DOI: 10.5846/stxb201409161838
张微, 姜哲, 巩虎忠, 栾晓峰.气候变化对东北濒危动物驼鹿潜在生境影响.生态学报,2016,36(7): - .
Zhang W, Jiang Z, Gong H Z, Luan X F.Effects of climate change on the potential habitat of *Alces alces cameloides*, an endangered species in Northeastern China.Acta Ecologica Sinica,2016,36(7): - .

气候变化对东北濒危动物驼鹿潜在生境影响

张　微[1], 姜　哲[1], 巩虎忠[2], 栾晓峰[1,*]
1 北京林业大学自然保护区学院, 北京　100083
2 甘肃小陇山自然保护区, 天水　741020

摘要:气候变化是造成生物多样性下降和物种灭绝的主要因素之一。研究气候变化对物种生境,尤其是濒危物种生境影响对未来保护物种多样性和保持生态系统功能完整性具有重要意义。本文以驼鹿乌苏里亚种(*Alces alces cameloides*)为研究对象,选取了对驼鹿分布可能存在影响的 22 个环境因子,利用最大熵(Maxent)模型模拟了驼鹿基准气候条件下在我国东北的潜在生境分布,并预测了 RCP4.5 和 RCP8.5 两种气候变化情景下 2041—2060 年(2050s)、2061—2080 年(2070s)驼鹿潜在分布,采用接收工作曲线下面积(AUC)对模型预测能力进行评估。研究结果表明:最大熵模型预测驼鹿潜在生境分布的精度较高(平均 AUC 值为 0.845),22 个环境因子中,年均温、最暖季均温、年降水、平均日较差是影响驼鹿生境分布的主要因子。基准气候条件下,驼鹿的潜在生境面积占研究区域总面积的 36.4%,潜在生境分布区主要在大、小兴安岭。随着时间的推移,研究区内驼鹿当前潜在生境面积明显减少,而新增潜在生境面积较少,总面积呈现急剧减少的趋势,其中 RCP8.5 情景减少程度大于 RCP4.5 情景。至 2050s 阶段,当前潜在生境面积平均将减少 62.3%,新增潜在分布面积平均仅为 3.6%,总潜在生境面积最高将减少 65.6%,平均将减少 58.8%;至 2070s 阶段,当前潜在生境面积平均将减少 75.8%,新增潜在分布面积平均仅为 1.9%,总潜在生境面积最高将减少 93.1%,平均减少 73.9%。空间分布上,驼鹿的潜在生境的几何中心将先向西北移动,然后再向高纬度地区西南方向迁移,至 2050s 阶段,潜在分布生境的几何中心在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的迁移距离分别为 183.5 km 和 210.8 km;至 2070s 阶段,相应情景下的迁移距离将缩短至 28.7 km 和 33.8 km。潜在生境分布整体呈现向高海拔、高纬度迁移的趋势。

关键词:气候变化; Maxent 模型; 生境; 驼鹿

Effects of climate change on the potential habitat of *Alces alces cameloides*, an endangered species in Northeastern China

ZHANG Wei[1], JIANG Zhe[1], GONG Huzhong[2], LUAN Xiaofeng[1,*]
1 *College of Nature Conservation*, *Beijing Forestry University*, *Beijing* 100083, *China*
2 *Xiaolongshan Nature Reserve of Gansu Province*, *Tianshui* 741020, *China*

Abstract: Earth is undergoing an obvious global warming, which has attracted the attention of people and governments worldwide. In fact, global warming exerts a negative effect on people and various other species. Climate change greatly affects plant and animal growth; it is one of the main factors for the decline in biodiversity and species extinction. Therefore, it is important to study how climate affects species habitats, especially those of endangered species, to protect biodiversity and maintain the functional integrity of the ecosystem. We used the maximum entropy model (Maxent) and selected 22 different environmental factors that may influence the distribution of the moose (*Alces alces cameloides*) to simulate the distribution of its potential habitat in Northeastern China under the current climate conditions (1950—2000). The future potential habitats for the moose were also predicted in two periods, 2041—2060 and 2061—2080, under two

基金项目:国家科技支撑项目(2013BAC09B02)
收稿日期:2014-09-16;　　**网络出版日期**:2015- -
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: luanxiaofeng@ bjfu.edu.cn

climate change scenarios, RCP4.5 and RCP8.5. Furthermore, we evaluated the performance of this model by using the area under the curve (AUC) of the receiver operator characteristic curve. The results show that the prediction of Maxent is precise and acceptable (mean AUC = 0.845). Among the 22 environmental factors, annual mean temperature, mean temperature of the warmest quarter, annual precipitation, and mean diurnal range have great influences on potential habitats for the moose. Under current climate conditions, 36.4% of the study area, mainly the Greater and Lesser Khingan Mountains, is a potential habitat for the moose. With climate change, the area of the potential habitat in the study area would decrease faster than the increase rate of a new potential habitat, resulting in a rapid decline in the area of the entire potential habitat. The decline in RCP8.5 climate scenarios is higher than that in RCP4.5 climate scenarios. By 2041—2060, the current potential distribution will reduce by 62.3%; the new potential distribution will increase by 3.6%; and the maximum total potential distribution will decrease by 65.6%, with an average decrease of 58.8%. By 2061—2080, the current potential distribution will decrease by 75.8%; the new potential distribution will increase by 1.9%; and the maximum total potential distribution will decrease by 93.1%, with an average decrease of 73.9%. In terms of spatial distribution of the potential habitat for the moose, the geometric center of the potential habitat will first move northwest, and then move southwest. By 2041—2060, the center of the potential habitat in RCP4.5 and RCP8.5 will shift by 183.5 km and 210.8 km, respectively; by 2061—2080, the corresponding distance will shrink to 28.7 km and 33.8 km, respectively. On the basis of these data, it can be safely concluded that the potential distribution of moose will generally shift to a region at a higher latitude and altitude. Therefore, measures for the protection of habitats for the moose in Northeastern China are urgently required.

Key Words: climate change; maximum entropy model (Maxent); habitat; moose

气候变化是制约生物生长、发育和繁衍的主要因素之一,现有研究表明,温度上升、降水格局变化及其他气候极端事件已对生物产生广泛的影响[1],气候变化对物种,尤其是濒危物种的栖息地及其分布变化的影响已成为研究热点[2]。目前,准确确定气候变化对濒危物种分布的影响是有效保护物种的理论基础,也是当前保护生物学家面临的重要问题[3]。

物种分布信息是种群生态学的基本研究内容之一,是种群动态分析和种群未来发展趋势预测不可缺少的参数,能用于物种受胁程度评估和保护效绩评价[4]。物种分布模型(Species Distribution Modeling)是基于物种分布信息及周边环境信息,模拟物种分布的主要方法,在预测种群分布动态及区域物种多样性变化领域已得到应用[5-6]。Tian Yu 应用最大熵(Maximum Entropy,Maxent)模型模拟了东北虎(*Panthera tigris altaica*)未来生境分布,并提出未来高排放情景下东北虎潜在生境面积急剧下降,且在我国将会灭绝[7]。罗翀应用生态位因素分析(Ecological Niche Factor Analysis,ENFA)模型和 Maxent 模型预测林麝(*Moschus berezovskii*)在秦岭山系的生境分布[8]。吴建国利用分类-回归树(Classification And Regression Trees,CART)模型分析了在气候变化下大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)的生境变化[9]。

驼鹿(*Alces alces*)隶属于哺乳纲(Mammalia)偶蹄目(Artiodactyla)鹿科(Cervidae)驼鹿属(*Alces*),是体型最大的鹿科动物。具有较高的经济、药用价值。全球仅 8 亚种,分布于欧亚大陆和北美,我国有两个亚种:分布于我国东北的乌苏里亚种(*A. a. cameloides*)和分布于新疆阿尔泰山区的欧亚驼鹿指名亚种(*A. a. alces*)[10],本次研究对象为驼鹿乌苏里亚种。该亚种曾由于大规模的森林、植被的破坏和乱捕滥猎而导致物种数量急剧下降。1976 年的调查认为黑龙江约有驼鹿 18000 头,到 1987 年仅有约 9955 头,数量下降了 45%[11]。目前,该物种已列入 IUCN 物种红色名录,为国家Ⅱ级重点保护动物,被《中国物种红色名录》列为濒危物种。我国东北地区是驼鹿在亚洲的最南分布区,其栖息地变化对于该物种的生物地理学、保护生物学研究极为重要。而我国当前对驼鹿的研究主要以动物生物学研究和本底调查为主[10,12-16],对于气候变化引起的驼鹿生境分布、种群数量的变化至今报道较少:Lenarz 研究表明温度上升使得驼鹿种群数量减少、分布南界线北

移;窦洪亮的研究也证明了这一结论,并进一步提出晚春的温度是影响驼鹿分布和数量的关键温度变量[17-18];Aanes 研究提出冬季降水量的增加使得鹿科动物的种群数量减少[19]。因此,为更好地保护驼鹿的生境,笔者基于驼鹿当前分布现状,结合气候物种模型,预测分析了未来气候情景下驼鹿潜在生境分布的变化。

1　研究区域概况

根据驼鹿乌苏里亚种的历史调查分布范围,我们选择大、小兴安岭作为本次的研究区域(图 1),行政区域包括黑龙江全省和内蒙古东北部,总面积为 74.8 万 km^2,地理坐标为 N43°4′—53°17′,E115°30′—135°06′。气候属于温带湿润、半湿润季风气候区,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,年均温为-9—5.5 ℃,年降水为 170—850 mm(数据来源于 WorldClim 下载的约 1 km×1 km 气候栅格数据)。研究区内野生动物资源种类繁多,区系复杂,其中包括紫貂(*Martes zibellina*)、大鸨(*Otis tarda*)等多种国家Ⅰ级重点保护动物,在中国动物地理区划中,属古北界东北亚界东北区[20]。

2　数据来源和研究方法

2.1　驼鹿的空间分布数据

本文通过查阅文献和标本资料获取驼鹿分布位点。具体资料来源包括(1)从中国数字标本馆查询的驼鹿标本分布点[21]。(2)从动物志获取驼鹿的分布资料,包括《中国经济动物志—兽类》、《中国东北地区珍稀濒危动物志》、《黑龙江兽类志》、中国珍稀濒危动物红皮书、中国哺乳动物分布[11,20,22-24]。(3)选取研究区域的相关科学考察报告,从中提取有效的驼鹿分布数据作为补充[25]。(4)从数据库(中国知网、万方数据库)上以驼鹿为关键词查询到的文献资料,从中筛选介绍驼鹿分布数据的文献 3 篇,作为资料补充[14-15,26]。将动物志及期刊的信息整合作为基础信息,用以校对地方志数据。(5)从中国国家图书馆、万方数据库查询新方志,在研究区域筛选出有记载动物分布信息的 341 本,从中挑选有驼鹿记载的分布信息作为基础资料。由于大多数分布数据记载的地点为城镇或林场、农场,属于面数据,对此我们通过 ArcGIS10.0 结合 Google Earth 提取这些面数据的中心经纬度坐标作为驼鹿分布点,获得 109 个驼鹿分布记录点。

我们利用驼鹿适宜生境分布区图来对 109 个分布记录点进行校对,此图通过在 ArcGIS10.0 中根据驼鹿的生境需求信息与 1:100 万数字化植被图层进行叠加获得,当分布记录点不在驼鹿适宜生境区中则将此分布记录点去除。另外,为排除驼鹿所取得空间分布点因距离过近而导致的空间自相关,我们在 ArcGIS10.0 中对分布点进行缓冲区分析,缓冲半径设置为驼鹿日活动面积半径 7.5 km[27],当 2 个分布点的距离小于 15 km 时,只取其中 1 点。通过上述方法对获得的 109 驼鹿分布记录点进行校对、筛选,最终确定 74 个驼鹿分布点。

1:100 万数字化植被图数据由中国生态系统与生态功能区划数据库网站下载[28]。

2.2　预测环境因子

本研究共选取与驼鹿分布相关的 22 个预测环境因子(表 1)。选用的 19 个气候因子主要反映了温度与降水的特点及季节性变化特征[29],这些气候因子因具有较强的生物学意义已被广泛应用于物种栖息地的预测中[30]。19 个气候因子数据从 WorldClim 气候数据集(1.4 版)下载[31],此数据集为目前公开可获得的最高分辨率的气候数据(约 1 km),每个气候因子均是 1950—2000 年的平均值。选取的 3 个地形因子为:海拔、坡度和坡向,数据均从国家地理空间数据云 SRTM 数据集(4.1 版)中下载,分辨率为 90 m[32]。

利用 ArcGIS10.0 将所有环境因子栅格数据统一到相同坐标系、相同范围、1 km×1 km 分辨率下。

2.3　未来气候情景数据

本文采用中等温室气体排放情景(RCP4.5)和最高温室气体排放情景(RCP8.5)作为未来气候变化情景。RCPs(Representative Concentration Pathways)情景为政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,IPCC)第 5 次评估报告开发的以本世纪末的辐射强迫大小命名的气候变化新情景,共包括 4 种情景(RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5)。与前人研究常采用的排放情景(Special Report on Emissions

Scenarios,SRES)相比[9,33],RCPs 情景进一步考虑了应对气候变化的各种策略对未来温室气体排放的影响,更科学地描述了未来气候变化预估结果[34]。

在 RCP4.5 情景下,至 2041—2060 年(2050s)和 2061—2080 年(2070s)研究区内年平均温度分别比基准年(1950—2000 年)升高了 2.71 ℃和 3.09 ℃,年降水量分别比基准增加了 61.82 mm 和 78.78 mm。在 RCP8.5 情景下,至 2041—2060 年和 2061—2080 年,年平均温度分别比基准年升高了 3.55 ℃和 5.52 ℃,年降水量分别比基准增加了 70.41 mm 和 84.58 mm。

相应的 19 个气候因子分别是 2041—2060 年、2061—2080 年 30 年的平均值。

2.4 模型的模拟与评估

选用基于最大熵理论的 Maxent 模型来模拟气候变化下驼鹿潜在生境分布,该模型具有较高的预测精度与良好的稳定性,在物种分布模型中具有一定的竞争力[35]。

采用 Maxent3.1.0 建模时,输入驼鹿分布点数据和 22 个环境因子数据,随机选取 75%的驼鹿分布点建立模型,剩余 25%的驼鹿分布点验证模型,选择创建环境变量反应曲线,其余参数设为模型默认值。采用接收工作机特征曲线下的面积(AUC)对模型精度进行评价。AUC 值因不受诊断阈值影响,且对物种发生率(Prevalence)不敏感,目前被公认为是最优的模型预测指标[36]。AUC 值评价模型的评估标准:0.90—1.00,极好;0.80—0.90,好;0.70—0.80,一般;0.60—0.70,差;0.50—0.60,失败[37]。

模型模拟输出结果为物种存在概率栅格图,值在 0—1 内,值越接近 1 表示物种越可能存在。本研究采用灵敏度和特异度之和最大时对应的物种存在概率值 $P(P=0.32)$ 作为阈值[38],将驼鹿潜在生境分类为:适宜生境($P>0.32$)和不适宜生境($P\leqslant0.32$)。因驼鹿的潜在生境分布不规则,很难确定其生境分布的边界,本研究借助 ArcGIS10.0 的质心(Centroid)工具来分析驼鹿潜在适宜生境分布格局的变化。

3 研究结果

3.1 驼鹿当前潜在生境分布

输出结果中,模型训练数据集和测试数据集的 AUC 值分别为 0.879 和 0.811,表明模型对驼鹿潜在生境的预测效果较好。

物种存在概率栅格图显示当前驼鹿适宜生境分布面积为 272,155 km^2,为研究总面积的 36.4%,其适宜生境分布在大、小兴安岭,这与现实已观测到的结果相符。为进一步分析潜在生境的适宜度,将驼鹿适宜生境分为最适宜生境($P>0.5$) 和中适宜生境($0.32<P\leqslant0.5$)(图 1)[39]。结果显示驼鹿最适宜生境面积和中适宜生境的面积分别占研究总面积的 18.9%和 17.5%。其中最适宜生境集中分布在黑龙江的漠河县、塔河县、呼玛县、孙吴县、逊克县和伊春市市辖区北部和内蒙古鄂伦春自治旗、根河市、额尔古纳北部、牙克石市北部。

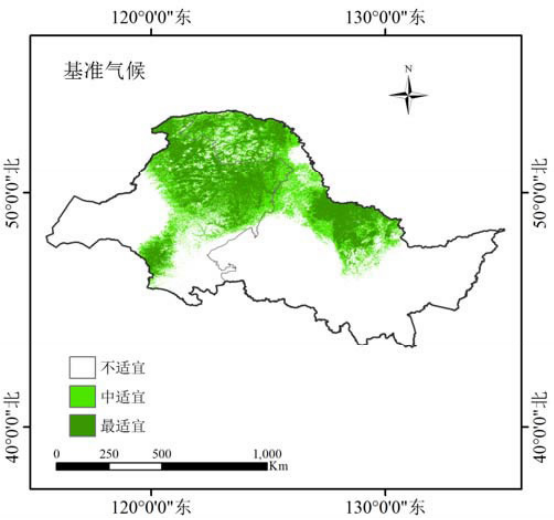

图 1 驼鹿适宜分布区

Fig. 1 Distribution of habitat suitability for moose

3.2 影响驼鹿潜在生境分布的重要因子分析

22 个环境变量对模型的贡献率是不相等的(表 1),对模型贡献率较大的环境变量依次为年均温(30.94%)、最暖季均温(16.37%)、年降水(9.68%)、平均日较差(9.67%),此 4 个环境累计贡献率达到 66.66%。22 个环境变量中,温度相关变量对模型的累计贡献率为 74.36%,平均贡献率为 6.76%;降水相关变量对模型的贡献率少于温度相关变量,最高贡献率为 9.68%(年降水),最低贡献率为 0.07%(最冷月降水),平均贡献率为 1.96%。3 个地形变量:高程、坡度和坡向的贡献率依次是 5.09%、2.71%、2.15%。

为分析驼鹿潜在分布概率与主要限制因子的关系,将上述对模型贡献率最大的 4 个环境变量分别导入 Maxent 模型中进行单因子建模,获得驼鹿存在概率对单变量的反应曲线(图 2)。由图可知,当驼鹿出现时(P>0.32),年均温范围为-10—1 ℃,最暖季均温范围为 10—19 ℃,年降水为 400—720 mm,平均日较差大于 13 ℃。

3.3　气候变化下驼鹿空间分布格局的变化

对驼鹿适宜分布区的质心变化分析表明,随着时间推移,在 RCP4.5、RCP8.5 未来气候情景下,驼鹿适宜分布区的空间变化一致,即驼鹿适宜分布区逐渐向高纬度、高海拔地区迁移。至 2050s 阶段,驼鹿适宜分布区质心在 RCP4.5、RCP8.5 情景下均向西北方向迁移,相应的迁移距离分别为 183.5 km、210.8 km,随后至 2070s 阶段适宜分布区质心向高海拔地区西南方向迁移,相应的迁移距离分别为 28.7 km、33.8 km。

3.4　气候变化下驼鹿分布区面积的变化

气候变化下,当前驼鹿适宜生境面积的减少和新驼鹿适宜生境面积的增加引起了驼鹿总适宜生境面积变化。利用 ArcGIS10.0 对未来驼鹿适宜生境(P>0.32)变化的面积和比例进行统计(表 2)。表 2 显示,气候变化对驼鹿的生境分布面积产生极大的影响。随着时间的推移,两种气候变化情景下研究区内驼鹿当前潜在生境面积明显减少,而新增潜在生境面积较少,总面积呈现急剧减少的趋势。在 RCP4.5 情景下,驼鹿总适宜生境面积在 2050s 和 2070s 阶段分别减少 51.9%、54.7%,而在 RCP8.5 情景下,驼鹿总生境面积减少幅度将大于 RCP4.5 情景,其在相应阶段分别减少 65.6%、93.1%。至 2070s 阶段,当前潜在生境面积平均将减少 75.8%,新增潜在生境面积平均仅为 1.9%,总潜在生境面积平均将减少 73.9%。

表 1　用于 Maxent 模型中的环境变量描述及贡献率

Table 1　The description and percent contribution of environment variables in Maxent

变量代码 Code	描述 Description	贡献率/% Contribution
气候变量	Climatic variables	
Bio1	年均温 /℃	30.94
Bio2	平均日较差(月最高温与最低温的差值的平均/℃)	9.67
Bio3	等温性(Bio2/Bio7×100)	2.13
Bio4	温度季节性	0.60
Bio5	最暖月的最高温 /℃	0.05
Bio6	最冷月的最低温 /℃	8.00
Bio7	气温年范围(Bio5-Bio6,℃)	3.72
Bio8	最湿季均温 /℃	0.09
Bio9	最干季均温 /℃	1.08
Bio10	最暖季均温 /℃	16.37
Bio11	最冷季均温 /℃	1.71
Bio12	年降水 /mm	9.68
Bio13	最湿月降水 /mm	1.46
Bio14	最干月降水 /mm	1.10
Bio15	降水季节性变动	0.98
Bio16	最湿季降水 /mm	0.05
Bio17	最干季降水 /mm	2.14
Bio18	最暖月降水 /mm	0.21
Bio19	最冷月降水 /mm	0.07
地形变量	Topographic variables	
Asp	坡向 /(°)	2.15
Ele	高程 /m	5.09
Slo	坡度 /(°)	2.71

表 2　不同气候变化情景下驼鹿适宜生境面积变化

Table 2　Changes of moose habitat area under different climate change scenarios

气候情景 Climate scenarios	对比时期 Comparative period	减少生境 Decreased habitat		新增生境 Increased habitat		总生境变化 Total habitat change	
		面积 Area/km^2	百分比 Percentage/%	面积 Area/km^2	百分比 Percentage/%	面积 Area/km^2	百分比 Percentage/%
RCP4.5	当前—2050s	153323	56.3	12096	4.4	141227	51.9
	当前—2070s	156719	57.6	7968	2.9	148751	54.7
RCP8.5	当前—2050s	185782	68.3	7334	2.7	178448	65.6
	当前—2070s	255862	94	2427	0.9	253435	93.1

在 ArcGIS10.0 中,将未来驼鹿潜在生境分布图与当前潜在生境分布图进行空间叠加分析,获得驼鹿潜在生境分布区变化的地理位置(图 3)。由此可知,未来驼鹿生境面积将急剧减少,其中在小兴安岭地区的驼鹿适宜生境将完全消失,大兴安岭地区的驼鹿适宜生境将发生破碎化,形成南、北两个独立生境分布区。随着时

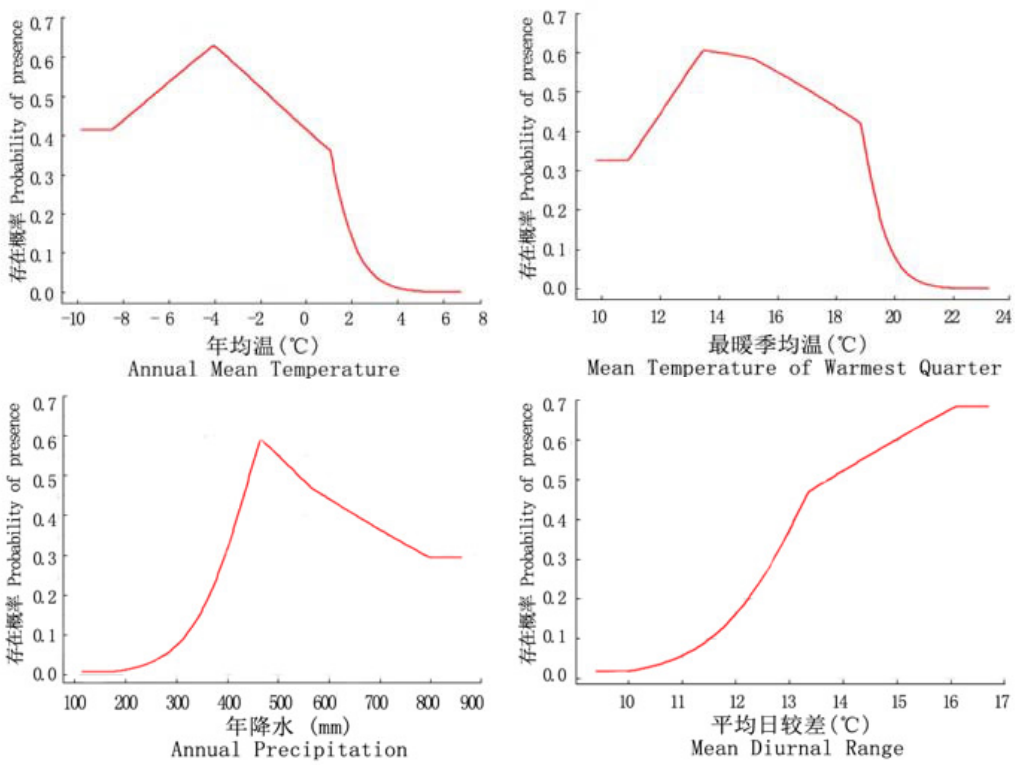

图 2 重要环境变量的反应曲线

Fig. 2 Response curve of important environment variables

间的推移,大兴安岭南部生境分布区将逐渐减少、甚至消失,而北部生境分布区也将向北缩减。此外,未来气候条件下新增的驼鹿适宜生境区域极小,主要集中在根河市、漠河县南部和呼玛县西部。

4 讨论

4.1 驼鹿分布与环境因子关系

已有研究表明驼鹿是一个对温度敏感的物种[40],对高温的忍耐性较低,在生境选择时,驼鹿将避开高温区域,并且这种行为在区域温度超过 20 ℃时更加显著[41],另外,冬季不合时宜的增温或持续高温也会加剧温度对驼鹿的影响[42]。本研究的各环境因子贡献率结果显示,与温度相关环境因子累计贡献率达到 74.36%,明显高于其他环境因子,进一步证明了温度是影响驼鹿生境分布的重要限制因子。

4.2 模拟结果准确性评价

目前,模型模拟预测法已成功应用到气候变化下动、植物的分布预测中[7,9]。AUC 值对模型结果评价表明,Maxent 模型预测的驼鹿生境分布范围具有较高的准确性。然而驼鹿的潜在生境分布由多种因素综合影响决定,除本研究考虑的气候和地形因素外,生物间相互作用(捕食、竞争等)、物种的生物学特点(物种生活史、迁移能力等)和人类活动对驼鹿生境分布的影响也不能忽略[43-44],若能充分考虑以上因素将其量化并加以计算,则模型预测结果将更加接近物种的现实分布。

4.3 保护建议

预测结果表明,驼鹿的潜在生境分布将在未来气候变化下向高海拔和高纬度地区迁移,这与大多数气候变化生物学的研究结果一致[1,9]。

我国东北地区是驼鹿乌苏里亚种的最南分布区,但模型预测结果表明随着气候变化,未来驼鹿乌苏里亚种在我国生境面积将不断减少,甚至接近完全消失。为了有效保护驼鹿这个物种,在我国东北地区建立长期、

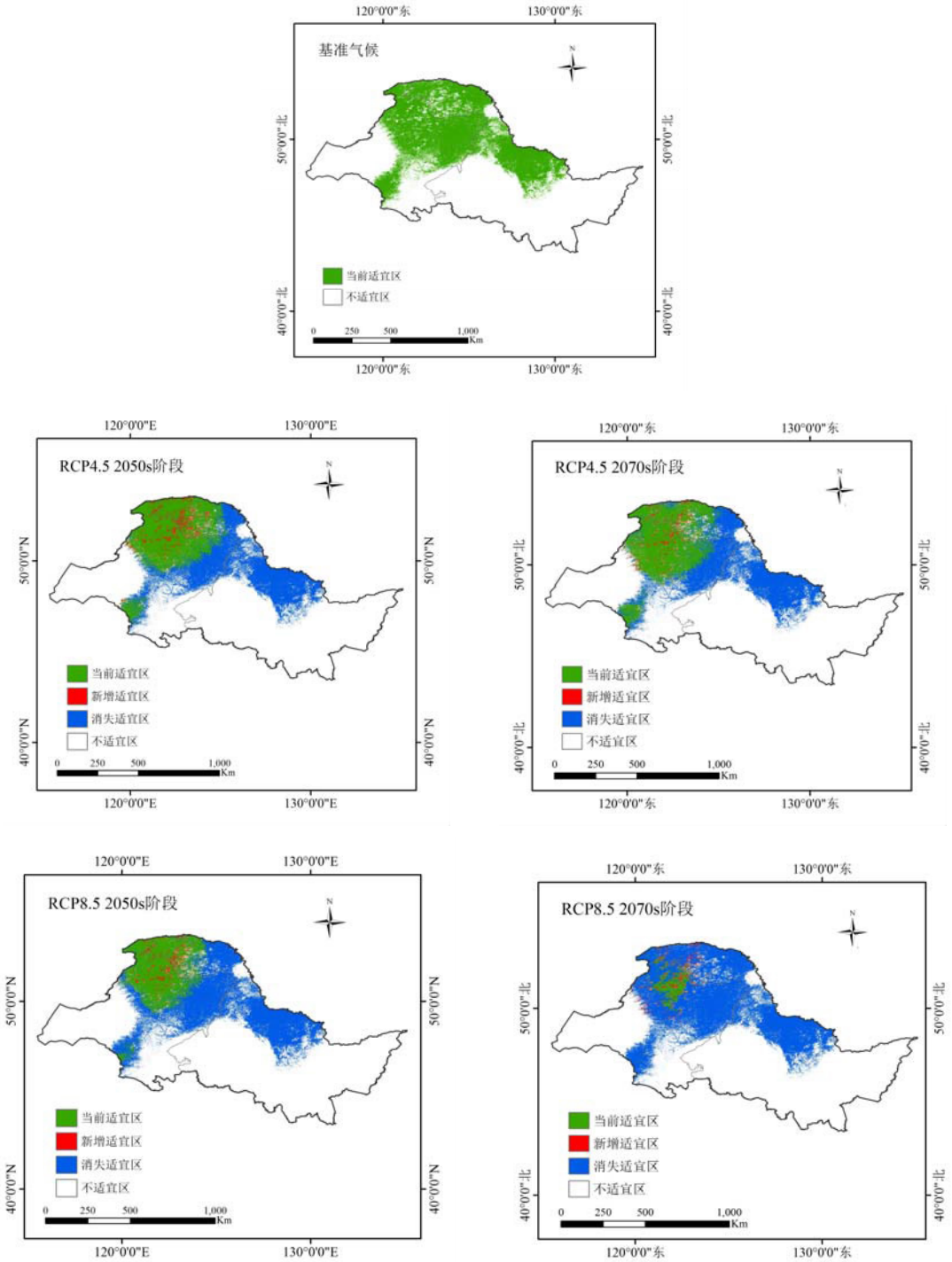

图 3　不同气候情景下驼鹿适宜生境分布

Fig. 3　Distribution of habitat for moose under different climate change scenarios

有效的监测计划,对驼鹿乌苏里亚种进行动态的、全方位的监测是必须的。另外,确认优先保护区域有利于有效管理[45],对于驼鹿来说,我们预测气候变化后,根河市、漠河县南部和呼玛县西部的驼鹿潜在生境区较为稳定,可以作为驼鹿气候变化的避难所。但是,目前这些地区只有少部分位于自然保护区内,我们认为未被自然保护区覆盖的其他区域为优先保护区,因此,在未来保护区规划中需要考虑到这一点。

参考文献(References):

[1] Root T L, Price J T, Hall K R, Schneider S H, Rosenzweig C, Pounds J A. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. Nature, 2003, 421(6918): 57-60.

[2] 吴军, 徐海根, 陈炼. 气候变化对物种影响研究综述. 生态与农村环境学报, 2011, 27(4): 1-6.

[3] Thomas C D, Cameron A, Green R E, Bakkenes M, Beaumont L J, Collingham Y C, Erasmus B F, De Siqueira M F, Grainger A, Hannah L, Hughes L, Huntley B, Van Jaarsveld A S, Midgley G F, Miles L, Ortega-Huerta M A, Peterson A T, Phillips O L, Williams S E. Extinction risk from climate change. Nature, 2004, 427(6970): 145-148.

[4] Primack P B,马克平.保护生物学简明教程(第四版 中文版). 北京: 高等教育出版社, 2009.

[5] Huntley B, Green R E, Collingham Y C, Hill J K, Willis S G, Bartlein P J, Cramer W, Hagemeijer W M, Thomas C J. The performance of models relating species geographical distributions to climate is independent of trophic level. Ecology Letters, 2004, 7(5): 417-426.

[6] Burns C E, Johnston K M, Schmitz O J. Global climate change and mammalian species diversity in US national parks. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2003, 100(20): 11474-11477.

[7] Tian Y, Wu J G, Wang T M, Ge J P. Climate change and landscape fragmentation jeopardize the population viability of the Siberian tiger (*Panthera tigris altaica*). Landscape Ecology, 2014, 29(4): 621-637.

[8] 罗翀, 徐卫华, 周志翔, 欧阳志云, 张路. 基于生态位模型的秦岭山系林麝生境预测. 生态学报, 2011, 31(5): 1221-1229.

[9] 吴建国, 吕佳佳.气候变化对大熊猫分布的潜在影响. 环境科学与技术, 2009, 32(12): 168-177.

[10] 蒋志刚, 孙吉周, 崔绍朋, 陈代强, 张履冰, 李春旺, 汤宋华, 初红军. 分布在新疆阿尔泰山的欧亚驼鹿. 动物学杂志, 2014, 49(2): 303-304.

[11] 马逸清. 黑龙江省兽类志.哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1986: 412-419.

[12] 张明海. 大兴安岭呼中地区冬季驼鹿对生境的选择性. 兽类学报, 2001, 21(4): 310-313.

[13] 赵肯堂. 驼鹿的生物学和人工驯养. 自然资源研究, 1980, 2(3): 64-67.

[14] 朴仁珠, 关国生, 张明海. 中国驼鹿种群数量及分布现状的研究. 兽类学报, 1995, 15(1): 11-16.

[15] 张立芝, 张卫东, 菊丹. 内蒙古大兴安岭驼鹿资源. 中国林副特产, 2008, (5): 81-81, 102-102.

[16] 刘辉, 姜广顺, 李惠. 北方冬季有蹄类动物 4 种数量调查方法的比较研究. 生态学报, 2015, 35(9).(未出版刊物)

[17] Lenarz M S, Nelson M E, Schrage M W, Edwards A J. Temperature mediated moose survival in northeastern Minnesota. Journal of Wildlife Management, 2009, 73(4):503-510.

[18] Dou H L, Jiang G X, Philip S, Piao R Z. Climate change impacts population dynamics and distribution shift of moose (*Alces alces*) in Heilongjiang Province of China. Ecological Research, 2013, 28(4):625-632.

[19] Aanes R, Sether B E, Øritsland NA. Fluctuations of anintroduced population of Svalbard reindeer: the effects of density dependence and climatic variation. Ecography, 2000,23(4):437-443.

[20] 赵正阶. 中国东北地区珍稀濒危动物志. 北京: 中国林业出版社, 1999: 7-663.

[21] National Specimen Information Infrastructure. (2013-11-29)[2014-07-15]. http://www.nsii.org.cn

[22] 寿振黄. 中国经济动物志-兽类.北京: 科学出版社, 1962.

[23] 汪松.中国濒危物种红皮书-兽类. 北京: 高等教育出版社, 1998: 246-260.

[24] 张荣祖. 中国哺乳动物分布. 北京: 中国林业出版社, 1997: 126-127.

[25] 中国科学院动物研究所兽类研究组. 东北兽类调查报告. 北京: 科学出版社, 1958: 70-72.

[26] 尹远新. 小兴安岭驼鹿资源状况及其保护对策. 中国林副特产, 2009, (6): 80-81.

[27] Krisp J M, Väre S, Dame J, Virrantaus K. Visualizing moose habitat changes due to infrastructure construction in southern Finland // Proceedings on the 20th ISPRS Congress. Istanbul, Turkey, 2004, 12: 23.

[28] 中国生态系统评估与生态安全数据库. [2014-07-15]. http://www.ecosystem.csdb.cn

[29] Hijmans R J, Cameron S E, Rarra J L, Jones P G, Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology, 2005, 25(15): 1965-1978.

[30] Lobo J M, Jiménez-Valverde A, Hortal J. The uncertain nature of absences and their importance in species distribution modelling. Ecography, 2010, 33(1): 103-114.

[31] WorldClim-Global Climate Data. [2014-07-15]. http://www.worldclim.org

[32] 中国科学院计算机网络信息中心 地理空间数据云. [2014-07-15]. http://www.gscloud.cn

[33] 翟天庆, 李欣海. 用组合模型综合比较的方法分析气候变化对朱鹮潜在生境的影响. 生态学报, 2012, 32(8): 2361-2370.

[34] 辛晓歌,吴统文,张洁. BCC 气候系统模式开展的 CMIP5 试验介绍. 气候变化研究进展, 2012, 8(5): 378-382.

[35] Wisz M S, Hijmans R J, Peterson A T, Graham C H, Guisan A. Effects of sample size on the performance of species distribution models. Diversity and Distributions, 2008, 14(5): 763-773.

[36] Fielding A H, Bell J F. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. Environmental Conservation, 1997, 24(1): 38-49.

[37] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. Science, 1988, 240(4857): 1285-1293.

[38] Manel S, Williams H C, Ormerod S J. Evaluating presence-absence models in ecology: the need to account for prevalence. Journal of Applied Ecology, 2001, 38(5): 921-931.

[39] 吴建国, 吕佳佳. 气候变化对珙桐分布的潜在影响. 环境科学研究, 2009, 22(12): 1371-1381.

[40] Dussault C, Ouellet J, Courtois R, Huot J, Breton L, Larochelle J. Behavioural responses of moose to thermal conditions in the boreal forest. Écoscience, 2004, 11(3): 321-328.

[41] Melin M, Matala J, Mehtätalo L, Tiilikainen R, Tikkanen O, Maltamo M, Pusenius J, Packalen P. Moose (*Alces alces*) reacts to high summer temperatures by utilizing thermal shelters in boreal forests-an analysis based on airborne laser scanning of the canopy structure at moose locations. Global Change Biology, 2014, 20(4): 1115-1125.

[42] Franzmann A W, Schwartz C C. Ecology and Management of the North American Moose. 2nd ed. Colorado: University Press of Colorado, 1997: 235-241.

[43] Midgley G F, Hannah L, Millar D, Rutherford M C, Powrie L W. Assessing the vulnerability of species richness to anthropogenic climate change in a biodiversity hotspot. Global Ecology and Biogeography, 2002, 11(6): 445-451.

[44] Erasmus B F, Jaarsveld A V, Chown S L, Kshatriya M, Wessels K J. Vulnerability of South African animal taxa to climate change. Global Change Biology, 2002, 8(7): 679-693.

[45] Ferrier S, Watson G, Prarce J, Drielsma M. Extended statistical approaches to modelling spatial pattern in biodiversity in northeast New South Wales.I. Species-level modelling. Biodiversity & Conservation 2002,11(12): 2275-2307.