

DOI: 10.5846/stxb202106071503

唐中海, 罗华林, 王建华, 刘家林, 游章强. 基于 GIS 和 Maxent 模型的白唇鹿 (*Cervus albirostris*) 潜在适宜生境及保护 GAP 分析. 生态学报, 2022, 42 (22): 9394-9403.

Tang Z H, Luo H L, Wang J H, Liu J L, You Z Q. Potential suitable habitat and protection gap analysis of white-lipped deer (*Cervus albirostris*) based on GIS and Maxent model. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42 (22): 9394-9403.

基于 GIS 和 Maxent 模型的白唇鹿 (*Cervus albirostris*) 潜在适宜生境及保护 GAP 分析

唐中海¹, 罗华林², 王建华¹, 刘家林¹, 游章强^{1,*}

1 绵阳师范学院生态安全与保护四川省重点实验室, 绵阳 621000

2 四川省甘孜州白玉县林业和草原局白玉县自然保护区服务中心, 甘孜 627150

摘要: 在全球气候变暖及人为干扰等因素影响下, 许多野生动物因生境退化和丧失而濒临灭绝。为了探讨未来全球气候变暖背景下白唇鹿适宜生境的分布格局及保护状况, 基于 491 个白唇鹿分布位点, 利用 GIS 和 Maxent 模型模拟预测了 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 共享社会经济路径下全球气候变化对白唇鹿在 2040 年 (2021—2040) 和 2100 年 (2081—2100) 潜在适宜生境分布并对其保护空缺进行了评价, 并利用受试者曲线和刀切法对模型模拟结果有效性进行评价。结果表明在两种共享社会经济路径下, 从 2021 到 2100 年期间: (1) 影响白唇鹿潜在适宜生境分布的关键环境因子是植被类型、最暖季均温和最热月最高温和海拔; (2) 白唇鹿潜在适宜生境面积总体呈下降趋势, 分布格局变化明显的区域主要集中在西藏南部、三江并流区以及青海、四川和甘肃交界带; (3) 白唇鹿潜在适宜生境平均海拔上升, 质心向高纬度移动; (4) 在 SSP1-2.6 共享社会经济路径下, 白唇鹿 2040 年和 2100 年位于中国生态屏障区、国家级和地方级自然保护区之内的潜在适宜生境的平均最高和最低比例分别为 76.11% 和 26.92%, 而在 SSP5-8.5 共享社会经济路径下的分别是 69.41% 和 69.34%。本研究揭示了全球气候变暖主要通过青藏高原暖季的增温效应影响白唇鹿潜在适宜生境, 最高达到 73.08% 的潜在适宜生境还处于保护空缺区域。全球经济发展尽早进入可持续发展模式和对保护空缺区域进行保护地规划与建设将对未来生物多样性保护具有重要意义。

关键词: 白唇鹿; 全球气候变化; 潜在适宜生境; 最大熵模型

Potential suitable habitat and protection gap analysis of white-lipped deer (*Cervus albirostris*) based on GIS and Maxent model

TANG Zhonghai¹, LUO Hualin², WANG Jianhua¹, LIU Jialin¹, YOU Zhangqiang^{1,*}

1 Ecological Security and Protection Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang Normal University, Mianyang 621000, China

2 Baiyu Nature Reserve Service Center, Forestry and Grassland Bureau, Ganzi 627150, China

Abstract: Habitat degradation, which was resulted from global warming and human disturbance, has put the survival and distribution of wild mammals in jeopardy. In order to provide a theoretical basis for the future conservation of white-lipped deer (*Cervus albirostris*), an endemic deer to Qinghai-Tibet deer, this paper tries to explore and simulate the dominant climatic and ecological factors that affect distribution pattern and area of the potential suitable habitat for white-lipped deer. Based on 491 geographical distribution samples, among which 372 samples were collected from literature and 119 samples were collected during our field investigation, within the distribution range of white-lipped deer, the maximum entropy model (Maxent) to simulate the geographical distribution of potential suitable habitat for white-lipped deer in 2040 (2021—2040)

基金项目: 四川省科学技术厅应用基础研究项目 (19YYJC2027); 四川省教育厅科研计划项目 (18ZA0254)

收稿日期: 2021-06-07; 网络出版日期: 2022-07-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: youzq@mtc.edu.cn

and 2100 (2081—2100) under two shared socio-economic pathways (SSP1-2.6 and SSP5-8.5). The receiver operating characteristic curve, Jackknife test and the present contribution of the environmental factors are carried out to analyze to the factors that limiting the distribution pattern and area of potential suitable habitat of white-lipped deer. The model results showed that there were environmental factors, including vegetation type, the mean temperature of the warmest quarter, the highest temperature in warmest quarter and elevation, were the most important factors that affect the distribution pattern and area of potential suitable habitat for white-lipped deer. The area of potential suitable habitat for white-lipped deer has decreased under the both two shared socio-economic pathways from 2021 to 2100, with the south of Tibet, Three Parallel Rivers Region and the border zone of Qinghai, Sichuan and Gansu being the most affected. Furthermore, the average elevation of potentially suitable habitat for white-lipped deer increased, and its centroid shifted to high latitude. The highest and the lowest proportions of the potential suitable habitat were 76.11% and 26.92% under SSP1-2.6, while it was 93.17—98.51% under SSP5-8.5, which distributed in the protection gap analysis (GAP) ranges of the national barrier zone, national nature reserve, and non-national nature reserve of China. Our findings revealed that global warming primarily affected the potential suitable habitat of white-lipped deer by causing warming on the Qinghai-Tibet Plateau during the warm season, and that more than 73.80% of the potential suitable habitat was still outside of the current protected area. The global social economic development model, which should achieve sustainable development status as soon as possible, as well as GAP conservation planning, should be extremely beneficial to future biodiversity conservation.

Key Words: white-lipped deer; global warming; potential suitable habitat; Maxent model

生物多样性保护与气候变化的应对是当今两大全球性热点环境问题^[1]。气候被认为是在区域和全球尺度影响生物多样性的重要因子,气候变暖已经导致全球许多野生动物面临严重的生存危机^[2]。据联合国政府间气候变化委员会(Inter-Government Panel on Climate Change, IPCC)评估分析,在 20 世纪,全球平均气温上升了 0.85℃,并且还将持续变暖^[3]。为适应全球气候变暖,许多野生动物向高海拔与或高纬度区域迁徙^[4-5],而仅少部分物种通过调节自身物候停留在原分布区内^[6]。通过模型模拟预测野生动物在全球气候变暖背景下未来潜在适宜生境分布格局与变化趋势,了解物种对全球气候变暖的适应对策,对制定生物多样性保护与管理策略具有非常重要的作用与意义^[7]。

物种分布模型(Species Distribution Models SDMs)可以根据生物气候及其他环境因子模拟预测物种的潜在地理分布^[8],因此在野生动植物生境分布研究中得到广泛应用。其中最大熵模型(maximum entropy modeling, Maxent)是基于环境变量及物种出现点位,通过机器学习和根据最大熵原理对物种地理分布进行模拟预测的物种分布模型^[9]。由于该模型可以在物种分布位点和环境变量之间相关不明确的情况下模拟预测物种潜在适宜生境分布,并以概率的形式反映物种对生境的偏好程度等优点,该模型自推出至今,已经广泛应用于潜在适宜生境分布的模拟预测^[10-12]。

保护空白分析(Protection gap analysis, GAP)是将物种的栖息地评估、潜在适宜生境范围与保护区网络或优先保护区域等空间信息进行交集分析,提供研究区域的物种组成、物种分布、当前的保护状态及保护空缺^[13]。GAP 分析强调每一物种在已有的保护区网络中都得到保护,而未出现的物种分布区就是空缺区域^[14]。该方法广泛应用于物种保护和自然保护区建设规划。

白唇鹿(*Cervus albirostris*),别名“白鼻鹿”、“黄鹿”、“岩鹿”、“红鹿”,是中国特有鹿种之一,仅分布于青藏高原及其周边区域的甘肃、青海、四川、云南和西藏境内 3500—5500m 海拔区域^[15]。白唇鹿属国家 I 级重点保护野生动物,在中国生物多样性红色名录中将其列为濒危(EN)物种^[16],被世界自然保护联盟(IUCN)列为易危(VU)物种^[17]。由于白唇鹿种群数量较小,分布区域环境特殊,研究难度很大。目前对白唇鹿的研究主要集中在形态特征、繁殖、生境选择、食性及肠道菌群特征等^[15-18]。基于生物气候(WorldClim data v2.1)对白唇鹿潜在适宜生境分布模拟预测并进行相应的保护评价还未见相关报道。本研究基于最大熵模型模拟预测

在 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 两种气候变化情况下,白唇鹿在 2040(2021—2040 年)年和 2100(2081—2100 年)年潜在适宜生境,探讨全球气候变化对白唇鹿分布格局的影响,揭示白唇鹿对全球气候变暖的适应对策,并开展白唇鹿潜在适宜生境的保护评价,对在全球气候变暖背景下白唇鹿的管理与保护提供科学依据。本研究旨在解决以下问题:(1)分析影响白唇鹿潜在适宜生境分布的主要环境因子;(2)模拟预测在 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 两种气候变化情况下,白唇鹿在 2040 和 2100 年的潜在适宜生境分布格局及变化趋势;(3)分析全球气候变暖情况下白唇鹿潜在适宜生境的保护状态。通过本研究以期了解该物种对全球气候变暖的适应对策及潜在适宜生境的保护情况,为该物种的管理与保护提供科学依据。

1 数据来源及分析方法

1.1 研究区域概况

青藏高原被誉为“世界第三极”,是生物多样性的敏感区域^[19],植被类型以高寒草甸和高寒草原为主^[20]。近年来,研究发现气候变化和人类活动对青藏高原的影响越来越明显,随着全球气候变化的加剧,1960—2006 年期间,青藏高原平均气温升高约 0.03—0.05℃,年平均降水变化不显著^[21]。由于青藏高原的生态脆弱性、对气候变化的敏感性以及不断加剧的人类活动,该地区面临严峻的退化演替形势^[22]。祁连山位于青藏高原东北缘,横跨甘肃和青海两省,是青藏、内蒙古、黄土高原的分界线,在自然气候分区上起着非常重要的作用。祁连山脉位于季风区、非季风区和青藏高原区三大气候区的交汇处,降水量呈自东向西的递减趋势,山区多于平原,年均降水量 30—600mm 左右^[23]。祁连山的中、东段属大陆性半干旱高山草原气候,西段属大陆性干旱荒漠气候。独特的地理环境和气候条件孕育了森林、草原、湿地、荒漠等生态系统。白唇鹿主要分布于青藏高原东缘及其毗邻区域和祁连山中西段区域。这两个区域都是全球气候变化敏感区域,开展潜在适宜生境模拟分析,能为在全球气候变化对生物多样性影响与日俱增的情况下,深入探究白唇鹿及其他野生动物对高原环境的适应提供重要理论依据。

1.2 白唇鹿分布数据

本研究共获得 491 个白唇鹿分布位点数据。其中来源于文献记录的分布点 372 个,文献资料包括《中国哺乳动物分布》^[24]、《中国白唇鹿》^[25]、《中国哺乳动物多样性及地理分布》^[26];野外调查记录的分布点 119 个,为本研究组在 2009—2020 年期间在西藏工布江达、四川察青松多白唇鹿国家级自然保护区和甘肃祁连山国家级自然保护区的野外调查记录。根据 Maxent 模型对物种分布数据格式要求,将分布位点数据保存为 CSV 格式以满足 Maxent 模型运算需求。

1.3 环境数据获取

研究表明植被类型、人为干扰和地形因子是影响白唇鹿夏季生境选择的关键因子^[27],因此本研究选择了包含以上环境因子和生物气候因子变量共 26 个,其中生物气候变量 19 个,地形变量 3 个,到河流距离变量 1 个,到湖泊距离变量 1 个,归一化植被指数变量 1 个,植被类型变量 1 个。

生物气候数据来自 WorldClim 数据库(WorldClim v2.1)(<https://www.worldclim.org/>)。生物气候数据 2.1 版中的社会共享经济路径(SSPs)比 2.0 版中浓度路径(representative concentration pathways, RCPs)的起始点更高,预测情景更加平缓,更接近未来气候变化真实值^[28]。生物气候数据 2.1 版是基于 5 种社会共享经济路径(SSP1-5)模拟了全球未来 80 年内气候变化情况,其中 SSP1 是模拟基于全球所有国家于 2020 年加入以可持续发展为目标的全球经济发展策略(SPAs: shared policy assumptions)条件下全球气候变化情况,该模式下社会经济发展对全球气候变化影响最小;SSP5 则相反,是模拟全球社会经济发展模式未能在 2020 年实现以可持续发展为目标的情况下全球气候变化情况,该模式下社会经济发展对全球气候变化影响最明显。本研究中我们选择了社会经济发展模式对全球气候变化影响最小(SSP1)和最明显(SSP5)的生物气候数据(GCM: BCC-CSM2-MR, 分辨率为 2.5min)用于模拟白唇鹿潜在适宜生境分布格局与变化。选择 2040(2021—2040)年期间的模拟情况作为当前白唇鹿潜在适宜生境分布格局,选择 2100 年的模拟作为未来白唇鹿潜在适宜生

境分布格局,旨在模拟两种不同社会共享经济模式下,比较分析在未来 80 年期间全球气候变化对白唇鹿潜在适宜生境的影响及保护状况。地形数据包括海拔(Elevation)、坡度(Slope)和坡向(Aspect),三个地形变量都是利用 ArcGIS(v 10.8)从中国数字高程(DEM)提取。中国数字高程数据来自 NASA (<http://srtm.csi.cgiar.org/>, SRTM30, version 2.1)。中国河流、湖泊和植被类型数据来自资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。人类足迹指数数据来自社会经济数据和应用中心(Socioeconomic Data and Applications Center, SEDAC) (<https://sedac.ciesin.columbia.edu/>)。中国国家生态屏障区数据来自(<http://geodoi.ac.cn/>),中国自然保护区数据来自(<https://www.resdc.cn/>)。

1.4 数据处理

利用 ArcGIS(v 10.8)将所有环境数据的地理坐标系和投影坐标分别统一设置为 GCS_WGS_1984 和 WGS_1984_UTM_Zone_48N,并以四川、甘肃、青海、西藏和云南行政区域范围(数据来源:<http://www.resdc.cn/>)为掩膜进行提取,并对提取后所有环境数据统一重采样(分辨率设置 30")。利用 ArcPy 脚本对每个生物气候数据图层 19 波段提取分析(将每个波段提取为单个数据图层),然后对所有环境图层进行多值到点数据提取,获得在 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 两种情况下 2040 和 2100 年期间 4 个模型(SSP1-2.6 2040; SSP1-2.6 2100; SSP5-8.5 2040 和 SSP5.8.5 2100)中白唇鹿每个分布位点的环境变量值。利用 Pearson 相关分析和主成分分析分别对每个模型中白唇鹿分布位点的环境变量进行共线性分析。同一模型中,若两个环境变量的相关系数绝对值大于或等于 0.8,则只保留特征向量值较大的变量,经筛选后获得 4 个模型运行所需要的环境变量共 11 个(表 1)。

表 1 环境因子筛选

Table 1 The environmental factors selected

变量 Variable	描述 Describe	备注 Note
Bio_2	气温日温差 Mean Diurnal Range (Mean of monthly (max temp-min temp))	1
Bio_3	等温性 Isothermality (BIO2/BIO7) ($\times 100$)	2
Bio_4	气温季节变化 Temperature Seasonality (standard deviation $\times 100$)	1
Bio_5	最热月最高气温 Max Temperature of Warmest Month	3
Bio_10	最暖季均温 Mean Temperature of Warmest Quarter	4
Aspect	坡向 Aspect	1
Elevation	海拔 Elevation	1
Slope	坡度 Slope	1
DisToLake	到湖泊的距离 Distance to Lake	1
DisToRiver	到河流的距离 Distance to River	1
VegType	植被类型 Vegetation type	1

1:被纳入所有模型;2:只被纳入 SSP1-2.6 2040;3:被纳入除 SSP1-2.6 2040 之外的所有模型;4:被纳入 SSP1-2.6 2040 和 SSP5-8.5 2100 之外所有模型

1.5 预测模型参数设置及 GAP 分析

将白唇鹿分布位点数据(CSV 格式)和环境数据(ASCII 格式)导入 Maxent 模型(v 3.4.1)^[29]构建白唇鹿分布模型。在程序主页面中勾选构建反应曲线(Create response curves),刀切法检测环境变化的重要性(Do Jackknife to measure variable importance)和逻辑斯蒂输出(Logistic)三个选项。在设置菜单中勾选随机种子选项,并将随机测试百分比设置为 0.25,模型重复运行次数设置为 10,重复运行类型选择 Bootstrap,阈值规则选择最大训练敏感度和特异度法(Maximum training sensitivity plus specificity, MaxSS),其余参数选择默认设置。利用受试者工作特征曲线下面积(Area under the receiving operator curve, AUC)评价模型优劣,采用刀切法(Jackknife)检验环境因子的重要性。

选择测试 AUC(TEST AUC)值最大的模型结果用于白唇鹿潜在适宜生境分布分析。将所选择模型结果

的 ASC 格式进行栅格转化并定义坐标系统后(地理坐标统一设置为:GCS_WGS_1984 和投影坐标统一设置为:WGS_1984_UTM_Zone_48N),利用 ArcGIS 重分类工具对白唇鹿潜在适宜生境进行重分类分析。将白唇鹿潜在适宜生境按 0—0.25,0.25—0.50,0.50—0.75,0.75—1 进行分类。在重分类过程中我们将 0—0.25 设为 NoData,并定义不适宜生境类别,0.25—0.50 定义为低适宜生境类别,0.50—0.75 定义为中适宜生境类别,0.75—1.00 定义为高适宜生境类别。利用 ArcGIS 空间分析工具计算低、中、高适宜等级潜在生境的面积与质心,并以低、中、高适宜生境图层为掩膜,提取中国行政范围的数字高程图层到适宜生境范围,计算适宜生境的平均分布海拔。

潜在适应生境保护空白(GAP)面积的计算采用如下方法。首先,利用 ArcGIS(v 10.8)对中国国家生态屏障区数据和自然保护地数据(国家级自然保护区和地方级自然保护区)图层进行矢量化后分别计算面积。其次,将每个模型模拟的白唇鹿潜在适宜生境图层重分类后的数据进行矢量化后分别计算面积。然后,以每个模型模拟的白唇鹿低、中和高潜在适宜生境图层为“输入要素”,分别以中国国家生态屏障区数据和国家级自然保护区数据和地方级自然保护区数据为“输出要素”进行裁剪,裁剪结果图层的面积分别为三个等级潜在适宜生境范围在三个“输出要素类”图层中的面积。三个等级潜在适宜生境面积减去裁剪结果图层的面积即为白唇鹿潜在适宜生境的保护空白面积。

2 结果

2.1 模型检验评价与环境因子重要性分析

Maxent 模型结果表明,模型的 AUC 平均值为 0.95 ± 0.01 (Mean \pm SD)。根据 Phillips 等对模型自身评价依据^[29],本研究中模型运行结果中的 AUC 值较为接近 1,表明模型拟合程度较高。刀切法检验结果表明,在 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 气候变化情况下,植被类型和海拔都是影响白唇鹿在 2040 和 2100 年的潜在适宜生境分布的关键环境因子。在 SSP1-2.6 气候变化情况下,在 2040 年(2021—2040 年)期间,影响白唇鹿潜在适宜生境分布的关键生物气候因子是最暖季均温(Mean temperature of the warmest quarter, Bio_10);在 2100 年(2081—2100 年)期间,影响白唇鹿潜在适宜生境分布的关键气候因子是最热月最高气温(Max. temperature of the warmest month, Bio_5)。在 SSP5-8.5 气候变化情况下,在 2040 年对白唇鹿潜在适宜生境影响最大的气候因子是最热月最高气温(Max. temperature of the warmest month, Bio_5);在 2100 年对白唇鹿潜在适宜生境影响最大的气候因子是最暖季均温(Bio_10)。

2.2 潜在适宜生境分布格局与面积

模型模拟结果表明,在 SSP1-2.6 气候变化情况下,从 2040 到 2100 年,白唇鹿潜在适宜生境分布格局变化较为明显的区域主要集中在青海中东部和西藏南部(图 1),低、中和高适宜生境面积均在不同程度上有所下降,其中高适宜生境面积下降了 26.65%(表 2)。

在 SSP5-8.5 气候变化情况下,从 2040 年和 2100 年,白唇鹿潜在适宜生境分布格局变化明显的区域主要集中在西藏南部和青海、四川与青海三省交界区域(图 1),低、中和高适宜生境面积大小均在不同程度上有所下降,其中高适宜生境面积下降了 16.75%(表 2)。

2.3 潜在适宜生境质心与平均海拔

为了探讨白唇鹿对全球气候变暖的适应对策,分析了在未来 80 年内,两种气候变化情况下,白唇鹿潜在低、中、高适宜生境在水平和垂直方向的变化情况。结果表明,在两种共享社会经济模式影响下,白唇鹿低、中、高适宜潜在生境的质心向高纬度移动(图 2),平均海拔变化有升有降(表 2)。白唇鹿低适宜生境质心向西北移动了 0.28km,平均海拔下降了 236m;中适宜生境质心向西北移动了 0.60km,平均海拔下降了 181m;高适宜生境质心向西北移动了 0.78km,平均海拔上升了 59m(表 2)。在 SSP5-8.5 气候变化情况下,从 2040 到 2100 年,白唇鹿低适宜生境质心向东南移动了 0.13km,平均海拔变化不明显;中适宜生境质心向东北移动了 0.33km,平均海拔上升了 54m;高适宜生境质心向东北移动了 1.05km,平均海拔变化不明显(表 2)。

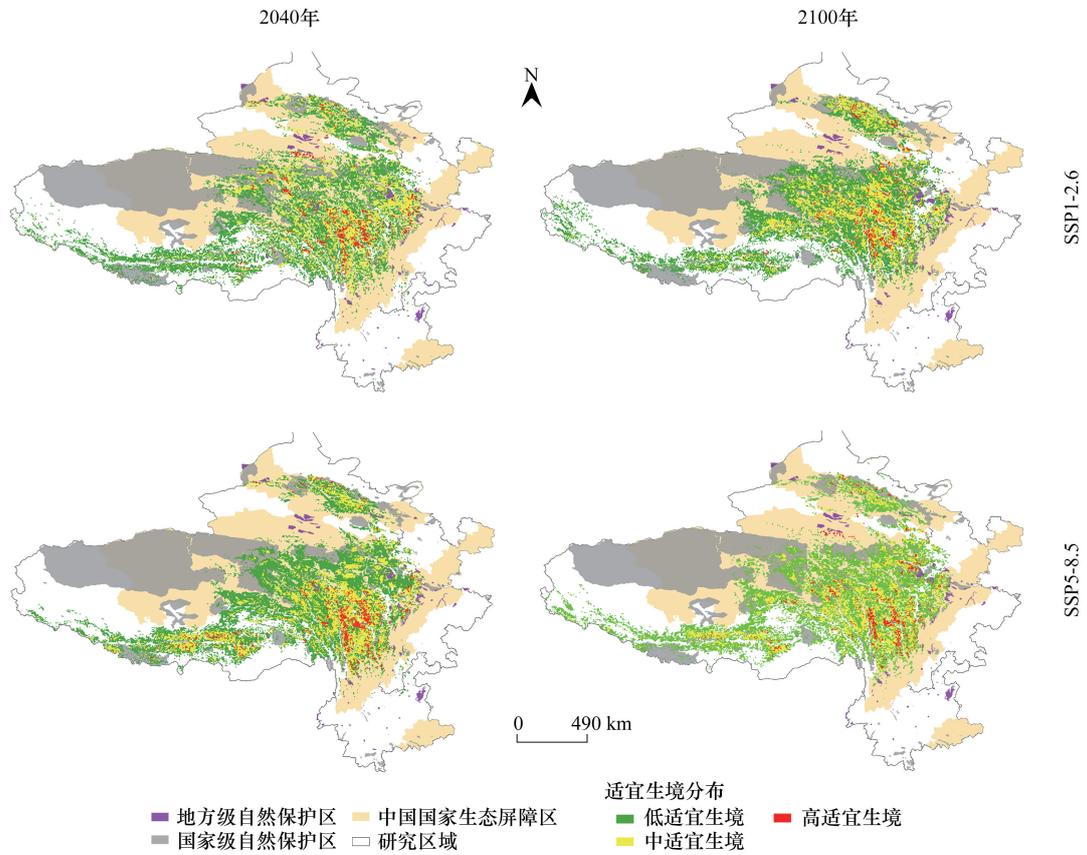


图 1 不同气候变化情况下白唇鹿总潜在适宜生境分布格局

Fig.1 Distribution patterns of total potential suitable habitat of white-lipped deer under different climate changes

表 2 白唇鹿潜在适宜生境面积、平均海拔与 GAP 分析结果

Table 2 The potential suitable habitat, average elevation and result of GAP analysis of white-lipped deer

共享社会 经济模式 Shared socio- economic pathway	时间 Time	潜在适宜 生境级别 Gradient of Potential suitable habitat	面积 Area/km ²	平均海拔 Average elevation/m	生态屏障 区内面积 Area of National Barrier Zone/km ²	国家级自 然保护区 内面积 Area of National nature reserve/km ²	地方级自 然保护区 内面积 Area of local nature reserve/km ²	生态 屏障区 GAP GAP of National Barrier Zone/%	国家级自 然保护区 GAP GAP of National nature reserve/%	地方级自 然保护区 GAP GAP of local nature reserve/%	总体 GAP Total GAP/%
SSP1-2.6	2040	低	471029	4200	241770	88404	9248	48.67	81.23	98.04	27.94
SSP1-2.6	2040	中	202935	4136	118459	38128	9281	41.63	81.21	95.43	18.27
SSP1-2.6	2040	高	23201	3910	12723	3024	1548	45.16	86.97	93.33	25.46
SSP1-2.6	2100	低	431583	3964	9248	89068	6414	97.86	79.36	98.51	75.73
SSP1-2.6	2100	中	167499	3955	9281	33874	5511	94.46	79.78	96.71	70.95
SSP1-2.6	2100	高	17018	3969	1548	2249	870	90.90	86.78	94.89	72.57
SSP5-8.5	2040	低	468700	4101	250150	94442	9952	46.63	79.85	97.88	24.36
SSP5-8.5	2040	中	196194	4149	94275	27139	6462	51.95	86.17	96.71	34.82
SSP5-8.5	2040	高	25330	4121	9324	2603	1730	63.19	89.72	93.17	46.08
SSP5-8.5	2100	低	423256	4105	225703	78831	10724	46.67	81.38	97.47	25.52
SSP5-8.5	2100	中	217505	4203	111172	32109	6453	48.89	85.24	97.03	31.16
SSP5-8.5	2100	高	21087	4124	9868	2503	1275	53.20	88.13	93.95	35.29

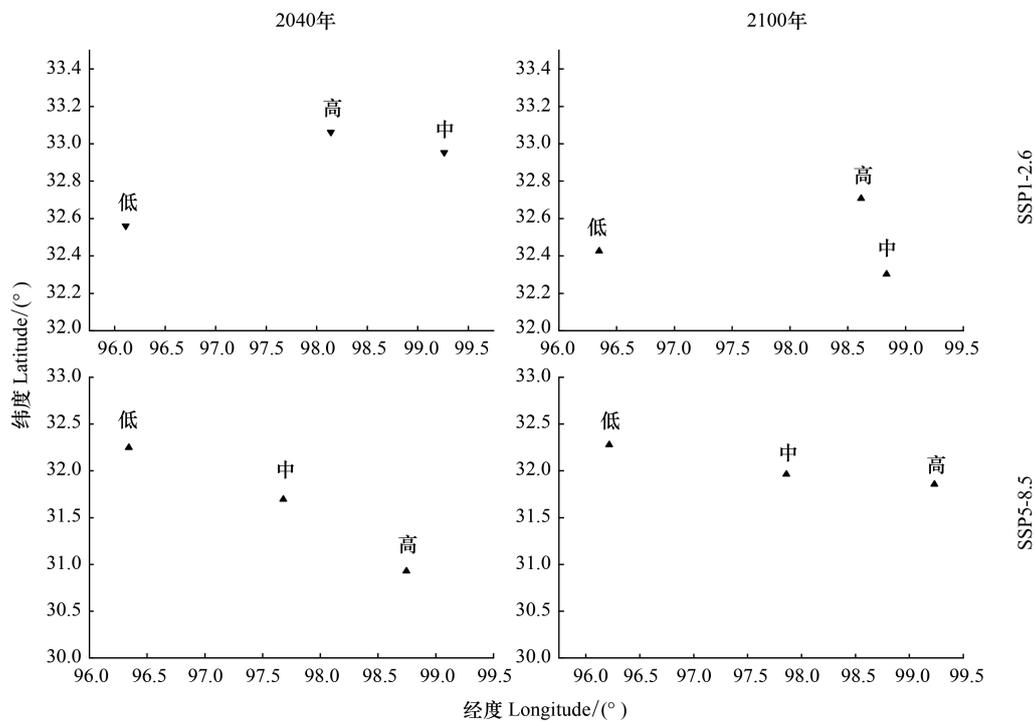


图2 白唇鹿潜在适宜生境质心

Fig.2 The centroid of potential suitable habitat of white-lipped deer

2.4 潜在适宜生境 GAP 分析

为了评价在全球气候变暖情况下潜在适宜生境的保护状态,我们分别分析了白唇鹿潜在适宜生境位于现有保护地(中国生态屏障区、中国国家级和地方级自然保护区)的情况。总体而言,白唇鹿潜在适宜生境的保护空白面积比例较大(表2)。在 SSP1-2.6 气候变化情况下,白唇鹿 2040 年的低、中、高潜在适宜生境位于中国国家生态屏障区之外的面积比例平均值为 45.15%,位于国家级自然保护区之外的面积比例平均值为 83.14%,位于地方级自然保护区外的面积比例平均值为 95.60%;与 2040 年比较,白唇鹿 2100 年的低、中、高潜在适宜生境位于中国国家生态屏障区、国家级自然保护区和地方级自然保护区的面积比例都明显下降。在 SSP5-8.5 气候变化情况下,白唇鹿 2040 年的低、中、高潜在适宜生境位于中国国家生态屏障区之外的面积比例平均值为 53.92%,位于国家级自然保护区之外的面积比例平均值为 85.25%,位于地方级自然保护区外面积比例平均值为 95.92%;与 2040 年比较,白唇鹿 2100 年的低、中、高潜在适宜生境位于中国国家生态屏障区、国家级自然保护区和地方级自然保护区的面积比例略有上升。

3 讨论

3.1 影响潜在适宜生境的环境因素

本研究结果表明植被类型、海拔、最暖季均温和最热月最高温是影响白唇鹿潜在适宜生境的关键环境因子,这与游章强等^[27]发现植被类型和海拔是影响白唇鹿夏季生境选择的关键环境因子的研究结果相似。研究表明植被类型是影响鹿科动物潜在适应生境的关键环境因素,李鑫泽等研究发现植被类型是影响马鹿(*Cervus elaphus*)、东北梅花鹿(*Cervus nippon*)和驼鹿(*Alces alces*)潜在适宜生境的关键环境因素^[30]。白唇鹿的喜食植物主要为禾本科和莎草科植物^[15,27],这些食物资源主要分布在高寒草甸和高山灌丛生境,这两类生境有明显的海拔分布,因此,食物资源的特殊类型和分布格局导致植被类型和海拔成为影响白唇鹿潜在适宜生境的关键因子。温度是影响生物生存和分布的重要环境因子,其直接影响有机体的体温,体温的高低又决定

了动物的新陈代谢过程的强度和特点以及有机体的生长和发育速度、繁殖、行为、数量和分布等^[31]。在最适温度范围内,动物生存压力较小,而在最适温度之外动物的生存压力增加,故动物趋向于最适温度范围,而远离最高温度范围。最暖季均温体现了动物对最适温度的适应,而最热月最高温则体现了动物对最高温度的耐受性。因此最暖季均温和最热月最高温是影响白唇鹿潜在适宜生境的关键环境因子。

在所有生物气候因子中,最暖季均温和最热月最高温是影响白唇鹿潜在适宜生境的主要气候因子,这可能与青藏高原气候特点相关。青藏高原被誉为世界“第三极”,平均海拔 4000m,青藏高原地区是近百年来全球增暖最显著的区域^[32],大部分地区年均温度在 0℃ 以下^[33],最热月平均温度 5.5—13.6℃^[34]。因此,在 20 世纪,尽管全球平均气温上升了 0.85℃^[3],青藏高原冷季气温上升仍然不会超出其年平均温度,对该区域的野生动物影响不明显。然而,在暖季,尤其是在最热月期间,受全球气候变暖的影响,最高温继续升高将超出该区野生动物的高温耐受范围,从而威胁到该区域内的生物多样性。

3.2 潜在适宜生境分布格局与面积

向高海拔或高纬度迁徙是野生动物对全球气候变暖适应的主要策略^[7],然而大多野生动物在向高海拔或高纬度区域迁徙过程中,都面临生境丧失的危机^[35]。本研究中,在 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 两种气候变化情况下,白唇鹿潜在适宜生境的分布格局从 2040 到 2100 年均有明显的变化,且主要发生在三江(金沙江、澜沧江和怒江)并流区域以及青海、四川和甘肃交界区域,认为这可能是白唇鹿的迁徙受三江和人类活动干扰影响所致。三江不但河面宽且流量大,受地型陡峭的影响流速快^[36],成为野生动物迁徙中不可逾越的障碍^[37]。在适应全球气候变暖的迁徙中,受三江水体的阻碍,白唇鹿在三江区域及其邻近区域的迁徙将必然受阻,呈现出往返迁徙的现象。在青海、四川和甘肃交界带区域内,白唇鹿潜在适宜生境变化明显可能是受交通道路和城市分布相对集中,海拔相对较低,植被分布连续性较低等因素的影响。

在 SSP1 和 SSP5 两种气候变化情况下,从 2040 年到 2100 年期,白唇鹿潜在适宜生境面积下降的最高比例达到 26.65%。白唇鹿潜在适宜生境面积下降可能与受全球气候变暖情况以及白唇鹿向高海拔和高纬度区域迁徙适应策略有关。研究表明,在全球山地区域中,青藏高原属“倒金字塔(Inverse pyramid)”山型,当海拔超过 3000 米以后,山体陆地表面积将急速下降^[35]。如在察青松多保护区内,地形以高山峡谷为主^[38],受该区域的山形特征影响,随着海拔上升,其陆地表面下降,白唇鹿可用生境面积随之下降。另一方面,在全球气候变暖背景下,动物的迁徙速度快于植被的扩散速度^[39],白唇鹿向高海拔高纬度区域迁徙适应过程中,虽然能回避全球气候变暖的影响,但受植被扩散滞后的影响,适宜生境面积也将下降。

3.3 潜在适宜生境保护 GAP 分析

利用物种模型模拟预测物种潜在适宜生境分布现状,能为物种管理与保护提供科学依据,然而不能对物种潜在适宜生境保护状态进行评估。本研究结果表明在全球气候变暖影响下,白唇鹿潜在适宜生境处于现有保护地范围的比例仍然较低。在 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 气候变化情况下,白唇鹿潜在适宜生境位于现有保护地的范围中的比例都变化(表 2),表明在全球气候变暖和人类活动的干扰影响的情况下,现有保护措施在白唇鹿适应全球气候变暖和人类活动干扰起到了积极的作用。然而,在 SSP1-2.6 气候变化情况下,超过一半的潜在适宜生境位于中国国家生态屏障区内,尽管在 SSP5-8.5 气候变化情况下略有下降。截至 2018 年,我国保护区面积已经覆盖了国土面积的 18%,超过了 2020 爱知生物多样性的目标 11 所拟定的 17% 的覆盖目标^[40]。然而,在 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 两种气候变化影响下,白唇鹿潜在适宜生境位于国家级自然保护区的面积比例都低于 2020 爱知生物多样性目标 11 所拟定 17%。这表明,我国在生物多样性保护中,尽管在生态屏障区和保护地建设方面提前实现了爱知生物多样性目标 2020 中关于保护地建设目标,在某些物种的保护力度仍然还有待提高。

参考文献(References):

- [1] 李海东,高吉喜.生物多样性保护适应气候变化的管理策略.生态学报,2020,40(11):3844-3850.

- [2] Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley P, Thuiller W, Courchamp F. Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 2012, 15(4): 365-377.
- [3] Hausfather, Z. Explainer: How 'Shared Socioeconomic Pathways' Explore Future Climate Change [EB/OL]. (2018-04-11) [2020-11-06]. <https://www.carbonbrief.org/explainer-how-shared-socioeconomic-pathways-explore-future-climate-change>, 2020.
- [4] Scherrer D, Schmid S, Körner C. Elevational species shifts in a warmer climate are overestimated when based on weather station data. *International Journal of Biometeorology*, 2011, 55(4): 645-654.
- [5] Chen IC, Hill J K, Ohlemuller R, Roy D B, Thomas C D. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science*, 2011, 333(333): 1024-1026.
- [6] Thackeray S J, Sparks T H, Frederiksen M, Burthe S, Bacon P J, Bell J R, Botham M S, Brereton T M, Bright P W, Carvalho L. Trophic level asynchrony in rates of phenological change for marine, freshwater and terrestrial environments. *Global Change Biology*, 2010, 16(12): 3304-3313.
- [7] Williams J W, Jackson S T, Kutzbach J E. Projected distributions of novel and disappearing climates by 2100 AD. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(14): 5738-5742.
- [8] Safaei M, Rezayan H, Zaeiaanfirozabadi P, Sadidi J. Optimization of species distribution models using a genetic algorithm for simulating climate change effects on Zagros forests in Iran. *Ecological Informatics*, 2021, 63: 101288.
- [9] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3-4): 231-259.
- [10] 白泚露, 李艳红, 郑维超, 陈万里, 谌利民, 黎大勇, 胡杰. 唐家河国家级自然保护区川金丝猴生境适宜性评价. *生态学报*, 2021, 41(11): 4460-4468.
- [11] 黎运喜, 陈佑平, 余凌帆, 涂正彬, 赵联军, 杨旭煜, 古晓东, 高强. 基于 MaxEnt 模型的二郎山廊道大熊猫栖息地适宜性评价. *四川动物*, 2016, 35(6): 833-837.
- [12] 迟翔文, 江峰, 高红梅, 覃雯, 吴彤, 张婧捷, 蔡振媛, 张同作. 三江源国家公园雪豹和岩羊生境适宜性分析. *兽类学报*, 2019, 39(4): 397-409.
- [13] 李迪强, 宋延龄. 热点地区与 GAP 分析研究进展. *生物多样性*, 2000, (2): 208-214.
- [14] Scott J M, Davis F, Csuti B, Noss R, Butterfield B, Groves C, Anderson H, Caicco S, D'Erchia F, Thomas C Edwards, Ulliman J, Wright R G. Gap analysis: a geographic approach to protection of biological diversity. *Wildlife Monographs*, 1993, 123: 3-41.
- [15] 吴家炎, 裴俊峰. 白唇鹿的研究现状及保护策略. *野生动物*, 2007, (5): 36-39.
- [16] 蒋志刚, 吴毅, 刘少英, 蒋学龙, 周开亚, 胡慧建. 中国生物多样性红色名录(脊椎动物): 哺乳动物. 科学出版社, 2021.
- [17] Harris, R. *Cervus albirostris*. The IUCN red list of threatened species 2015: e.T4256A61976756. <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2015-2.RLTS.T4256A61976756.en.2015>.
- [18] Li J G, Wang C D, Tang Z H, Guo Y Q, Zheng T C, Li Y Z, You Z Q. The Gut Bacterial Community Composition of Wild *Cervus albirostris* (White-Lipped Deer) Detected by the 16S Ribosomal RNA Gene Sequencing. *Current Microbiology*, 2017, 74: 1100-1107.
- [19] 张宪洲, 杨永平, 朴世龙, 包维楷, 汪诗平, 王根绪, 孙航, 罗天祥, 张扬建, 石培礼, 梁尔源, 沈妙根, 王景升, 高倩竹, 张懿锂, 欧阳华. 青藏高原生态变化. *科学通报*, 2015, 60(32): 3048-3056.
- [20] 刘安榕, 杨腾, 徐炜, 上官子健, 王金洲, 刘慧颖, 时玉, 褚海燕, 贺金生. 青藏高原高寒草地生物多样性: 进展、问题与展望. *生物多样性*, 2018, 26(9): 972-987.
- [21] 张中华, 周华坤, 赵新全, 姚步青, 马真, 董全民, 张振华, 王文颖, 杨元武. 青藏高原高寒草地生物多样性与生态系统功能的关系. *生物多样性*, 2018, 26(2): 111-129.
- [22] 赵新全, 周华坤. 三江源区生态环境退化、恢复治理及其可持续发展. *中国科学院院刊*, 2005, (6): 471-476.
- [23] 吴吉春, 盛煜, 李静, 王杰. 疏勒河源区的多年冻土. *地理学报*, 2009, 64(5): 571-580.
- [24] 张荣祖. 中国哺乳动物分布. 北京: 中国林业出版社, 1997.
- [25] 吴家炎, 王伟. 中国白唇鹿. 北京: 中国林业出版社, 1999.
- [26] 蒋志刚. 中国哺乳动物多样性及地理分布. 北京: 科学出版社, 2015.
- [27] 游章强, 唐中海, 杨远斌, 杨丽红, 石红艳, 刘昊, 甘潇, 郑天才, 蒋志刚. 察青松多白唇鹿国家级自然保护区白唇鹿对夏季生境的选择. *兽类学报*, 2014, (1): 46-53.
- [28] Riahi K, van Vuuren D P, Kriegler E, Edmonds J, O'Neill B C, Fujimori S, Bauer N, Calvin K, Dellink R, Fricko O, Lutz W, Popp A, Cuaresma J C, KC S, Leimbach M, Jiang L W, Kram T, Rao S, Tavoni M. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and

- greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 2017, 42: 153-168.
- [29] Phillips S J, Anderson R P, Dudík M, Schapire R E, Blair M E. Opening the black box: an open-source release of Maxent. *Ecography*, 2017, 40(7): 887-893.
- [30] 李鑫泽, 冯佳楠, 支晓亮, 钟林强, 刘鑫鑫, 张明海. 东北地区三种鹿科动物潜在栖息地预测与保护空缺分析. *野生动物学报*, 2021, 42(2): 318-328.
- [31] 孙儒泳. 动物生态学原理 第3版. 北京: 北京师范大学出版社, 2001.
- [32] 李菲, 郜永祺, 万欣, 李倩, 郭东林, 王朋岭, 李惠心. 全球变暖与地球“三极”气候变化. *大气科学学报*, 2021, 44(1): 1-11.
- [33] 刘晓东, 侯萍. 青藏高原及其邻近地区近 30 年气候变暖与海拔高度的关系. *高原气象*, 1998, 17(3): 245-249.
- [34] 赵雪雁, 万文玉, 王伟军. 近 50 年气候变化对青藏高原牧草生产潜力及物候期的影响. *中国生态农业学报*, 2016, 24(4): 532-543.
- [35] Elsen P R, Tingley M W. Global mountain topography and the fate of montane species under climate change. *Nature Climate Change*, 2015, 5(8): 772-776.
- [36] Liu X D, Chen B D. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(14): 1729-1742.
- [37] Wang T Y, Wu T H, Wang P, Li R, Xie C W, Zou D F. Spatial distribution and changes of permafrost on the Qinghai-Tibet Plateau revealed by statistical models during the period of 1980 to 2010. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 661-670.
- [38] 刘少英, 冉江洪, 曾宗永, 谢嗣光, 张黎明. 四川察青松多自然保护区综合科学考. 2001.
- [39] Colwell R K, Brehm G, Cardelus C L, Gilman A C, Longino J T. Global Warming, Elevational Range Shifts, and Lowland Biotic Attrition in the Wet Tropics. *Science*, 2008, 322(5899): 258-261.
- [40] You Z Q, Hu J H, Wei Q, Li C W, Deng X F, Jiang Z G. Pitfall of big databases. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(39): E9026-E9028.