

陈国远, 王成, 陈浩, 等. 盐城滨海湿地獐栖息地选择的季节变化. 应用生态学报, 2023, 34(2): 510–518
Chen GY, Wang C, Chen H, et al. Seasonal change of habitat selection of *Hydropotes inermis* in Yancheng coastal wetlands, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(2): 510–518

盐城滨海湿地獐栖息地选择的季节变化

陈国远^{1,2} 王成^{1*} 陈浩² 苏越¹ 於冉¹ 徐晓华³

(¹安徽农业大学经济管理学院, 合肥 230036; ²江苏盐城湿地珍禽国家级自然保护区, 江苏盐城 224333; ³盐城市自然资源和规划局亭湖分局林业服务中心, 江苏盐城 224001)

摘要 盐城滨海湿地是野生獐主要的栖息地和繁殖地之一。本研究基于 GPS-GSM 跟踪数据, 利用栖息地选择指数和 MaxEnt 模型模拟分析獐在不同季节适宜的栖息地分布以及主要影响因子。结果表明: 獐主要利用芦苇沼泽作为栖息地, 春夏季和秋冬季利用率分别为 52.7% 和 62.8%; MaxEnt 模型在春夏季和秋冬季模拟的受试者工作特征下面积值分别为 0.873 和 0.944, 显示出较高的预测精度; 春夏季, 獐栖息地次适宜和最适宜类型以芦苇沼泽、农田和坑塘水面为主, 秋冬季以芦苇沼泽和坑塘水面为主, 面积仅相当于春夏季的 5.7% 和 8.5%; 定位点到芦苇距离、到米草距离、生境类型、到水面距离和到居民地距离是影响春夏季獐分布的主要环境变量, 上述 5 个变量以及植被高度是影响秋冬季獐分布的主要环境变量。本研究为后续盐城滨海湿地獐种群保护以及栖息地精细化管理提供了重要参考。

关键词 獐; MaxEnt 模型; GPS-GSM 跟踪; 适宜栖息地; 滨海湿地

Seasonal change of habitat selection of *Hydropotes inermis* in Yancheng coastal wetlands, China. CHEN Guoyuan^{1,2}, WANG Cheng^{1*}, CHEN Hao², SU Yue¹, YU Ran¹, XU Xiaohua³ (¹*School of Economics and Management, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China*; ²*Jiangsu Yancheng Wetland National Nature Reserve of Rare Birds, Yancheng 224333, Jiangsu, China*; ³*Tinghu Branch Forestry Service Center of Yancheng Natural Resources and Planning Bureau, Yancheng 224001, Jiangsu, China*).

Abstract: Yancheng coastal wetlands are one of the main habitats and breeding grounds of wild Chinese water deer (*Hydropotes inermis*). Based on GPS-GSM tracking data, we used the habitat selection index and MaxEnt model to simulate and analyze the distribution of suitable habitat of *H. inermis* in different seasons as well as the main influencing factors. The results showed that *H. inermis* mainly used reed marshes, with the usage rate in spring–summer and autumn–winter being 52.7% and 62.8%, respectively. The area under receiver operating characteristic curve value simulated by MaxEnt model in different seasons was 0.873 and 0.944, which showed high prediction accuracy. In spring and summer, the sub-suitable and most suitable habitats were mainly reed marshes, farmland, and ponds. In autumn and winter, the main habitat types were reed marshes and ponds, with an area equivalent to only 5.7% and 8.5% of that in spring and summer. Distance to reeds, distance to *Spartina alterniflora*, habitat types, distance to water and distance residential area were the main environmental variables affecting the distribution of *H. inermis* in spring and summer. The above five variables and vegetation height were the main environmental variables affecting the distribution of *H. inermis* in autumn and winter. This study would provide an important reference for the conservation of Chinese water deer and the fine management of their habitats in Yancheng coastal wetlands.

Key words: Chinese water deer; MaxEnt model; GPS-GSM tracking; suitable habitat; coastal wetland.

獐 (*Hydropotes inermis*) 是国家二级重点保护野生动物, 被世界自然保护联盟评估为易危物种。在我国, 獐曾广泛分布于辽东半岛至长江中下游地

区^[1]。然而, 受人为捕猎和栖息地丧失等因素影响, 獐在我国的分布范围逐渐萎缩, 目前主要分布在江西鄱阳湖、江苏滨海湿地、浙江舟山、安徽长江沿岸湿地等部分区域^[2–3], 其中, 盐城滨海湿地是目前我国野生獐最主要的栖息地和繁殖地之一^[4]。20 世纪 90 年代, 盐城滨海湿地獐数量 1080~1790 只, 且广泛分布于射阳河至东台市蹲门一带^[5]。随着滨海围垦强度的不断增加, 滨海沼泽和滩涂逐渐消

本文由国家自然科学基金项目 (32201346, 42201281)、江苏省重点研发计划项目 (BE2018681)、安徽省自然科学基金项目 (2208085QD102) 和安徽农业大学引进与稳定人才项目 (rc402201) 资助。
2022-06-02 收稿, 2022-11-30 接受。
* 通信作者 E-mail: wangcheng1991@ahau.edu.cn

失,獐原有栖息地遭到不同程度的破坏,栖息地空间破碎化和隔离化程度不断增强,导致獐分布范围持续萎缩^[6]。截至 2020 年,盐城滨海湿地仅核心区和大丰麋鹿保护区等区域有一定规模的獐种群分布,其他区域已难觅其踪迹^[3-4],栖息地呈空间隔离化趋势,獐种群及栖息地保护形势严峻。因此,亟需开展獐栖息地研究,揭示目前盐城滨海湿地獐栖息地选择范围和主要环境影响因素,为后续制定相关保护管理对策提供理论依据。

目前,獐的种群和栖息地研究集中在鄱阳湖、舟山群岛和东北地区,例如,申锦^[2]利用 3S 技术对野放獐的生境利用进行研究,揭示了繁殖期和非繁殖期鄱阳湖獐的家域范围。李宗智等^[7]、鲍毅新等^[8]以獐的卧迹、足迹等活动痕迹为依据,对东北地区和舟山群岛獐的栖息地选择进行研究,揭示了影响獐栖息地选择的主要因素。也有学者针对獐交配季和非交配季生境选择的行为差异、不同区域食性差异和繁殖时间差异进行系统研究^[9-12]。然而,上述研究大多针对少数几只个体进行直接观测,且受限于监测条件,相关研究往往局限在样地尺度,无法揭示景观或区域尺度下獐栖息地选择或利用范围和强度。近年来,随着 3S 技术以及物种分布模型(species distribution models, SDMs)的发展和成熟,利用新兴技术开展野生动物栖息地选择研究逐渐成为湿地生态和野生动物栖息地选择研究的新趋势^[13]。在众多物种分布模型中,MaxEnt 模型以其操作简单、发展成熟和预测精度高等优点,被广泛运用到野生动物分布预测当中^[14-15]。例如,吴庆明等^[15]利用 MaxEnt 模型分析了扎龙湿地丹顶鹤(*Grus japonensis*)营巢生境的适宜性,崔绍朋等^[16]利用 MaxEnt 模型预测了白唇鹿(*Przewalskium albirostris*)在青藏高原的潜在分布区,并揭示了影响白唇鹿分布的主要影响因子。此外,MaxEnt 模型也被广泛运用到珍稀昆虫、植物等众多生物分布预测当中^[17-20],说明 MaxEnt 模型在物种分布预测分析中具有很强的适用性和应用前景。

迄今,獐种群和栖息地研究主要集中在家域范围、栖息地生态特征、警戒行为、栖息地选择与植被关系等方面^[2,7-9],却忽视了獐在不同季节栖息地范围的变化,以及周围自然环境变化和人为干扰因素对獐栖息地选择产生的潜在影响。基于此,本研究基于 GPS-GSM 连续跟踪数据,运用 3S 技术和 Max-Ent 模型,开展盐城滨海湿地不同季节獐栖息地选择研究,并重点解决以下科学问题:獐在不同季节栖

息地利用和选择实际情况如何? 不同季节獐栖息地适生区分布有何差异? 獐在不同季节栖息地选择受哪些环境变量影响? 上述科学问题的解决,将丰富和完善盐城滨海湿地獐栖息地选择研究,连续的高精度卫星跟踪技术和物种分布模型等手段,将有助于全面揭示獐在盐城滨海湿地适生区分布,并阐明环境变量的影响机制,为“中国黄(渤)海候鸟栖息地(第一期)”世界自然遗产地的野生动物精细化管理提供参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究选择盐城湿地珍禽国家级自然保护区射阳河以南的北一实验区、北缓冲区、中实验区和核心区作为研究区,研究区地处黄海之滨,是典型的淤泥质滨海湿地。研究区位于 33°29′51″—33°48′32″ N, 120°23′19″—120°41′07″ E,总面积为 42602.88 hm² (图 1)。研究区所在的盐城滨海湿地动植物资源丰富,拥有国家一级重点保护野生动物 14 种,二级重点保护野生动物 76 种^[4],盐城滨海湿地于 2002 年被列入“国际重要湿地”名录,并于 2019 年列入世界自然遗产地名录(<http://yellowsea-wetland.com/shenyilicheng>),成为我国唯一一块滨海湿地类型世界自然遗产地。作为众多野生动物赖以生存的栖息地,盐城滨海湿地植被呈带状分布,由海到陆依次为

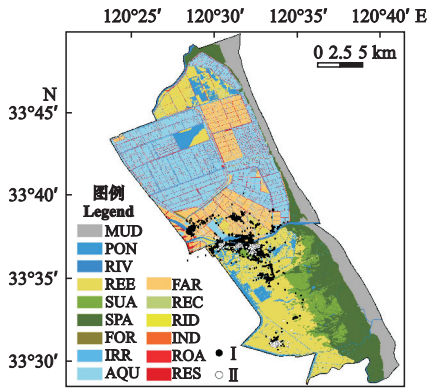


图 1 研究区位置及獐 GPS 实时跟踪点位

Fig.1 Location of study area and GPS tracking points of Chinese water deer.

MUD: 光滩 Mudflat; PON: 坑塘水面 Pond and water surface; RIV: 自然河流 Natural river; REE: 芦苇沼泽 Reed marsh; SUA: 碱蓬沼泽 *Suaeda salsa* marsh; SPA: 米草沼泽 *Spartina alterniflora* marsh; FOR: 林地 Forest land; IRR: 沟渠 Irrigation ditch; AQU: 养殖塘 Aquacultural pond; FAR: 农田 Farmland; REC: 围垦占用地 Reclamation land; RID: 田坎/机耕道 Ridge of cropland; IND: 工矿用地 Industrial land; ROA: 道路 Road; RES: 城镇居民地 Residential area. 下同 The same below. I: 春夏季 GPS 点 GPS point in spring and summer; II: 秋冬季 GPS 点 GPS point in autumn and winter.

互花米草 (*Spartina alterniflora*, 以下简称米草)、碱蓬 (*Suaeda salsa*) 和芦苇 (*Phragmites australis*)。

1.2 数据获取与处理

1.2.1 獐 GPS-GSM 跟踪数据 本研究团队于 2020 年 4 月 3 日在盐城滨海湿地放归 20 只獐成体,在野放前,为它们安装了兽用小型卫星发射项圈 (HQN40-S),默认编程为以每次 1 h 的频率自动记录数据,受日照时长和工作环境等要素影响,GPS 设备电量电压呈波段状态,低电量时自动开启保护模式,数据记录频率为每次 3、6 或 12 h。截至 2022 年 4 月 28 日,剔除放归后当月失去信号、发射器中途损坏、野外个体死亡、数据精度过低 (精度大于 20 m) 等无效数据后,共获取 2020 年 4 月—2022 年 4 月 14 只獐 32981 条跟踪数据,其中,春夏季定位点 27285 个,秋冬季 5696 个,有效数据占比超过了 97.3%。为了防止模型出现过度拟合和结果偏差,本研究删除了固定间隔期前后的重复点位,最终得到春夏季运算点位 21946 个,秋冬季 5683 个,占比达 83.8%。最后,将上述 GPS 点位带入 MaxEnt 模型中模拟运算。

1.2.2 环境变量数据 根据前人研究成果^[21-23]以及盐城滨海湿地獐分布区生态环境现状,本研究选择涵盖食物可获得性、隐蔽条件、人为干扰、水资源和地形条件等 5 大类 10 个环境变量作为 MaxEnt 模型模拟的输入变量 (表 1)。其中,生境类型和面积数据结合了 2020 年 Landsat 8 OLI (空间分辨率 30 m) 高光谱和高分二号 (空间分辨率 2 m) 高分辨率遥感影像的优势,利用面向对象方法并辅助目视解译,获取研究区优于 5 m 的生境类型数据,有效支撑了獐栖息地的识别。归一化植被指数 (NDVI) 利用 ENVI 5.3 软件进行波段计算获得,到植被、水面和居民地

距离利用 ArcMap 10.3 软件中 Euclidean distance 模块空间分析获得。数字高程数据 (digital elevation model, DEM) 在美国国家航天局 (NASA) 和日本经济产业省 (METI) 共同发布的 ASTER GDEM v3 版本上裁剪获得。

1.3 栖息地选择指数

根据遥感解译的栖息地类型数据和獐 GPS 定位数据,计算物种栖息地选择指数^[24],公式如下:

$$W_i = O_i / P_i$$

式中: W_i 为栖息地 i 的选择指数,其值大于 1.0 表示优先选择该物种,小于 1.0 则表示避免选择; O_i 为栖息地 i 的利用率,本研究将此定义为栖息地类型 i 中 GPS 点位占 GPS 总点位数的百分比; P_i 为栖息地 i 的可用性,本研究将此定义为栖息地 i 面积占研究区总面积的百分比。

1.4 适生区识别与评价过程

1.4.1 MaxEnt 模型识别过程 选择基于最大熵理论的 MaxEnt 模型 (3.3.3k) 识别獐在盐城滨海湿地的适生区。具体识别过程为:将獐 GPS-GSM 定位数据和环境变量数据输入到软件中,随机抽取 75% 的分布点作为训练集建立预测模型,剩余 25% 分布点作为测试集验证模型,选择刀切法 (Jackknife test) 测定各变量权重,以此作为环境变量重要性评估的主要依据^[17]。创建环境变量响应曲线,分析变量的响应阈值。

1.4.2 识别模拟结果评价 采用受试者工作特征曲线 (receiver operating characteristic curve, ROC) 下面积 (area under curve, AUC) 值作为模型识别结果的评价依据。ROC 曲线又称感受性曲线,该曲线根据一系列不同的二分类方式,分别以假阳性率 (1-特异率) 和真阳性率 (1-遗漏率) 作为横、纵坐标绘制

表 1 獐栖息地选择研究中环境变量分类及其描述
Table 1 Classification and description of environmental variables in the study of habitat selection of Chinese water deer

大类 Category	环境变量 Environmental variable	缩写 Abbreviation	描述 Description
食物可获得性 Food availability	生境类型 Habitat type	T_hab	GPS 点位生境类型
	生境面积 Habitat area (hm ²)	A_hab	GPS 点位生境斑块面积
	归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	T_ndvi	反映植被覆盖情况
隐蔽条件 Hidden condition	到芦苇距离 Distance to reed (m)	D_ree	-
	到米草距离 Distance to <i>Spartina alterniflora</i> (m)	D_spa	-
	植被高度 Vegetation height (m)	H_veg	GPS 点位附近植被平均高度
人为干扰 Human disturbance	到道路距离 Distance to road (km)	D_roa	-
	到居民地距离 Distance to residential area (m)	D_res	-
水资源 Water resource	到水面距离 Distance to water surface (m)	D_wat	-
地形条件 Topographic condition	数字高程模型 DEM	T_dem	区域 30 m×30 m 的数字高程模型来源于国际科学数据服务平台 (http://datamirror.csdb.cn)

而成,AUC 取值范围为 $[0,1]$,AUC 值越接近 1 表明环境变量与分布模型之间相关性越大,预测结果精度越高^[25-26]。

1.4.3 适生区分级与面积统计 将春夏季和秋冬季数据在 MaxEnt 模型中模拟 10 次后的平均值导入 ArcGIS 软件,并对分布概率值进行重分类,结合自然断点法^[27]和分布点位实际情况,将獐适生区划分为 4 个等级:概率指数在 0~0.2 之间为不适宜区域,0.2~0.5 为低适宜区域,0.5~0.7 为次适宜区域,0.7~1.0 为最适宜区域。最后,利用 ArcGIS 栅格计算器进行面积计算,得到各适宜区域面积统计数据。

1.5 环境变量阈值

为了定量评估环境变量对獐栖息地选择的影响过程,本研究利用獐 GPS 跟踪定位点模拟的适生区分布与主要环境变量的反馈曲线,指示各主要环境变量在不同适生指数下响应阈值。本研究定义次适宜和最适宜区域作为獐在盐城滨海湿地的主要适生区,因此,以适生指数 0.5~1.0 为环境变量的阈值区间,得到适宜獐分布的环境变量范围。

2 结果与分析

2.1 不同季节獐栖息地的利用与选择

由图 2 可以看出,獐在研究区利用率最高的栖息地类型为芦苇,春夏季利用率达到 52.7%,秋冬季达到 62.8%,其次是林地和坑塘水面,两种类型利用

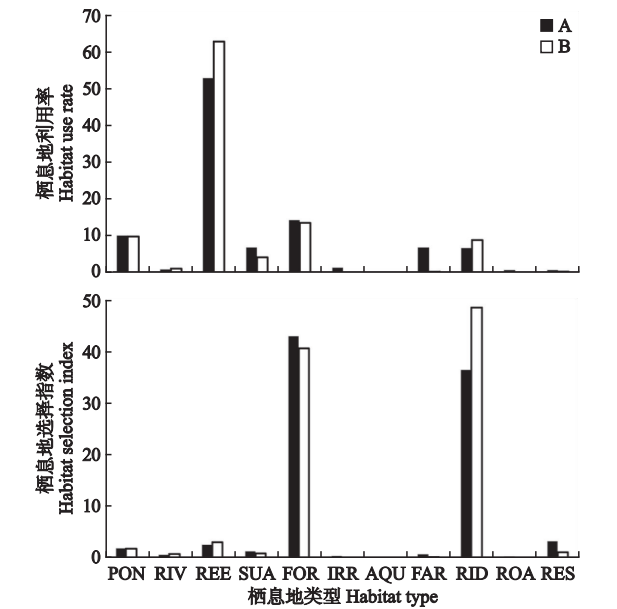


图2 獐栖息地利用与选择的季节变化
Fig.2 Seasonal variation of habitat use and selection of Chinese water deer.
A: 春夏季 Spring and summer; B: 秋冬季 Autumn and winter. 下同 The same below.

率均低于 15%,城镇居民地、道路、养殖塘、沟渠和自然河流等类型的利用率较低,均低于 1%。表明獐偏好利用靠近食物源和水源的栖息地类型。

春夏季,獐优先选择林地和田坎/机耕道,选择指数分别为 42.97 和 26.50,秋冬季,优先选择田坎/机耕道和林地,选择指数分别为 48.56 和 40.64,而其他地类的选择指数均低于 4.00。利用率与选择指数的差异主要与各栖息地类型可用性有关,林地和田坎/机耕道的面积较小,且占区域面积的比重极低,导致这两种栖息地类型的选择指数较高。

2.2 不同季节獐栖息地的适生区预测

2.2.1 适生区模型优化与评价 基于 14 只獐春夏季 21946 个 GPS 点位、秋冬季 5683 个 GPS 点位和 10 个环境变量数据,利用 MaxEnt 模型对獐的适生区进行模拟预测。由图 3 可以看出,春夏季,獐分布训练集的 AUC 值为 0.873,测试集的 AUC 值为 0.868;秋冬季,獐分布训练集 AUC 值为 0.944,测试集 AUC 为 0.942。表明 MaxEnt 模型在獐适生区预测分析中模拟精度较高,满足本研究对模型预测精度的要求。

由图 4 可以看出,春夏季和秋冬季研究区獐栖息地适宜性水平存在明显的空间差异。其中,春夏季獐栖息地适宜性指数值较高的区域广泛分布于研究区中部和北部,而秋冬季指数值较高的区域仅零散分布于研究区中西部,其他区域适宜性指数值普遍较低。

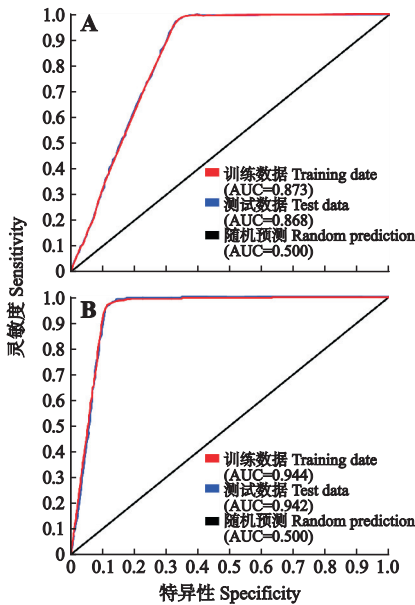


图3 獐栖息地适生区预测结果的 ROC 曲线
Fig.3 ROC curve of prediction results of suitable areas for Chinese water deer.

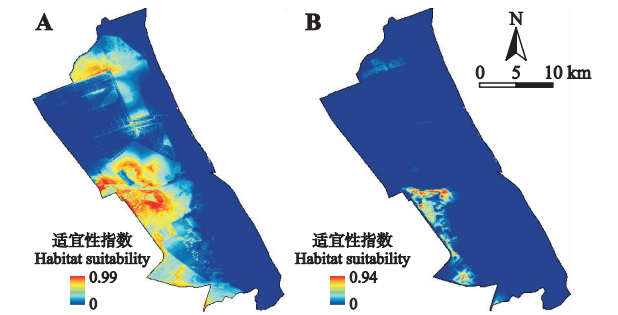


图 4 不同季节獐栖息地适宜性指数的空间分布
Fig.4 Spatial distribution of habitat suitability index of Chinese water deer in different seasons.

2.2.2 不同季节的适生区分布 为了更加直观地理解研究区獐栖息地适生区在不同季节的分布差异,将研究区獐栖息地适宜指数进行重新分级,得到盐城滨海湿地不同季节獐适生区分布图(图 5)。春夏季,獐栖息地次适宜和最适宜区域分布范围较广,主要分布在研究区西部,以及研究区北部临近射阳河的南岸,次适宜和最适宜面积分别达到 3484.98 和 636.79 hm^2 ;秋冬季,獐栖息地次适宜和最适宜区域范围和面积均较小,分别仅为 197.93 和 54.50 hm^2 ,次适宜和最适宜区域面积仅相当于春秋季节的 5.7% 和 8.5%(图 6)。

由表 2 可以看出,春夏季,獐次适宜区域主要生境类型为芦苇沼泽、农田和坑塘水面,面积分别为 1801.41、804.94 和 445.89 hm^2 ,三类生境面积之和占研究区总面积的 87.6%,最适宜区域主要生境类型为芦苇沼泽和农田,面积分别为 353.28 和 101.33 hm^2 ,两类生境面积占研究区总面积的 71.4%。秋冬季,獐次适宜区域主要生境类型为芦苇沼泽和坑塘

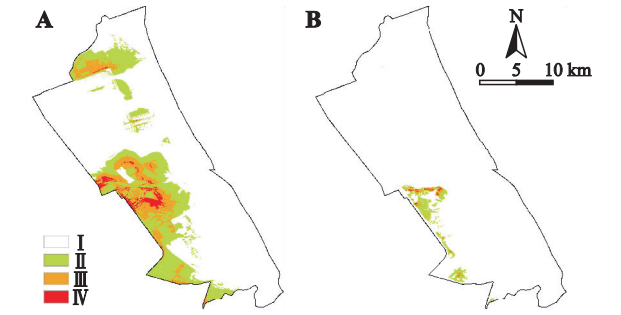


图 5 MaxEnt 模型预测不同季节獐的适生区分布
Fig.5 Distribution of suitable habitat for Chinese water deer in different seasons predicted by MaxEnt model.
I: 不适宜 Unsuitable; II: 低适宜 Low suitable; III: 次适宜 Sub-suitable; IV: 最适宜 Most suitable.

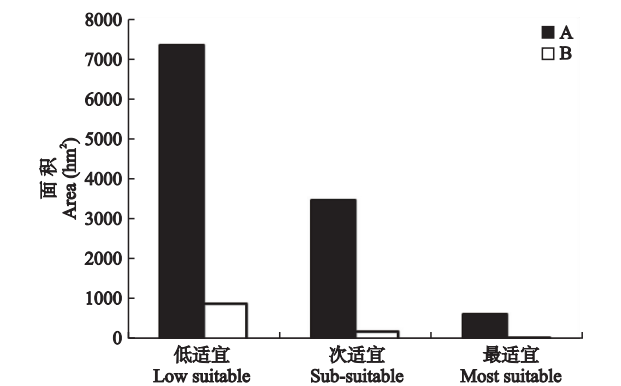


图 6 不同季节獐的适生区面积变化
Fig.6 Area change of suitable habitat of Chinese water deer in different seasons.

水面,面积分别为 127.02 和 42.14 hm^2 ,约占区域总面积的 85.5%,最适宜区域主要生境类型为芦苇沼泽和林地,面积分别为 28.81 和 11.69 hm^2 ,约占区域总面积的 74.3%。

表 2 獐适生区各生境类型的面积统计
Table 2 Area statistics of various habitat types in the suitable habitat of Chinese water deer (hm^2)

生境类型 Habitat type	春夏季 Spring and summer		秋冬季 Autumn and winter	
	次适宜 Sub-suitable	最适宜 Most suitable	次适宜 Sub-suitable	最适宜 Most suitable
坑塘水面 Pond and water surface	445.89	36.25	42.14	7.06
自然河流 Natural river	30.31	13.22	0.64	0.01
芦苇沼泽 Reed marsh	1801.41	353.28	127.02	28.81
碱蓬沼泽 Suaeda salsa	66.58	24.90	9.63	4.63
林地 Forest	22.71	39.18	13.17	11.69
沟渠 Irrigation ditch	169.90	13.53	0.00	0.00
养殖塘 Aquacultural pond	1.64	0.37	0.00	0.00
农田 Farmland	804.94	101.33	0.00	0.00
田坎/机耕道 Ridge of farmland	31.44	10.69	5.18	1.69
工矿用地 Industrial land	3.69	11.09	0.00	0.00
道路 Road	86.04	11.84	0.00	0.00
城镇居民地 Residential area	20.42	21.09	0.16	0.63

表 3 环境变量的贡献率统计
Table 3 Contribution rates of environmental variables (%)

变量 Variable	春夏季 Spring and summer	秋冬季 Autumn and winter
生境类型 Habitat type	17.7	14.1
生境面积 Habitat area	3.4	3.0
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	0.7	1.8
到芦苇距离 Distance to reeds	18.0	21.3
到米草距离 Distance to <i>Spartina alterniflora</i>	16.7	17.6
植被高度 Vegetation height	1.8	12.5
到道路距离 Distance to roads	2.1	2.9
到居民地距离 Distance to residential area	19.2	13.4
到水面距离 Distance to water surface	20.0	12.7
数字高程模型 DEM	0.3	0.8

2.3 獐地理分布与环境变量之间的关系

2.3.1 刀切法检验环境变量重要性 刀切法检验可以反映不同环境变量对分布增益的贡献大小,本研究利用 MaxEnt 模型中刀切法模块分析环境变量对獐适生区分布的贡献率(表 3)。结果表明,春夏季,到水面距离、到居民地距离、到芦苇距离、生境类型、到米草距离对獐地理分布的贡献率较高,累计贡献率达到 91.6%。刀切法检验结果表明,到芦苇距离、到米草距离和生境类型的检验得分更高,且都大于 1.0(图 7),说明这 3 个变量比其他变量拥有更多的有效信息。

春夏季,影响獐适生区分布的主要环境变量为到芦苇距离、到米草距离、生境类型、到水面距离和到居民地距离;秋冬季,影响獐适生区分布的主要环境变量为植被高度、到米草距离、到芦苇距离、生境类型、到水面距离和到居民地距离。

2.3.2 环境变量的阈值 春夏季和秋冬季獐适生区分布的主要环境变量的反馈曲线反映了环境变量对獐适生区及栖息地选择的影响存在明显的季节差异(图 8、图 9)。

表 4 环境变量的适宜阈值统计
Table 4 Appropriate thresholds of environmental variables

环境变量 Environmental variable	春夏季 Spring and summer		秋冬季 Autumn and winter	
	适宜阈值范围 Threshold range	最适值 Optimum value	适宜阈值范围 Threshold range	最适值 Optimum value
到芦苇距离 Distance to reeds (m)	0~32.17	9.83	0~11.79	3.06
到米草距离 Distance to <i>Spartina alterniflora</i> (m)	2673.25~5609.93	3342.80	3217.67~4807.38, 5479.06~5940.99	5809.25
生境类型 Habitat type	2~11,14	14	3~11,14	4
到水面距离 Distance to water surface (m)	0~87.12	3.49	0~26.05	3.09
到居民地距离 Distance to residential area (m)	0~2079.03	0.00	0~2949.70	18.31
植被高度 Vegetation height (m)	—	—	1.62~2.14	1.68

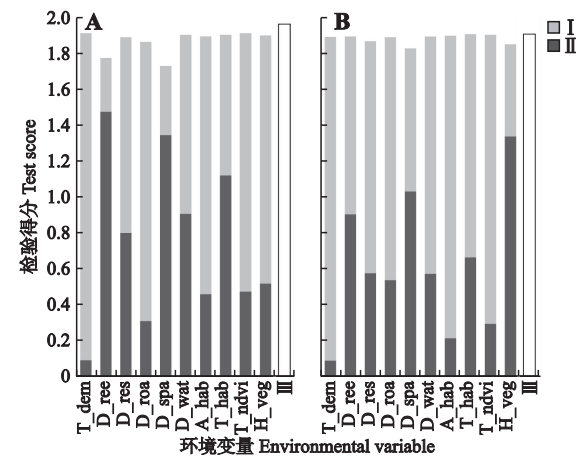


图 7 环境变量重要性得分
Fig.7 Importance score of environmental variable.
各环节变量的含义见表 1 Meaning of environmental variable was shown in Table 1. 下同 The same below. I：除此变量 Without variable；II：仅此变量 With only variable；III：所有变量 With all variables.

由表 4 可以看出,春夏季,影响獐适生区分布的环境变量中,到芦苇距离的适宜阈值为 0~32.17 m,最适距离为 9.83 m,距离在 0~116.04 m 时,适宜指数随着距离增加而下降;到米草距离的适宜阈值为 2673.25~5609.93 m,最适距离为 3342.80 m;生境类型的适宜阈值为 2~11 和 14,最适值为 14,即对应的芦苇沼泽;到水面距离的适宜阈值为 0~87.12 m,最适距离为 3.49 m;到居民地距离的适宜阈值为 0~2079.03 m,最适距离为 0 m。秋冬季,影响獐适生区分布的环境变量中,植被高度的适宜阈值为 1.62~2.14 m,最适高度为 1.68 m;与春夏季不同的是,生境类型最适值为 4,即对应的坑塘水面,到米草距离和到居民地距离大于春夏季。

3 讨 论

本研究利用栖息地指数和 MaxEnt 模型揭示了盐城滨海湿地獐在不同季节的栖息地选择空间格局差异。本研究选择涵盖食物、水资源、地形、隐蔽和

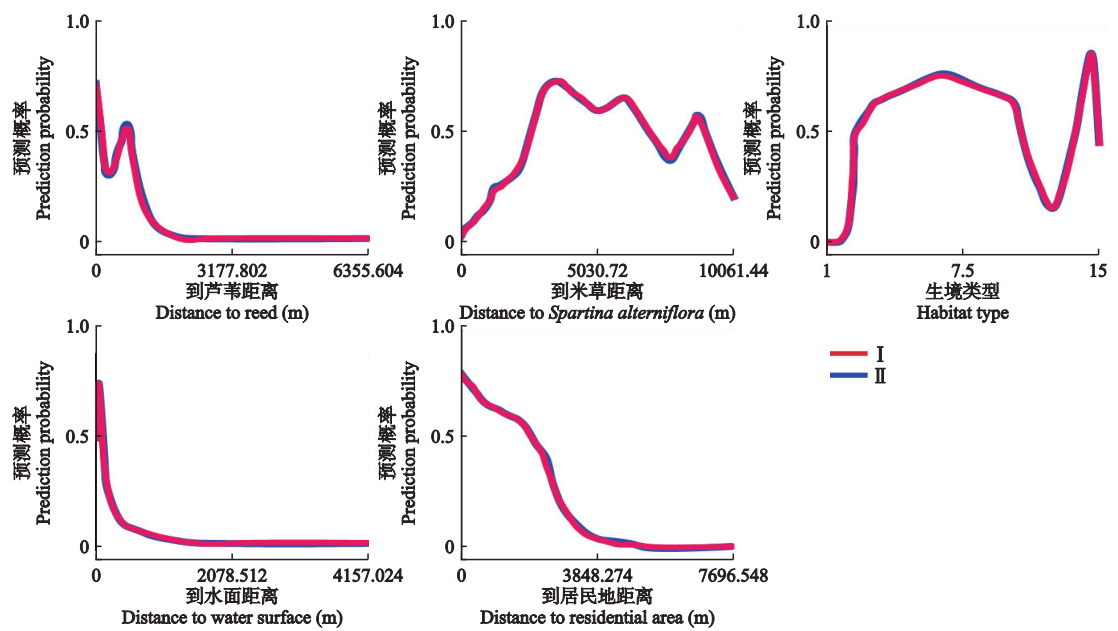


图 8 春夏季獐对主要环境变量的反馈曲线
Fig.8 Feedback curves of Chinese water deer to main environmental variables in spring and summer.

生境类型 1~15 分别对应光滩、养殖塘、农田、坑塘水面、城镇居民地、工矿用地、围垦占地、林地、沟渠、田坎/机耕道、碱蓬沼泽、米草沼泽、自然河流、芦苇沼泽、道路 The habitat type 1-15 corresponded to mudflat, aquacultural ponds, farmland, ponds and water surface, residential area, industrial land, reclamation land, forest land, irrigation ditches, ridge of farmland, *Suaeda salsa* marshes, *Spartina alterniflora* marshes, natural river, reed marshes and roads, respectively. I : 当前变量响应值 Current variable response value; II : 置信区间 Confidence interval. 下同 The same below.

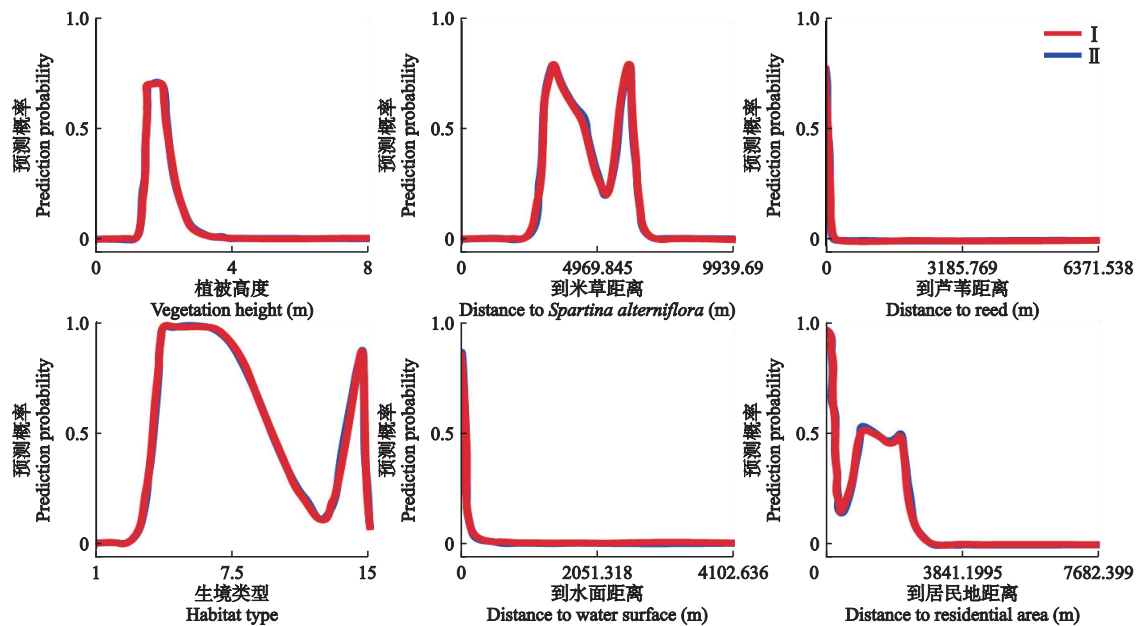


图 9 秋冬季獐对主要环境变量的反馈曲线
Fig.9 Feedback curves of Chinese water deer to main environmental variables in autumn and winter.

人为干扰等环境变量,探究周边环境因素对獐栖息地选择的影响机制。研究发现,春夏季和秋冬季獐适宜生境分布存在明显的空间差异,春夏季适生区面积更大,秋冬季适生区面积较小,且主要集中在中实验区以及西部海堤公园附近。不同季节獐适生区面积的差异主要与食物资源分布有关,獐主要以植

物嫩叶和根茎为食^[2,5],秋冬季盐城滨海湿地核心区芦苇和茅草等植物生长成熟,獐食物资源缺乏,而研究区西部是盐城滨海湿地景区范围,经人工改造后河网密布且植被多样,秋冬季为旅游淡季,人类干扰较少,因此成为獐在秋冬季重要的觅食和越冬地。此外,西部海堤路西侧临近农场和农业种植区,秋冬

季广泛种植冬小麦,成为獐重要的食物来源。

2010 年以来,獐在盐城滨海湿地栖息地利用和种群分布主要集中在核心区和大丰麋鹿保护区,而 20 世纪 50 年代至 21 世纪初,獐广泛分布于射阳河以南至东台市蹲门一带,栖息地连续且分布广泛^[4]。随着沿海围垦开发的持续进行,原本的自然沼泽和滩涂逐渐消失^[28],獐栖息地逐渐压缩到核心区和大丰麋鹿保护区周边,并形成了 2 个具有空间隔离属性的獐种群。过往对于盐城滨海湿地獐的研究主要是基于野外实地观测和监测获取的数据,推测獐在盐城滨海湿地的分布范围和种群现状^[1,3-4]。本研究则基于高精度 GPS-GSM 实时定位数据,利用超过 33000 个定位数据定量评估了獐在盐城滨海湿地不同季节的栖息地选择机制,揭示了獐在不同季节栖息地选择范围以及环境变量的影响机制,弥补了过往研究的不足,首次发现獐在不同季节栖息地利用的空间差异,本研究为后续盐城滨海湿地獐种群保护以及栖息地精细化管理提供了重要的数据参考。

通过环境变量重要性和阈值分析可以看出,除了食物和隐蔽条件,水资源也是影响獐栖息地选择的重要因素之一。春夏季和秋冬季到水面距离的最适值分别为 3.49 和 3.09 m,表明獐在盐城滨海湿地偏好靠近水源的栖息地,结合生境类型阈值可知,春夏季獐适宜生境以芦苇沼泽为主,秋冬季以坑塘水面为主,水源、觅食生境以及适宜的隐蔽条件共同组成了獐在研究区理想的栖息环境。盐城滨海湿地保护区自建立之初就一直以保护珍稀禽类为主要目标,相关研究多以丹顶鹤、黑嘴鸥 (*Larus saundersi*) 等珍稀水鸟为主^[29-31],而对于獐等湿地动物的关注和研究较少,作为湿地物种,獐对生态环境变化和人类活动较为敏感,其栖息地选择机制研究在一定程度上反映了区域湿地环境现状,也为后续湿地精细化管理和恢复提供了理论和案例借鉴。

此外,对比同为鹿科的麋鹿 (*Elaphurus davidianus*) 种群和栖息地研究后发现,在经历人工繁殖与种群保护措施后,研究区麋鹿种群规模和栖息地质量得到大幅提升,其栖息地范围也由原先的大丰麋鹿保护区逐渐向北部盐城保护区核心区以及南部条子泥区域扩散^[32-33]。麋鹿习性温顺,且往往沿湿地植被以数头乃至数十头规模持续迁移,因而便于研究人员开展野外持续性观测^[34]。然而,研究区獐种群在 1990 年以来一直处于波动下降趋势^[4-5,12],尤其是该物种对周围环境具有极强的敏感性,自然和

人为干扰对该物种的栖息地选择均产生负面影响。因此,在缺乏可靠和稳定的跟踪资料情况下,其栖息地利用以及范围一直是该区域獐栖息地研究的难点。本研究利用连续 2 年的 GPS-GSM 跟踪数据,获取了大量的獐在盐城滨海湿地的活动轨迹,并通过数据提取、统计分析和模拟预测,揭示了盐城滨海湿地獐栖息地选择的季节性差异,以及影响其栖息地选择的主要影响变量,弥补了该区域獐种群和栖息地研究的不足。

参考文献

- [1] 陈珉,张恩迪,杨乃乙,等. 江苏省盐城滨海湿地獐的春季种群数量与分布. 湿地科学, 2009, 7(1): 1-4
- [2] 申锦. 基于 3S 技术研究鄱阳湖野放河鹿的家域利用模式. 硕士论文. 南昌: 江西师范大学, 2021
- [3] 徐宏发,陆厚基. 盐城獐种群生存力的初步分析. 兽类学报, 1996, 16(2): 81-88
- [4] 成海,陈浩,李春荣. 盐城自然保护区河鹿分布调查研究. 现代农业科技, 2010(2): 329-331
- [5] 张恩迪,滕丽微,吴咏蓓. 江苏盐城自然保护区獐栖息地的质量评价. 兽类学报, 2006, 26(4): 368-372
- [6] Zhu H, Pei Q, Wang H. Functional group classification and target species selection for Yancheng Nature Reserve, China. *Biodiversity & Conservation*, 2004, 13: 1335-1353
- [7] 李宗智,刘振生,米书慧,等. 白山原麝国家级自然保护区獐春夏生境选择. 生态学报, 2021, 41(4): 1625-1633
- [8] 鲍毅新,张龙龙,孙波,等. 舟山群岛春秋季节獐栖息地的生态特征. 兽类学报, 2011, 31(3): 235-243
- [9] 田鑫鑫,陈珉,王会,等. 獐的警戒行为模式及逃跑起始距离的适应性变化. 动物学杂志, 2012, 47(6): 25-30
- [10] 黄燕. 鄱阳湖区枯水期和丰水期獐 (*Hydropotes inermis*) 的食性分析. 硕士论文. 南昌: 江西师范大学, 2016
- [11] Kim BJ, Oh DH, Chun SH, et al. Distribution, density, and habitat use of the Korean water deer (*Hydropotes inermis argyropus*) in Korea. *Landscape & Ecological Engineering*, 2011, 7: 291-297
- [12] 滕丽微. 江苏盐城沿海滩涂地区獐 (*Hydropotes inermis*) 的种群现状以及重引入上海地区的可行性初步研究. 博士论文. 上海: 华东师范大学, 2007
- [13] 许仲林,彭焕华,彭守璋. 物种分布模型的发展及评价方法. 生态学报, 2015, 35(2): 557-567
- [14] 张路. MAXENT 最大熵模型在预测物种潜在分布范围方面的应用. 生物学通报, 2015, 50(11): 9-12
- [15] 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. 生态学报, 2016, 36(12): 3758-3764
- [16] 崔绍朋,罗晓,李春旺,等. 基于 MaxEnt 模型预测白唇鹿的潜在分布区. 生物多样性, 2018, 26(2): 171-176

[17] 王茹琳, 李庆, 封传红, 等. 基于 MaxEnt 的西藏飞蝗在中国的适生区预测. 生态学报, 2017, **37**(24): 8556-8566

[18] 叶永昌, 周广胜, 殷晓洁. 1961—2010 年内蒙古草原植被分布和生产变化——基于 MaxEnt 模型和综合模型的模拟分析. 生态学报, 2016, **36**(15): 4718-4728

[19] 朱耿平, 原雪姣, 范靖宇, 等. MaxEnt 模型参数设置对其所模拟物种地理分布和生态位的影响——以茶翅蛄为例. 生物安全学报, 2018, **27**(2): 118-123

[20] 叶利奇, 张伟皓, 叶兴状, 等. 基于 Maxent 模型的珙桐潜在分布预测及其重要影响因子分析. 四川农业大学学报, 2021, **39**(5): 604-612

[21] 牛莹莹. 老爷岭南部野生东北梅花鹿 (*Cervus nippon hortulorum*) 种群现状及栖息地适宜性评价研究. 硕士论文. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021

[22] 张怀胜, 田光明, 王鑫雨, 等. 长江枯水期石首麋鹿的生境选择. 野生动物学报, 2020, **41**(1): 22-28

[23] 王成, 董斌, 朱鸣, 等. 升金湖湿地越冬鹤类栖息地选择. 生态学杂志, 2018, **37**(3): 810-816

[24] Krebs CJ. Ecological Methodology. New York: Benjamin Cummings, 1989

[25] 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 等. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用. 生物多样性, 2007, **15**(4): 365-372

[26] 朱耿平, 乔慧捷. Maxent 模型复杂度对物种潜在分布区预测的影响. 生物多样性, 2016, **24**(10): 1189-1196

[27] 谢余初, 巩杰, 张素欣, 等. 基于遥感和 InVEST 模型的白龙江流域景观生物多样性时空格局研究. 地理科学, 2018, **38**(6): 979-986

[28] 徐彩瑶, 濮励杰, 朱明. 沿海滩涂围垦对生态环境的影响研究进展. 生态学报, 2018, **38**(3): 1148-1162

[29] Wang G, Wang C, Guo ZR, et al. A multiscale approach to identifying spatiotemporal pattern of habitat selection for red-crowned cranes. *Science of the Total Environment*, 2020, **739**: 139980

[30] Jiang HX, Hou YQ, Chu GZ, et al. Breeding population dynamics and habitat transition of Saunders's Gull *Larus saundersi* in Yancheng National Nature Reserve, China. *Bird Conservation International*, 2010, **20**: 13-24

[31] 邹丽丽, 陈晓翔, 陈洪全, 等. BP 神经网络改进湿地水鸟生态位模型分布模拟研究. 海洋环境科学, 2017, **36**(3): 422-426

[32] 王立波, 姜慧, 安玉亭, 等. 中国麋鹿种群现状分析及保护对策探讨. 野生动物学报, 2020, **41**(3): 806-813

[33] 丁晶晶, 薛欢, 朱立峰, 等. 江苏大丰野生麋鹿种群及其栖息地保护. 野生动物学报, 2015, **36**(3): 265-269

[34] 丁晶晶. 大丰野放麋鹿的活动区域格局及生境选择研究. 博士论文. 南京: 南京师范大学, 2017

作者简介 陈国远, 男, 1967 年生, 研究员。主要从事野生动物调查与监测研究。E-mail: 495982885@qq.com

责任编辑 鲍伟东

责任编辑 杨 弘
