滩及洞庭湖区, 经过 20 多年的自然繁衍, 成功恢复野化种群且规模不断扩大^[21]。目前长江中游地区麋鹿总数量已超过 1200 头, 其中保护区外的野化麋鹿约 320 头^[22]。国内外的研究学者针对麋鹿及其重引入栖息地开展了诸多研究, 主要包括麋鹿种群数量及分布^[22,23]、物种行为^[24,25]、活动规律^[26,27]、生境选择及家域特征^[28,29]等方面, 有关麋鹿生境适宜性的研究主要通过构建生境评价指标体系来进行评估^[30,31], 尚未见基于生态位原理的麋鹿生境适宜性评估方面的报道。

本研究基于 GoogleEarth 影像数据, 对湖北石首麋鹿国家级自然保护区围栏内散养麋鹿的生境类型进行面向对象的解译分类, 并结合无人机航拍与实地调查获取散养麋鹿的分布点数据, 运用 MaxEnt 模型对研究区内麋鹿的分布与各生境类型的关系进行分析, 对散养麋鹿的生境适宜性进行了评价。

1 研究区概况

本文研究区域为湖北石首麋鹿国家级自然保护区(以下简称“石首麋鹿保护区”或“保护区”)的核心区与实验区, 该区域建设有围栏与缓冲区隔开, 为保护区内麋鹿的主要活动区域, 总面积约 1236hm²(图 1)。石首麋鹿保护区位于长江与长江天鹅洲故道的西南夹角处, 湖北省石首市境内, 地理坐标为 112° 31' 36" E~112° 37' 30" E, 29° 47' 11" N~29° 51' 45" N, 总面积为 1567hm²。保护区始建于 1991 年, 1998 年晋升为国家级自然保护区, 2020 年被列入《国家重要湿地名录》, 其主要保护对象是麋鹿及其生境。保护区属亚热带季风气候区, 年均气温 16.5℃, 年均降水量 1200mm 以上^[29]。保护区内有杨树林群落、旱柳林群落等 3 种类型木本湿地植被, 芦苇+荻群落、狗牙根群落、益母草群落等 11 种类型草本湿地植被, 麋鹿采食植物有禾草类、莎草类、豆科草类和杂草类共计 129 种, 占保护区植物总种数的 40.31%^[32]。

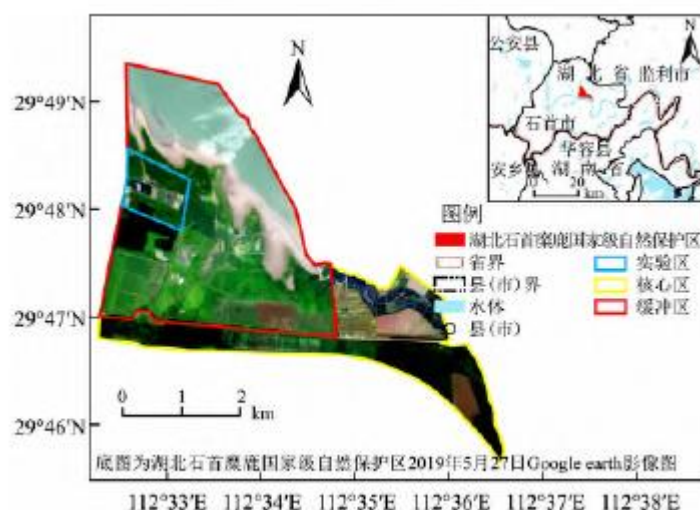


图 1 湖北石首麋鹿国家级自然保护区位置及功能分区图

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

麋鹿出现点数据来源于 2019 年 5~8 月在保护区围栏内采集的无人机航拍照片。利用大疆“御”Mavic2 专业版无人机航拍器共进行了 16 次采集,其中 5 月份 2 次,6 月份 3 次,7 月份 5 次,8 月份 6 次,每次无人机航拍时间均为当天早上的 7 时至 9 时,确保每次航拍覆盖围栏区及所有麋鹿种群。无人机调查共获取了 405 张航拍照片,结合现场踏勘确认,筛选出 69 张有麋鹿种群的无人机相片,提取相片中心点经纬度坐标,作为麋鹿的出现点数据。

基于 eCognition 软件平台,对 2019 年 5 月 27 日石首麋鹿保护区的 GoogleEarth 影像进行面向对象的分类,分类器选择随机森林,除原始影像数据外,增添纹理特征和形状特征。对保护区内水体、泥滩地、低草地、林地、芦苇地、裸地、道路、建筑物等分布进行自动解译,完成后采用实地踏查和目视解译人机交互修改错分图块,最终解译精度为 90.7%,可以满足需要。

2.2 最大熵值(MaxEnt)模型

最大熵值(MaxEnt)模型是一种基于生态位原理的物种分布预测模型,由 Phillips 团队于 2004 年利用 JAVA 语言编写开发^[8]。该模型利用有限的物种“出现点”及相关的环境变量数据组成训练样本,建立约束条件,探寻在此约束条件下的最大熵的可能分布,即探寻与物种分布点的环境变量特征相同的像元,并将推算结果投射至不同的时间和空间中来预测物种的潜在分布^[33]。该模型主要应用于评价指定物种在给定环境条件下适宜性以及预测物种在研究区潜在生境分布。模型结果以物种出现的概率来体现,值越大,则表明环境条件越适宜于物种生存。

2.2.1 环境变量选取及处理

生境适宜性评价中环境变量的选取尚无统一的规定,根据目标物种、研究目的及研究区域的不同所选取的环境变量也存在一定的差异^[34]。观测研究表明,食物、水源及人为干扰是影响麋鹿分布的主要环境因子^[35]。石首麋鹿保护区位于长江中游冲积平原上,地形平坦、气候差异不显著,环境变量中的气候、地形等因子可以忽略不计,人为干扰主要来自于保护区内的日常巡护活动。在保护区内,麋鹿对其生境具有一定的选择性,其活动区域与生境类型密切相关。

综合考虑环境变量获取的难易程度、变量间的相关性以及研究区地理环境特征等因素,选取植被、水源、人为干扰及生境类型 4 大类因子 9 个环境变量。其中植被因子包括林地、低草地和芦苇地的分布,水源因子为水体分布,人为干扰因子包括道路和建筑物分布,生境类型包括裸地、泥滩地等利用类型分布。以距离各生境类别的欧式距离作为模型预测的环境变量,在 ArcGIS 平台上根据属性提取不同类别作为新的图层,分别进行欧式距离计算,获得各类别的距离图层。将各生境类型图层和距离图层输出为 ASCII 格式,统一为 WGS84 地理坐标系统,导入 ArcGIS 软件中,转换成浮点型栅格数据,作为 MaxEnt 模型输入的环境变量。

2.2.2 模型构建与模拟方法

将麋鹿出现点数据和环境变量数据导入模型中,随机选取 75%的出现点用于建立模型,剩余 25%的点用于验证模型。经过多次试验,将最大迭代次数设置为 4000,其他参数为默认参数。采用刀切法(Jackknife)分析工具在模型运行过程中判断各环境因子对物种分布影响的权重值^[36]。

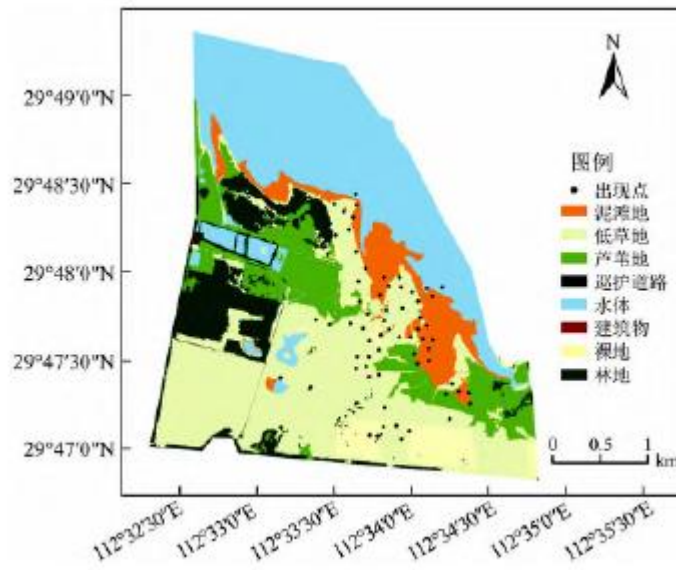


图 2 湖北石首麋鹿国家级自然保护区生境类型及 2019 年 5~8 月麋鹿出现点分布图

采用受试者工作特征曲线 (Receiver Operating Characteristic Curve, ROC 曲线) 下的面积值, 即 AUC 值 (Area Under Curve) 评价模型预测精确性, 一般认为 AUC 为 0.5~0.6 时表明模拟失败; 0.6~0.7 时表明模拟效果较差, 0.7~0.8 时表明模拟效果一般, 0.8~0.9 时表明模拟效果较好; 大于 0.9 时表明预测效果最优^[25]。模型重复预测 10 次, 并将在 ROC 曲线下具有最大 AUC 值的组作为最终预测结果。

MaxEnt 模型输出结果为值在 0~1 之间的连续栅格数据, 表示潜在的物种分布概率, 值越接近 1, 说明存在的概率越高^[33]。为更直观表示物种潜在分布的区域, 本文以 0.1 为间隔进行了分级, 并根据专家经验法^[4, 37, 38]确定适宜区和非适宜区的阈值为 0.2, 在此基础上进行了次适宜区 (0.2~0.4)、较适宜区 (0.4~0.6) 和最适宜区 (0.6~1) 的区分。

3 结果分析

3.1 模型预测结果评估

ROC 曲线结果表明, 训练集和验证集的 AUC 值分别为 0.910 和 0.915, 表明 MaxEnt 模型预测结果达到了优秀水平, 模型预测结果合理、可靠, 可以用于麋鹿生境适宜区的研究分析。

3.2 麋鹿生境与环境变量的关系

MaxEnt 模型对各环境变量的贡献度分析结果显示, 裸地距离的贡献度最大, 达到了 35.2%, 泥滩地距离贡献度次之, 为 34.5%, 而后为林地距离 (15.7%)、道路距离 (4.3%)、土地覆被类型 (4%), 以上 5 个环境变量累积贡献度达 93.7%。

刀切法分析检验结果显示, 距泥滩地距离、距裸地距离、距道路距离等生境因子对预测结果的增益较大, 表明这些变量在预测麋鹿栖息地适宜性时包含了比其他变量更多的有用信息, 麋鹿的分布概率变化对这些因子比较敏感, 这也与模型贡献率较大的几个环境因子相一致。

环境变量对预测概率贡献值的响应结果曲线如图 5 所示, 各生境因子的敏感性分析表明, 随着距泥滩地距离、裸地距离、低

草地距离的增加，生境适宜度逐渐降低，麋鹿的出现概率也逐渐降低，表明麋鹿偏好于栖息在这些生境类型中。麋鹿栖息地适宜性对芦苇地距离、道路距离、林地距离的响应关系呈单峰型，即在一定的距离范围内，随着距离的增加适宜性增加，达到峰值后随着距离的增大而出现概率降低。

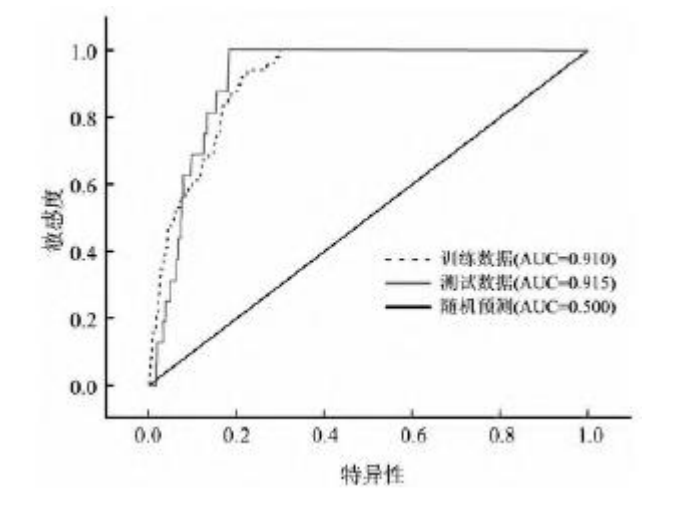


图 3 麋鹿生境分布预测结果 ROC 曲线验证

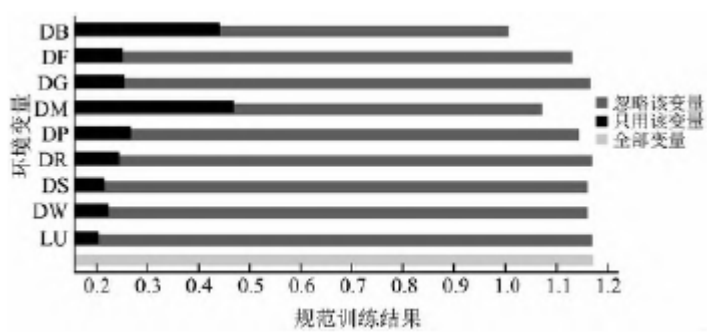


图 4 基于刀切法检验的环境变量重要性分析

表 1 麋鹿栖息地适宜性影响因子重要性分析

环境因子	环境变量简称	环境变量含义	贡献度(%)
生境类型	DB	距裸地距离	35.2
	DM	距泥滩地距离	34.5
	LU	土地覆被类型	4.0
植被	DF	距林地距离	15.7
	DR	距芦苇地距离	1.4
	DG	距低草地距离	0.4

人为干扰	DP	距道路距离	4.3
	DS	距建筑物距离	3.5
水源	DW	距水体距离	1.1

3.3 麋鹿生境适宜区分布

由 MaxEnt 模型得出的麋鹿栖息地适宜性评价结果显示(图 6),石首麋鹿保护区围栏内适宜麋鹿栖息的区域分布较为集中,空间分布上来看主要位于保护区核心区中南部的泥滩地及其周围的裸地、低草地,靠近自然水体区域。经过统计分析,研究区域内麋鹿栖息地最适宜区面积为 52.05hm²,较适宜区面积为 116.65hm²,次适宜区面积为 170.14hm²,适宜区总面积为 338.84hm²,约占核心区总面积的 27.41%。适宜区内土地覆被类型有水体、裸地、泥滩地、低草地和芦苇地等。

4 讨论

4.1 模型适用性

随着卫星遥感、无人机等技术的快速发展,生态位模型中物种出现点和环境变量数据的获取更加高效、快捷^[39,40],尤其是在中小尺度濒危物种的生境适宜性评估方面,发挥着重要的作用。

濒危野生动物生活的区域往往难以到达,物种数量及环境变量的调查需要花费大量的人力、物力且易出现遗漏和数量偏差。相较于野外样线或红外相机,无人机可以在短时间内完成较大面积的野生动物调查,对观察对象几乎没有影响且可以准确地记录每一个动物出现点^[41]。通过无人机获取物种出现点数据,能够涵盖所有动物种群,较好的弥补了因出现点数据不足导致的模拟结果失真问题^[42]。此外,通过遥感数据衍生的如植被指数和土地覆被图等,能够作为评估栖息地适宜性的环境变量,尤其是在生物多样性丰富而数据缺乏的区域^[43,44]。

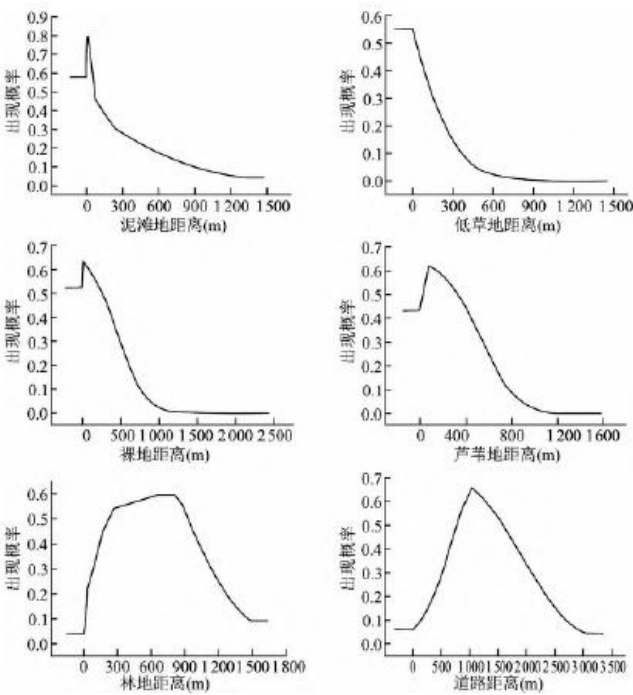


图 5 各环境变量对模型预测结果的反应曲线

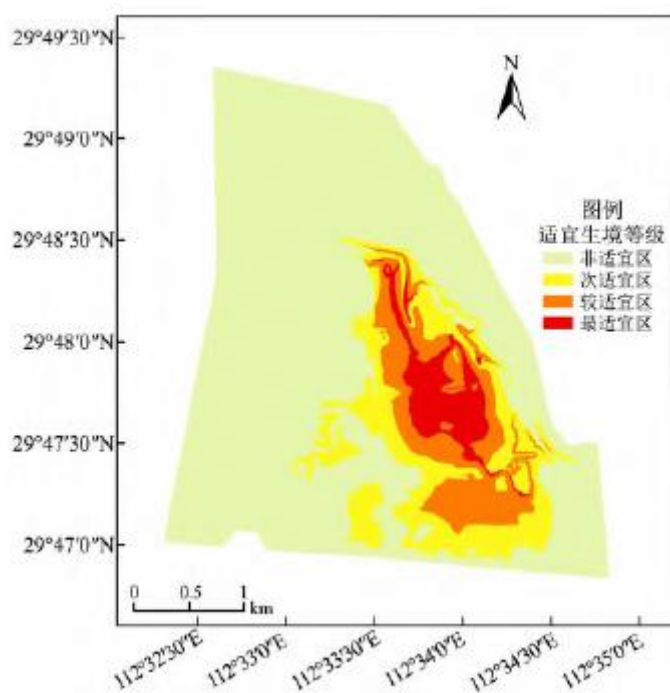


图 6 湖北石首麋鹿国家级自然保护区麋鹿适宜生境分布

本研究结果证实，借助高分辨率的卫星影像数据、无人机航拍物种出现点数据以及基于生态位原理的 MaxEnt 模型，能够较好的反映中小尺度濒危野生动物的生境适宜性，尤其是在缺乏基础资料的重要自然保护地。

4.2 模型环境变量选取

影响物种地理分布格局的环境因素通常包括气候、地形、植被、土壤、土地利用类型以及人为干扰等^[45]。利用 MaxEnt 模型预测物种分布时通常选择地形因子、土地利用类型因子和气候因子 3 类环境变量构建模型^[46]。

已有实地观测研究表明，保护区内的麋鹿对栖息生境具有一定的选择性，其活动区域与生境类型密切相关，受各生境类型距离的影响较大^[29, 47]。在春季和秋季，麋鹿会较多的选择滩涂和水域；夏季，麋鹿经常选择在靠近水域附近，表现出明显的随着水位的变化而不断往高处迁移的活动规律；冬季，食物是影响麋鹿生境选择的决定性环境因子，麋鹿通常选择在食物丰富的草地上取食和休息^[47, 48]。本研究中气候、地形等环境变量几乎可以忽略不计，保护区内的人为干扰也较少。因此，基于麋鹿生境类型的分布结果，选取植被、水源、人为干扰及生境类型等环境变量，进行保护区内散养麋鹿夏季生境适宜性评价。本文暂未考虑植被种类、生物量或遮蔽度等通过卫星影像难以直接获取的生境因子，今后的研究可进一步扩展麋鹿生境选择的影响因素。

4.3 麋鹿栖息地保护与管理

动物生境选择的决定因素是水源、食物和遮蔽度^[49]。前期已有研究表明，石首麋鹿保护区围栏内的麋鹿在春夏季节会选择栖息在生长着大量可食或喜食水生植物的水陆交界处，进食后就近趴卧于有浅水淤泥的水洼地或季节性水塘周围进行反刍^[29, 50]。而长江中游洞庭湖区的野生麋鹿在此季节通常选择草地作为主要取食生境，滩涂和水域作为休息和娱乐的场所^[28, 35]。大丰麋鹿则在此季节选择靠近浅水洼地的、相对株高和生物量较低的互花米草群落区域栖息^[51]。

本文研究结果同样表明：麋鹿在保护区内倾向于栖息在水陆交界的泥滩地、低草地和裸地等生境类型上，尤其是在保护区核心区中南部的泥滩地及其周围的裸地、低草地等区域。由保护区管理部门开展生境改造而形成的泥滩洼地区域也具有较高的生境适宜性，成为了麋鹿活动较为频繁的区域^[29, 50]，这表明通过加强保护区内部人工栖息地改良与适宜微生境的营造，加快生境类型的转变，能够增加麋鹿适宜栖息区面积。

此外，植被的季节性变化也会对麋鹿的分布产生一定程度的影响^[50]，在不同的季相下，麋鹿生境类型亦会有所不同。如保护区内的裸地一部分为原有的低草地因被麋鹿啃食和踩踏而变得稀疏；另一类是保护区自行开辟的应急饲料基地，主要用于在食物匮乏时种植牧草供麋鹿进食，因而在遥感影像上呈现出与裸地一致的光谱特征。基于现有的数据源，本研究仅考虑了单一季节下麋鹿生境的适宜性，今后可结合季相变化开展生境适宜性的动态演变研究。

5 结论与建议

本研究通过 GoogleEarth 影像数据及麋鹿分布位点数据，运用 MaxEnt 模型对石首麋鹿国家级自然保护区围栏内散养麋鹿夏季的生境适宜性进行了评价。得出以下结论：(1)MaxEnt 模型在保护区尺度内评价物种生境的适宜性是可行的、有效的，能够取得较好的预测评价结果；(2)夏季保护区内的散养麋鹿倾向于栖息在泥滩地、低草地和裸地等生境类型上；(3)麋鹿的适宜栖息地位于保护区核心区中南部的泥滩地及其周围的裸地、低草地等区域。

主要建议如下：

(1)在石首麋鹿保护区有限环境容纳量的背景下，应当加强保护区内部泥滩地、水塘等适宜麋鹿栖息地生境类型的营造，恢复与改造不适宜生境区，扩大适宜生境区的面积。

(2)加强长江中游及洞庭湖区野生麋鹿栖息地及物种种群的监测研究，通过卫星遥感影像结合生态位模型的方法，对野生麋鹿种群与环境变量关系开展模拟、预测其生境适宜区，推动建立新的麋鹿迁地保护区。

参考文献：

- [1]WILSON J W, SEXTON J O, JOBE R T, et al. The relative contribution of terrain, land cover, and vegetation structure indices to species distribution models[J]. Biological Conservation, 2013, 164:170-176.
- [2]吴文, 李月辉, 胡远满, 等. 小兴安岭南麓马鹿冬季适宜生境评价[J]. 生物多样性, 2016, 24(1):20.
- [3]曹铭昌, 刘高焕, 单凯, 等. 基于多尺度的丹顶鹤生境适宜性评价——以黄河三角洲自然保护区为例[J]. 生物多样性, 2010, 18(3):283-291.
- [4]刘振生, 高惠, 滕丽微, 等. 基于 MAXENT 模型的贺兰山岩羊生境适宜性评价[J]. 生态学报, 2013, 33(22):7243-7249.
- [5]HIRZEL A H, HELFER V, METRAL F. Assessing habitat-suitability models with a virtual species[J]. Ecological Modelling, 2001, 145(2-3):111-121.
- [6]WILSEY C B, LAWLER J J, CIMPRICH D A. Performance of habitat suitability models for the endangered black-capped vireo built with remotely-sensed data[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 119:35-42.

-
- [7]邢丁亮, 郝占庆. 最大熵原理及其在生态学研究中的应用[J]. 生物多样性, 2011, 19(3):295.
- [8]PHILLIPS S J, DUDÍK M, SCHAPIRE R E. A maximum entropy approach to species distribution modeling[C]//Twenty-first international conference on Machine learning-ICML. July 4-8, 2004. Banff, Alberta, Canada. New York:ACM Press, 2004:655-662.
- [9]MATYUKHINA D S, MIQUELLE D G, MURZIN A A, et al. Assessing the influence of environmental parameters on Amur tiger distribution in the Russian far east using a MaxEnt modeling approach[J]. Achievements in the Life Sciences, 2014, 8(2):95-100.
- [10]PHILLIPS S J, DUDÍK M. Modeling of species distributions with MaxEnt: New extensions and a comprehensive evaluation[J]. Ecography, 2008, 31(2):161-175.
- [11]席庆. 基于 GIS 技术的白头叶猴潜在分布研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2009.
- [12]李明阳, 巨云为, Sunil Kumar, 等. 濒危野生动物潜在生境空间建模方法——以印度野牛 (*Bos gaurus*) 为例[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(5):88-91.
- [13]WILTING A, CORD A, HEARN A J, et al. Modelling the species distribution of Flat-headed cats (*Prionailurus planiceps*), an endangered South-East Asian small felid[J]. PLoS One, 2010, 5(3):e9612.
- [14]迟翔文, 江峰, 高红梅, 等. 三江源国家公园雪豹和岩羊生境适宜性分析[J]. 兽类学报, 2019, 39(4):397.
- [15]王袁. 基于 MaxEnt 模型的神农架川金丝猴不同季节生境识别[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
- [16]戎战磊, 周宏, 韦伟, 等. 基于 MAXENT 模型的唐家河自然保护区大熊猫生境适宜性评价[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2017, 53(2):269-273, 278.
- [17]唐书培, 穆丽光, 王晓玲, 等. 基于 MaxEnt 模型的赛罕乌拉国家级自然保护区斑羚生境适宜性评价[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(1):102-108.
- [18]BAI D F, CHEN P J, ATZENI L, et al. Assessment of habitat suitability of the snow leopard (*Panthera uncia*) in Qomolangma National Nature Reserve based on MaxEnt modeling[J]. Zoological Research, 2018, 39(6):373-386.
- [19]曹克清. 麋鹿研究[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2005.
- [20]丁玉华. 中国麋鹿研究[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 2004. [21]白加德, 张渊媛, 钟震宇, 等. 中国麋鹿种群重建 35 年: 历程、成就与挑战[J]. 生物多样性, 2021, 29(2):160-166.
- [22]李鹏飞, 丁玉华, 张玉铭, 等. 长江中游野生麋鹿种群的分布与数量调查[J]. 野生动物学报, 2018, 39(1):41-48.
- [23]蒋志刚, 张林源, 杨戎生, 等. 中国麋鹿种群密度制约现象与发展策略[J]. 动物学报, 2001, 47(1):53-58.

-
- [24]蒋志刚, 刘丙万, 曾岩, 等. 同性相吸, 异性相斥?——麋鹿的同性聚群现象[J]. 科学通报, 1999, 44(17):1803-1809.
- [25]蒋志刚. 麋鹿行为谱及 PAE 编码系统[J]. 兽类学报, 2000, 20(1):1-12.
- [26]任静. 基于 GPS 技术的洞庭湖区野外放归麋鹿种群迁移行为研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.
- [27]YUAN B D, XIE S B, LIU B, et al. Differential movement pattern of Père David's Deer associated with the temporal rhythm using GPS collar fix[J]. Global Ecology and Conservation, 2019, 18:e00641.
- [28]王海燕. 洞庭湖区麋鹿野外放归初期家域和秋冬季生境选择研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017.
- [29]何振. 湖北石首麋鹿生境选择及种群动态[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2007.
- [30]梁兵宽, 李夷平, 陈硕, 等. 麋鹿非繁殖期生境适宜度评价指标探讨[J]. 林业资源管理, 2019(3):41-48.
- [31]陈星, 张林源, 刘艳菊, 等. 基于 FAHP 的半散养及圈养麋鹿栖息环境评价指标体系构建[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2015, 35(3):169-173.
- [32]杨道德, 马建章, 何振, 等. 湖北石首麋鹿国家级自然保护区麋鹿种群动态[J]. 动物学报, 2007, 53(6):947-952.
- [33]PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3-4):231-259.
- [34]周海涛. 基于 MAXENT 模型的扎龙湿地丹顶鹤栖息地适宜性评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2016.
- [35]夏昕, 任静, 李立, 等. 洞庭湖区麋鹿再野化初期秋冬季生境选择[J]. 生物多样性, 2021, 29(8):1087-1096.
- [36]蒋志刚, 生态龕的刀切法研究及在高原鼠兔生态龕研究中的应用[J]. 兽类学报, 1987, 7(1):20-27.
- [37]吴庆明, 王磊, 朱瑞萍, 等. 基于 MAXENT 模型的丹顶鹤营巢生境适宜性分析——以扎龙保护区为例[J]. 生态学报, 2016, 36(12):3758-3764.
- [38]朱井丽, 高忠斯, 邹红菲, 等. 基于 MAXENT 模型的松嫩平原丹顶鹤秋迁期生境适宜性评价[J]. 野生动物学报, 2018, 39(4):852-857.
- [39]KOYAMA A, HIRATA T, KAWAHARA Y, et al. Habitat suitability maps for juvenile tri-spine horseshoe crabs in Japanese intertidal zones: A model approach using unmanned aerial vehicles and the Structure from Motion technique [J]. PloS One, 2020, 15(12):e0244494.
- [40]COX T E, MATTHEWS R, HALVERSON G, et al. Hot stuff in the bushes: Thermal imagers and the detection of burrows in vegetated sites[J]. Ecology and Evolution, 2021.
- [41]郭兴健, 邵全琴, 杨帆, 等. 无人机遥感调查黄河源玛多县岩羊数量及分布[J]. 自然资源学报, 2019, 34(5):1054-1065.

-
- [42]郭彦龙, 赵泽芳, 乔慧捷, 等. 物种分布模型面临的挑战与发展趋势[J]. 地球科学进展, 2020, 35(12):1292-1305.
- [43]BRADLEY B A, FLEISHMAN E. Can remote sensing of land cover improve species distribution modelling?[J]. Journal of Biogeography, 2008, 35(7):1158-1159.
- [44]LAHOZ-MONFORT J J, GUILLERA-ARROITA G, MILNER-GULLAND E J, et al. Satellite imagery as a single source of predictor variables for habitat suitability modelling: How Landsat can inform the conservation of a critically endangered lemur[J]. Journal of Applied Ecology, 2010, 47(5):1094-1102.
- [45]林鑫, 王志恒, 唐志尧, 等. 中国陆栖哺乳动物物种丰富度的地理格局及其与环境因子的关系[J]. 生物多样性, 2009, 17(6):652.
- [46]WU W, LI Y, HU Y. Simulation of potential habitat overlap between red deer (*Cervus elaphus*) and roe deer (*Capreolus capreolus*) in northeastern China[J]. PeerJ, 2016, 4:e1756.
- [47]杨道德, 马建章, 何振, 等. 湖北石首麋鹿国家级自然保护区麋鹿种群动态[J]. 动物学报, 2007, 53(6):947-952.
- [48]邹师杰, 宋玉成, 杨道德, 等. 湖北石首麋鹿国家级自然保护区麋鹿冬季卧息地微生境选择[J]. 生态学杂志, 2013, 32(4):899-904.
- [49]CRANSAC N, HEWISON A J M. Seasonal use and selection of habitat by mouflon (*Ovis gmelini*): Comparison of the sexes[J]. Behavioural Processes, 1997, 41(1):57-67.
- [50]张怀胜. 石首麋鹿栖息地生态环境评价研究[D]. 长江大学, 2020.
- [51]WU B, JI Y, WANG J, et al. The annual habitat selection of released Père David's deer in Dafeng Milu National Nature Reserve[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(4):225-232.