

DOI: 10.5846/stxb201804130847

杨蕾, 杨立, 李婧昕, 张超, 霍兆敏, 栾晓峰. 东北地区 5 个物种潜在栖息地变化与优化保护规划. 生态学报, 2019, 39(3): - .
Yang L, Yang L, Li J X, Zhang C, Huo Z M, Luan X F. Potential distribution and conservation priority areas of five species in Northeast China. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3): - .

东北地区 5 个物种潜在栖息地变化与优化保护规划

杨 蕾, 杨 立, 李婧昕, 张 超, 霍兆敏, 栾晓峰*

北京林业大学自然保护区学院, 北京 100083

摘要: 气候变化广泛影响着物种多样性及其分布变迁。优化模型模拟结果, 获取气候变化影响下的优先保护区域将为制定应对气候变化的物种保护政策或行动提供理论依据, 提升保护绩效。选取东北地区五种代表性动物, 包括黑熊 (*Ursus thibetanus*)、驼鹿 (*Alces alces*)、水獭 (*Lutra lutra*)、紫貂 (*Martes zibellina*) 及黑嘴松鸡 (*Tetrao parvirostris*); 结合最大熵模型 (Maxent) 模拟在不同 RCP 情景下未来 3 个年代 (2030s, 2050s, 2070s) 的物种潜在栖息地。根据九个常用气候模式的评价结果, 获取东北地区合适的气候模式, 了解气候变化对物种潜在栖息地的影响, 同时开展物种保护规划, 识别保护空缺, 为应对气候变化、保持生物多样性提供支持。结果显示, 在气候变化背景下物种潜在栖息地面积整体呈现下降趋势, 但不同气候模式之间存在差异; 评价结果推荐 CCSM4、NorESM1-M、HadGEM2-AO 及 GFDL-CM3 气候模式, 推荐在东北地区使用以上气候模式进行物种未来潜在分布的研究。5 个物种潜在栖息地平均面积变化率分别为 -62.16%, -73.93%, -78.46% (2030s, 2050s, 2070s)。综合 5 个重点保护物种的保护优先区, 大兴安岭的呼中、汗马与额尔古纳国家级自然保护区, 延边地区的天佛指山、老爷岭东北虎、珲春东北虎与汪清原麝国家级自然保护区, 长白山国家级自然保护区是气候变化下物种保护的热点区域。

关键词: 物种分布预测; 气候模式; 最大熵模型; 物种分布变迁; 空间优化模型

Potential distribution and conservation priority areas of five species in Northeast China

YANG Lei, YANG Li, LI Jingxin, ZHANG Chao, HUO Zhaomin, LUAN Xiaofeng *

School of Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Global climate change has already altered species distribution and diversity. It is significant to study the priority protection area of species to develop dynamic strategies for biodiversity conservation under climate change scenarios. In the current study, we estimated the potential distribution of five species (Asian black bear (*Ursus thibetanus*), moose (*Alces alces*), otter (*Lutra lutra*), sable (*Martes zibellina*), and black-billed capercaillie (*Tetrao parvirostris*)) in Northeast China over time using Maxent. We used nine general circulation models (GCMs), and four representative concentration pathways (RCPs) to derive future climate projections over three time periods (2030, 2050, 2070), and then modeled species distributions using these predicted environmental measurements for each time period. Zonation was combined with the results from Maxent to identify priority areas, which were further used to optimize the current nature reserve systems. According to the evaluation results of nine GCMs, appropriate climate models in Northeast China were obtained. Based on the GAP analysis for these conservation priority areas, proposals for priority conservation plans were made. The results showed that climate change in the study area would cause a considerable decline in the total distribution areas of the five species. However, different projections by GCMs may cause uncertainty of the predicted distributions. By comparing the

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2013BAC09B02)

收稿日期: 2018-04-13; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: luanxiaofeng@bjfu.edu.cn

species potential distributions, these four GCMs (CCSM4, NorESM1-M, HadGEM2-AO, and GFDL-CM3) performed well in Northeast China. The mean percentage of species potential range loss increased, as 62.16% range loss by 2030; -73.93% by 2050; and -78.46% by 2070. Conservation priority areas were mainly distributed in a few national nature reserves in the Changbai, Lesser Khingan, Greater Hinggan, and Wanda mountains.

Key Words: species potential distribution; general circulation models; Maxent; species distribution change; Zonation

保护生物学着眼于长时间尺度的生物多样性维持^[1-2]。气候变化广泛影响着遗传、物种、生态系统等多个层面的生物多样性^[3]。已有研究表明,未来几十年间,气候变化将逐渐演变为生物多样性丧失的主要驱动力^[4]。关注气候变化对生物多样性的影响逐步成为保护生物学的研究热点^[5]。

近年来,物种分布模型广泛应用在气候变化下生物多样性保护的研究之中。物种分布模型是通过建立物种记录点与环境因子间联系,模拟物种潜在栖息地分布的数学工具^[6-7]。物种分布模拟结果主要受数据(包含物种分布位点和环境图层)、模型算法、模拟参数等方面的影响,其中数据的准确性和代表性是模型模拟的重要前提。本研究关注环境图层,尤其是不同气候模式对潜在栖息地模拟结果的影响。全球气候模型(气候模式, Global Climate Model, GCM)代表大气、海洋、冰冻圈和地表的物理进程,是目前模拟全球气候系统对持续增加温室气体浓度的响应的主要工具^[8],同时也是物种分布模型的基本气候数据来源之一。IPCC 第五次报告共涉及了 46 种全球气候模型^[9]。但受到算法限制、部分物理过程难以模拟等因素影响, GCM 仿真结果具备不确定性,不同 GCM 将导致物种潜在栖息地模拟出现差异。为获取具有代表性的未来潜在栖息地变化,选择合适的全球气候模型作为模型模拟的数据来源十分必要。

系统保护规划(Systematic Conservation Planning, SCP)是根据生物多样性属性特征,确定保护目标,结合保护生物学、景观生态学等多学科和 GIS 等空间技术对一个地区生物多样性进行优先保护和保护区规划设计^[10]。其中明确的保护目标与保护区域是系统保护规划的关键步骤^[11]。获取气候变化影响下的优先保护目标将为制定应对气候变化的物种保护政策或行动提供理论依据,提升保护绩效。目前,为达成保护目标识别重点规划区域,常用规划软件,例如 C-plan, Marxan 等识别优先区域^[12-13]。其中,空间优化模型(Zonation)是一个用于大尺度空间保护规划的保护区选址框架,识别对保持多物种的栖息地质量与连通性重要的区域或景观,从而提供一种鉴定保护核心区的定量方法^[14]。目前根据已有物种潜在栖息地, Zonation 在识别目标物种的保护优先区、评估现有保护区的保护成效及分析保护空缺方面已得到广泛应用^[15-17]。目前系统保护规划集中关注生物多样性、人类影响、建设成本等方面。基于气候变化下进行物种系统保护规划强调环境因子的重要性,能够提高物种保护成效。

本研究选择中国东北地区作为研究区域,以五种代表性物种为研究对象,即黑熊(*Ursus thibetanus*)、驼鹿(*Alces alces*)、水獭(*Lutra lutra*)、紫貂(*Martes zibellina*)以及黑嘴松鸡(*Tetrao parvirostris*),重点关注:1)评价 9 个全球气候模型对物种分布模型模拟的影响,选择合适的气候模式;2)结合未来物种潜在栖息地变化趋势,基于 Zonation 开展系统保护规划,识别气候变化下优先保护区域。

1 研究区域概况

研究区域(图 1)位于我国的东北地区,主要包括黑龙江省、吉林省、辽宁省和内蒙古自治区东北部共 221 个县(旗),地理位置为 115°10'—135°05'E, 38°42'—53°33'N,总面积约 151.49 万 km²。海拔变化幅度大,地形地貌复杂,包括大小兴安岭、松嫩平原、松辽平原、长白山和三江平原等自然区域。本区以温带季风气候和寒温带季风气候为主,水系密布。森林类型以针叶林居多,优势树种为兴安落叶松和樟子松;其次多为针阔混交林,优势树种为红松、水曲柳和蒙古栎^[18]。本区也为依靠森林生存的肉食及草食动物提供了广袤的栖息地,例如大型食肉动物黑熊、大型草食动物驼鹿、小型食肉哺乳动物水獭、紫貂以及针叶林鸟类黑嘴松鸡。

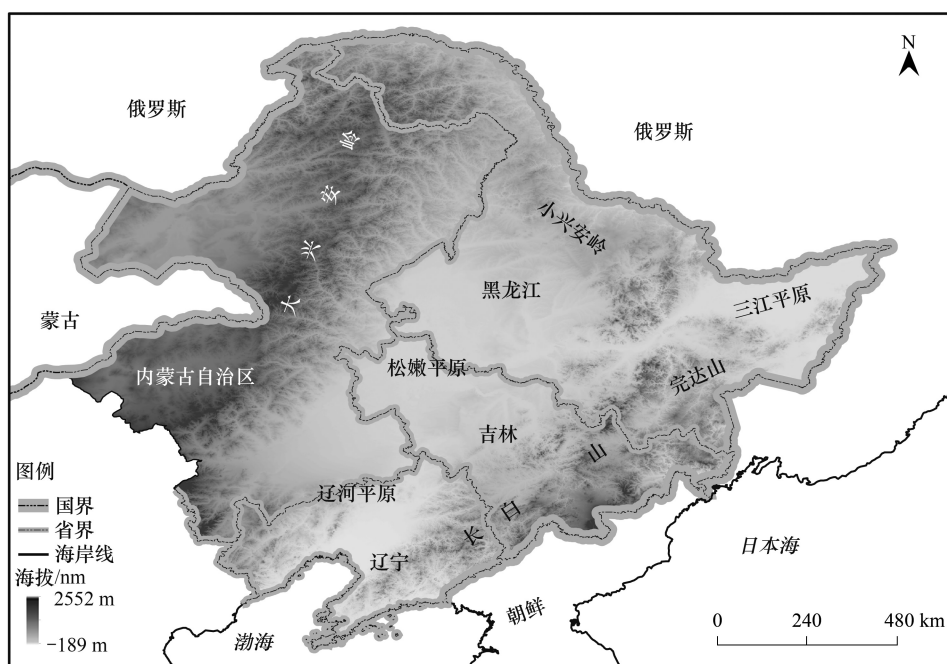


图1 研究区域概况—中国东北地区 (来源:全国地理信息资源目录服务系统)

Fig.1 Study area—Northeast China (From: National Catalogue Service for Geographic Information)

2 研究方法

2.1 物种分布数据

本研究选择具有东北地区代表性的 5 个重点保护物种作为研究对象,在 2015 年发布的中国生物多样性红色名录中的评级分别为黑熊(易危)、驼鹿(极危)、水獭(濒危)、紫貂(易危)及黑嘴松鸡(濒危)^[19]。5 种物种保护级别高,研究数据充足,且在野外易于辨认,以此降低数据错误的风险。

研究对象中,由于驼鹿、水獭、紫貂及黑嘴松鸡的物种分布记录点均来源于已经过校对及筛选的调查数据^[20-24]。因此,我们直接采用物种的分布记录点作为其分布位点,即驼鹿 131 个,水獭 115 个,紫貂 112 个,黑嘴松鸡 199 个分布点。

物种分布记录点的获取方法与以往研究相同^[20-24],黑熊的分布数据主要有 5 个来源:各个地方方志、动物志、科学考察报告、科学研究(包括研究论文和标本信息)以及新闻报道^[25-27]。我们主要选取 1990 年之后的分布数据作为基础研究资料。然后,通过物种生境信息^[28]和遥感数据(Google Earth)对黑熊的分布信息进行交叉对比较正,从而提高数据质量,获取较为可靠的物种分布点数据。本研究用 ArcGIS10.2 插件 SDM toolbox 1.1c^[29],对物种分布点进行筛选,以此降低分布点的空间自相关。通过上述校对和筛选方法获得黑熊的分布记录点,最终确定分布点 115 个。

2.2 环境因子来源与处理

本研究总共选取 27 个环境因子,包含 19 个气候因子(Bio1-19),3 个地形因子(海拔、坡度和坡向),2 个栖息地因子(地被类型和植被覆盖率)和 3 个人为影响因子(人类生态足迹、人类影响和人口密度)。所有环境因子的图层均统一到相同坐标系相同范围的 1 km×1 km 分辨率下。由于环境因子过度拟合将影响模型结果,本研究针对每个物种都建立了斯皮尔曼(Spearman)相关系数矩阵,对具有较高相关度的变量($r > 0.7$)进行筛选,最终使用的环境因子见表 1。

2.3 气候模式的选择

本研究从 CCAFS(<http://www.ccafs-climate.org/>)下载几个常用气候模式(表 2)模拟的气候数据。每个

气候模式包含 12 组气候数据,包括 4 种不同的气候情景 (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5), 3 个年代 (2030s, 2050s, 2070s)。运用 Maxent 分别模拟 5 个物种在 2030s、2050s 和 2070s 年代的物种潜在栖息地。

表 1 在物种分布模型中使用的环境因子

Table 1 Eco-geographic variables used in species distribution models			
序号 ID	环境因子名称 Variable description	代码 Code	来源 Source
1	平均日较差 (月最高温与最低温的差值的平均,℃) Mean diurnal temperature range (mean (period max-min), °C)	Bio2	WorldClim
2	等温性 Isothermality (Bio2/Bio7×100)	Bio3	WorldClim
3	最暖月的最高温 Max temperature of warmest month/℃	Bio5	WorldClim
4	最冷季均温 Mean temperature of coldest quarter/℃	Bio11	WorldClim
5	最湿月降水 Precipitation of wettest quarter/mm	Bio13	WorldClim
6	最干月降水 Precipitation of driest month/mm	Bio14	WorldClim
7	海拔 Elevation/m	elevation	SRTM
8	坡向 Aspect	aspect	SRTM
9	坡度 Slope	slope	SRTM
10	地被类型 Landcover	landcover	ISCGM
11	植被覆盖率 Vegetation cover	vegetation_cover	ISCGM
12	人类足迹 Human footprint index	human_footprint	SEDAC
13	人类影响 Human influence index	human_influence	SEDAC
14	人口密度 Human population density	population_density	SEDAC

气候因子数据 (Bio1-19) 从 WorldClim 气候数据集 (1.4 版) (<http://www.worldclim.org/>) 下载,分辨率为 (30sec, 约 1 km)。地形因子数据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 (<http://www.cgiar-csi.org/>)。植被覆盖率数据和地被类型数据来自 International Steering Committee for Global Mapping (ISCGM) (<https://www.iscgm.org/>), 分辨率为 1 km。人为影响因子数据来自 NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC) (<http://sedac.ciesin.columbia.edu>), 分辨率为 1 km

表 2 研究选择的全球气候模型

Table 2 Selected Global Climate Models (GCMs)			
单位 Modeling Center	模型简称 GCM	研发机构 Institution	
BCC	BCC-CSM1.1	北京气候中心-气候系统模型(中国)	Beijing Climate Center, China Meteorological
IPSL	IPSL-CM5A-LR	拉普拉斯研究所(法国)	Institut Pierre-Simon Laplace
MIROC	MIROC5	大气与海洋研究所(东京大学), 国家环境研究所和日本海洋局(日本)	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
MRI	MRI-CGCM3	气象厅气象研究中心(日本)	Meteorological Research Institute
NASA GISS	GISS-E2-R	美国宇航局哥达德空间研究所(美国)	NASA Goddard Institute for Space Studies
NCAR	CCSM4	国家大气研究中心(美国)	National Center for Atmospheric Research
NCC	NorESM1-M	挪威气候中心(挪威)	Norwegian Climate Centre
NIMR/KMA	HadGEM2-AO	国家气象研究所/韩国气象局(韩国)	National Institute of Meteorological Research/Korea Meteorological Administration
NOAA GFDL	GFDL-CM3	地球物理流体动力学实验室(美国)	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory

2.4 物种分布模拟

最大熵理论的 Maxent 模型作为一种模拟气候变化下物种潜在栖息地的数学工具,目前广泛应用于了解气候变化与物种保护研究中^[30]。本研究采用 Maxent3.3.3k 建模时,分别输入 5 个物种分布点数据和筛选过的 14 个环境因子数据,随机选取 80% 的物种分布点数据建立模型,剩余 20% 的物种分布点数据验证模型,并

设置模型运行重复次数为 50 次,背景点设置 10,000 个,选择创建环境变量反应曲线,采用 subsample 方法运行,迭代设置 500 次,导出背景点预测值,其余参数设为模型默认值。

本研究采用真实技巧统计法(True skill statistic, TSS)、Kappa 统计值(Cohen's Kappa, Kappa)以及接收受试者工作特征曲线下的面积(Area under the curve of receiver operator characteristic (ROC) curves, AUC)三种方法来评估模型的预测精度。AUC 值直接来自 Maxent 运行结果,Kappa 和 TSS 基于背景点预测值在 R3.3.2 进行运算。

模型模拟输出结果为物种潜在分布概率图,值在 0—1 内。在模拟实验中,选用训练数据集和测试数据集的平均 AUC 值最高所对应的模拟结果作为物种分布预测结果。我们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 作为阈值^[31],将 5 个物种的潜在分布概率图重新分类: $\text{value} > P$ 的区域为潜在栖息地分布区(赋值为 1), $\text{value} \leq P$ 的区域为非潜在栖息地分布区(赋值为 0)。

2.5 不同气候模式的评价

同一气候情景同一年代下,本研究将不同气候模式物种潜在栖息地图与物种综合潜在栖息地(叠加分析结果)进行对比,用评价指标(S)选取变化趋势稳定,与物种综合潜在栖息地相似的气候模式。

2.5.1 物种综合潜在栖息地

本研究采用物种综合潜在栖息地代表未来物种潜在分布的变化趋势。将模型预测结果进行叠加分析,将同一年代同一气候情境下的 9 个气候模式预测结果进行叠加,利用 ArcGIS 10.2 选取 5 个及以上模型预测结果相交的区域,生成物种综合潜在栖息地(即叠加分析结果, value 0—9)。参考 9 个预测结果下潜在栖息地分布图的平均面积,用 5 作为阈值对综合潜在栖息地进行划分,高于阈值区域划分为综合潜在栖息地分布区(赋值为 1),其他区域为综合非潜在栖息地分布区(赋值为 0)。最终获得 600 个潜在栖息地分布图(含 540 个潜在分布图和 60 个综合潜在栖息地分布图)。

2.5.2 评价指标(S)

本研究使用评价指标(S)对九个气候模式下物种未来潜在栖息地模拟结果进行初步评价。具体分别计算某一气候模式 2030 年到 2070 年间潜在栖息地面积变化曲线 $f(x)$ 的与物种综合潜在栖息地面积变化曲线 $g(x)$ 的定积分之差 D_x ,以此作为标准进行打分 S_x (1—9)。定积分值 D_x 越小,说明这种气候模式下潜在栖息地变化与物种综合潜在栖息地变化越相近,评分 S_x 越高。某种气候模式的评价是综合不同 RCP 下气候模式的表现,得到这一物种的总评分 S_T ,以此评价不同气候模式下物种潜在分布。以上计算基于 OriginPro 中的积分计算(Analysis Integrate)功能和 Excel 实现。计算公式如下:

$$D_x = \int_{2070}^{2030} |f(x) - g(x)| dx \quad (1)$$

式中, D_x 代表在一种气候情景下某一气候模式的定积分值; x 代表在一种气候情景下, $x \in \{RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5\}$; $f(x)$ 代表在一种气候情景下某一气候模式模拟下潜在栖息地面积变化函数; $g(x)$ 代表在一种气候情景下综合物种潜在栖息地面积变化函数;

$$S_T = S_{RCP2.6} + S_{RCP2.64.5} + S_{RCP6.0} + S_{RCP8.5} \quad (2)$$

式中, S_x 代表在一种气候情景下某一气候模式的评分; S_T 代表某一物种某一气候模式的综合评分。

2.6 系统保护规划

针对每个物种,本研究选择 Maxent 模拟生成的当前物种分布概率图(TIF 格式)及 4 个情境下、3 个年代的最优气候模型的物种分布概率图作为输入数据,在 Zonation v4 软件中开展系统保护规划^[32]。Zonation 模拟过程中,采用“核心区移除规则”(core-area cell removal rule),以保留物种分布的核心区域;同时使用边缘移除(edge removal),这样有助于移除过程中保持结构的连通性;选择翘曲因子为“1”,即一次移除一个栅格,使运行结果最优。当前潜在栖息地权重设为 2,物种未来预测结果权重设为 1。其他参数为模型默认值^[14]。

Zonation 运算得到一个嵌套分级的景观序列。选取物种一定比例的当前潜在栖息地作为保护优先区域,

并在 ArcGIS 中对其保护优先程度进行分级。研究表明,保护 5%—20%的物种栖息地能够实现 50%以上的物种保护^[33]。根据以上原则划分出优先保护规划类型,即必须保护(Mandatory reserve, MR)、协商保护(Negotiable reserve, NR)和部分保护(Partial reserve, PR)3 种类型的优先保护规划单元^[34]。将物种潜在栖息地保护价值最高的 5%作为本研究区域必须保护区域,5%—10%作为协商保护区域,10%—20%作为部分保护区域。在物种当前潜在栖息地的基础上,结合气候变化影响下物种未来的栖息地变化,通过 Zonation 分析物种的保护优先区。再将基于气候变化的保护优先区与已建立的保护区进行叠加分析,对比不同类型优先保护规划单元与已建自然保护区,识别保护空缺,评价东北地区保护区对 5 个物种的保护效果。计算自然保护区在物种保护优先区域的占比,对有面积大或区位特殊的不同等级的优先保护区域的自然保护区进行统计,推荐各个物种需重点关注的自然保护区。

3 研究结果

3.1 Maxent 模型模拟评价

模型模拟的测试数据集(TSS、Kappa 和 AUC)均显示模型模拟结果为良好。其中,250 个模拟结果(每个物种重复运算 50 次)的 AUC 值为 0.916±0.025 (0.821—0.956);TSS 值为 0.710±0.091 (0.461—0.844);Kappa 值为 0.815±0.029 (0.740—0.861)。Maxent 模型对研究对象的分布预测均达到较好的效果(表 3)。黑熊模拟的综合评价相对高,水獭模拟的综合评价相对较低。

表 3 Maxent 结果基本信息
Table 3 The basic information for Maxent result

物种名称 Scientific name	分布记录点 Records	TSS	Kappa	AUC
黑熊 <i>Ursus thibetanus</i>	115	0.777±0.046 (0.646—0.844)	0.846±0.006 (0.835—0.861)	0.933±0.012 (0.899—0.956)
驼鹿 <i>Alces alces</i>	131	0.778±0.039 (0.654—0.842)	0.841±0.004 (0.83—0.85)	0.935±0.009 (0.907—0.952)
水獭 <i>Lutra lutra</i>	131	0.584±0.055 (0.461—0.68)	0.77±0.012 (0.74—0.797)	0.879±0.021 (0.821—0.921)
紫貂 <i>Martes zibellina</i>	112	0.656±0.062 (0.479—0.748)	0.803±0.01 (0.785—0.831)	0.916±0.018 (0.868—0.9)
黑嘴松鸡 <i>Tetrao parvirostris</i>	199	0.752±0.037 (0.625—0.806)	0.812±0.006 (0.797—0.822)	0.918±0.009 (0.892—0.935)

表中数据格式为:Mean±SD(Min—Max)。TSS:真实技巧统计法,True skill statistic ; Kappa:Kappa 统计值,Cohen’s Kappa; AUC:接收受试者工作特征曲线面积,Area under the curve of receiver operator characteristic curves。其中 TSS 评价模型的标准为:极好,1—0.85; 很好,0.7—0.85; 好,0.55—0.7; 一般,0.4—0.55; 失败,<0.4。Kappa 值评估标准为:极好,1—0.85; 很好,0.7—0.85; 好,0.55—0.7; 一般,0.4—0.55; 失败,<0.4。AUC 值评估标准是:极好,0.9—1; 好,0.8—0.9,一般,0.7—0.8; 差,0.6—0.7; 失败,0.5—0.6

3.2 物种潜在栖息地

运行 Maxent 模型后输出 5 个物种的潜在栖息地分布区,利用阈值进行划分。黑熊的潜在栖息地主要在小兴安岭、张广才岭、老爷岭、长白山山地林区,以及完达山地区零星分布,占研究区总面积的 12.31%。驼鹿的潜在栖息地主要分布在大兴安岭山地,南至牙克石东北部,东至大小兴安岭连接处黑河市,占研究区总面积的 13.15%。水獭潜在栖息地主要分布大兴安岭北部,小兴安岭北部、三江平原最北部和长白山东南部,其中大兴安岭是重点分布区,占研究区总面积的 16.66%。紫貂的潜在栖息地在大兴安岭北部,张广才岭与老爷岭,以及少部分小兴安岭山区,占研究区总面积的 13.12%。黑嘴松鸡潜在栖息地主要分布在大兴安岭地区,延大兴安岭山脉南至阿尔山市,在小兴安岭北部也分布,占研究区总面积的 15.77%。

3.3 未来物种潜在栖息地面积变化

基于当前物种分布的结果,结合 9 个气候模式对物种在未来 3 个年代(2030s, 2050s, 2070s)的分布情况

进行模拟。4 个情境下的潜在栖息地面积总体呈现随着气候变化栖息地面积不断下降的趋势(表 4)。

表 4 气候变化下物种潜在栖息地(km²)

Table 4 Species potential habitat under climate change

年代 Periods	黑熊 <i>Ursus thibetanus</i>	驼鹿 <i>Alces alces</i>	水獭 <i>Lutra lutra</i>	紫貂 <i>Martes zibellina</i>	黑嘴松鸡 <i>Tetrao parvirostris</i>
当代 Current	268397	286648	363061	285973	343766
2030	95539.72 (16626—273547)	51845.31 (5—273720)	169409.56 (18116—414738)	164465.44 (34619—341988)	107667.03 (11729—311134)
2050	60801.94 (3897—227479)	33407.67 (2—214903)	117773.11 (1218—378833)	125241.36 (9238—346008)	68039.22 (99—275027)
2070	50996.75 (361—302392)	32791.35 (1—247061)	98579.31 (25—376051)	99293.14 (206—328789)	52829.88 (1—245515)

表中数据格式为:Mean(Min—Max)

同一气候情景下,每个物种不同气候模式所得的预测结果存在差异(图 2)。例如,紫貂在全扩散假设下 2070 年代 RCP8.5 情景下,GISS-E2-R 的模拟结果显示潜在栖息地面积增长了 14.97%,而大部分模型的模拟结果(物种综合潜在栖息地,图 2 代码为 ensemble)潜在栖息地减少 67.89%;黑嘴松鸡在 RCP4.5 的情景下,通过 MRI-CGCM3 的模拟面积变化分别为-28.58%, -20.00%, -39.45% (2030s, 2050s, 2070s),然而物种综合潜在栖息地的面积变化分别为-80.74%, -95.34%, -99.67%。5 个物种中,51.54%的模型结果显示物种未来栖息地面积下降幅度在 80%以上(即急剧下降),未来 5 个物种潜在栖息地变化均受气候变化影响严重。

每个物种由于对气候的适应性、迁移能力等因素,呈现出不同的潜在栖息地面积变化的趋势。5 个物种在东北低海拔地区的潜在栖息地急剧减少,特别是驼鹿和黑嘴松鸡,它们分别在 2070s RCP8.5 的潜在栖息地面积平均减少 99.89%。驼鹿在所有的预测结果都显示潜在栖息地面积平均减少 75%以上,黑嘴松鸡在 2050s 与 2070s 的潜在栖息地面积平均减少 70%以上。

3.4 不同气候模式下未来潜在栖息地对比与评价

由于物种的生物学特征不同,对气候的适应性也不同,并不存在一个适用于任何物种分布区模拟的通用模型。为了降低气候模式差异对物种未来分布预测的影响,我们采用在四种气候情景下 5 个物种模拟结果和物种综合潜在栖息地变化趋势的相似性作为指标,对气候模式进行评价。评价结果显示,CCSM4、NorESM1-M、HadGEM2-AO 及 GFDL-CM3 这 4 个模型在东北地区分布的以森林为主要栖息地的物种潜在栖息地预测的效果较好,与总体变化趋势相近,推荐在东北地区物种迁移的研究中可以考虑以上气候模式(表 5)。

表 5 气候模式评价

Table 5 General Circulation Models evaluation

气候模式代码 General circulation models	黑熊 <i>Ursus thibetanus</i>	水獭 <i>Lutra lutra</i>	驼鹿 <i>Alces alces</i>	紫貂 <i>Martes zibellina</i>	黑嘴松鸡 <i>Tetrao parvirostris</i>	评分 Total score
CCSM4	31 *	27 *	30 *	29	28	145
HadGEM2-AO	23	22	21	33 *	27	126
NorESM1-M	25	19	23	28	27	122
GFDL-CM3	22	24	19	24	32 *	121
IPSL-CM5A-LR	23	21	29	13	23	109
BCC-CSM1-1	17	25	28	19	18	107
MIROC5	27	19	18	22	12	98
GISS-E2-R	8	10	8	7	9	42
MRI-CGCM3	4	13	4	5	4	30

* 每个物种评分最高的气候模式

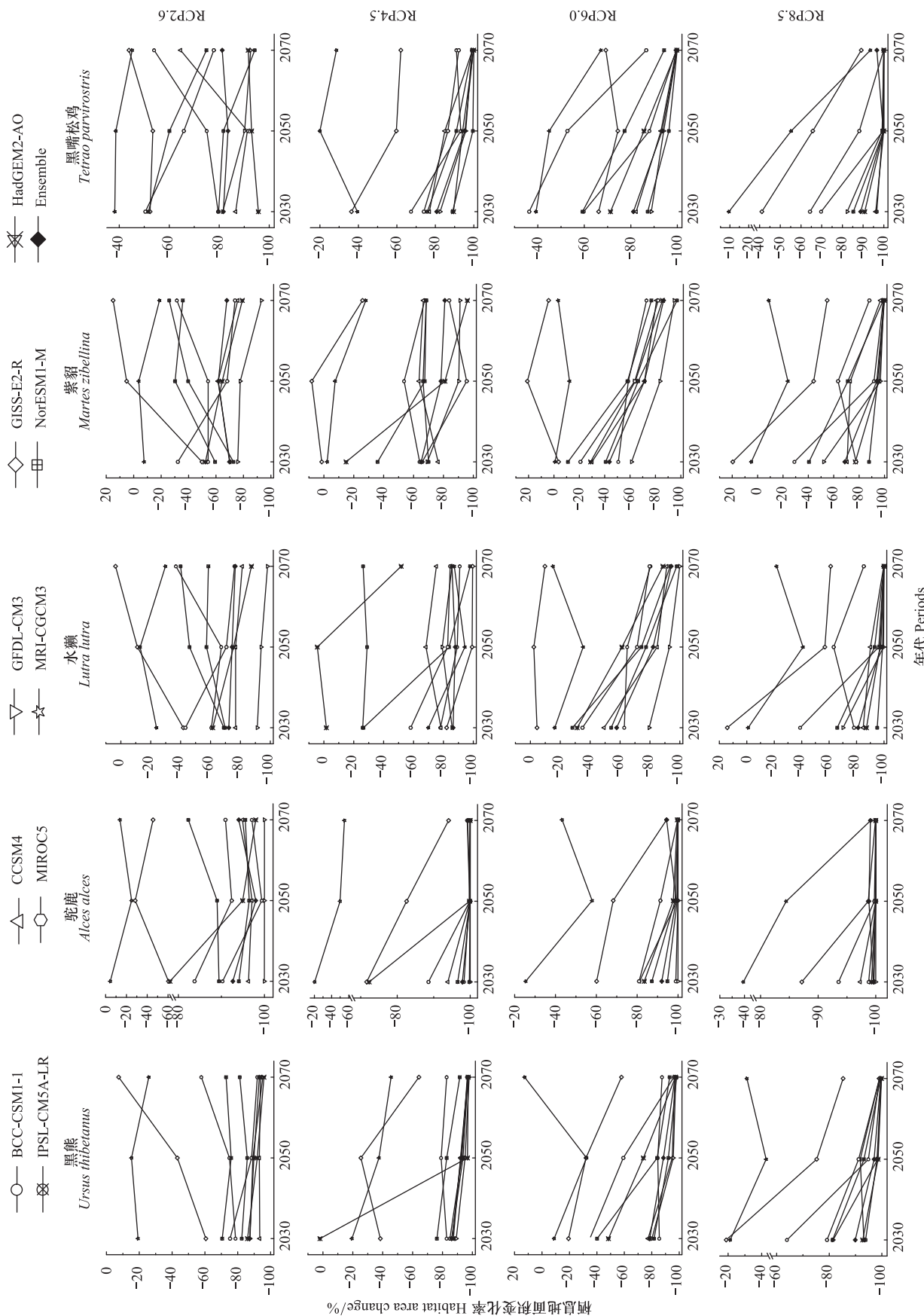


图2 2030—2070年代物种栖息地面积变化趋势
2030s—2070s species potential suitable habitat change trend

Fig.2

3.5 基于气候变化的系统保护规划

综合本研究推荐的四个气候模式,在 2030 年代下,研究区的 5 个物种平均分布面积变化率为 -62.16% ($-81.91\%—-42.49\%$) [平均值(最小值—最大值)];在 2050 年代下,变化率为 -73.93% ($-88.35\%—-56.21\%$);在 2070 年代下,变化率为 -78.46% ($-88.56\%—-65.28\%$)。驼鹿的物种分布面积变化率最低,紫貂的物种分布面积变化率最高。5 个物种的潜在栖息地面积总体呈现随着气候变化栖息地面积不断下降的趋势(表 6)。

表 6 物种栖息地变化趋势及各级优先保护区域面积

Table 6 The range change of species potential area and the area of priority protection

	年份 Year	黑熊 <i>Ursus</i> <i>thibetanus</i>	驼鹿 <i>Alces</i> <i>alces</i>	水獭 <i>Lutra</i> <i>lutra</i>	紫貂 <i>Martes</i> <i>zibellina</i>	黑嘴松鸡 <i>Tetrao</i> <i>parvirostris</i>
平均面积变化率	2030	-64.40	-81.91	-53.34	-42.49	-68.68
The average area	2050	-77.35	-88.35	-67.56	-56.21	-80.21
rate/%	2070	-81.00	-88.56	-72.85	-65.28	-84.63
保护优先区域面积	必须保护	13420	14332	18153	14299	17188
Priority conservation	协商保护	13420	14332	18153	14299	17188
regions/km ²	部分保护	26840	28665	36306	28597	34377

综合 5 个物种的系统保护规划的结果(图 3),东北地区优先保护区域主要集中在大兴安岭西侧,长白山脉东侧及北端的老爷岭、张广才岭,零星分布在小兴安岭及三江平原。

其中,黑熊优先保护区域(必须保护和协商保护区域)主要在汪清和珲春、长白山以及敦化,零星分布在宽甸和本溪一带。优先保护区域占研究区域总面积的 2.46%;区域内现有汪清原麝等 20 个国家级自然保护区,保护面积覆盖优先保护区域的 15.27%,保护空缺主要存在长白山北部,小兴安岭区域。

驼鹿优先保护区域主要在大兴安岭南部,大兴安岭北部塔河县有零星分布。优先保护区域占研究区域总面积的 2.63%;区域内现有呼中、汗马、双河等 7 个国家级自然保护区,保护面积覆盖优先保护区域的 5.78%,保护空缺主要存在大兴安岭西侧区域。

水獭保护优先区主要在大兴安岭的额尔古纳、根河、漠河、鄂伦春,也分布在长白山,此外同江、抚远、饶河与虎林靠近国界的边缘地区有零星分布。优先保护区域占研究区域总面积的 3.33%;区域内现有天佛指山、呼中、汗马等 12 个国家级自然保护区,保护面积覆盖优先保护区域的 9.93%,保护空缺主要存在大兴安岭西侧与三江平原区域。

紫貂保护优先区主要在大兴安岭的额尔古纳、根河、牙克石、呼玛、鄂伦春,也分布在长白山地区,在珲春与汪清有小部分分布。优先保护区域占研究区域总面积的 2.62%;区域内现有老爷岭东北虎河等 9 个国家级自然保护区,保护面积覆盖优先保护区域的 17.24%,保护空缺主要存长白山地区北侧及大兴安岭西侧低海拔地区区域。

黑嘴松鸡属于气候变化下栖息地减少最为严重的物种之一,其优先保护区域主要在大兴安岭的额尔古纳、根河、漠河,另外在鄂温克族自治旗与科尔沁右翼前旗地区有独立的区域。优先保护区域占研究区域总面积的 3.15%;区域内现有呼中、汗马和额尔古纳 3 个国家级自然保护区,保护面积覆盖优先保护区域的 4.68%,保护空缺主要存在额尔古纳和漠河的北部区域。

4 讨论

4.1 气候模式的选择与评价

5 个物种在东北低海拔地区的潜在栖息地急剧减少,特别是驼鹿和黑嘴松鸡。本研究基于全扩散假设,但实际上动物的迁移受到各种因素的限制,无法完全达到全扩散假设下产生的新潜在栖息地。在此假设下,未来物种潜在栖息地呈急剧减少的趋势,然而在人类活动加剧等多重因素的作用下,保护形势更加严峻。

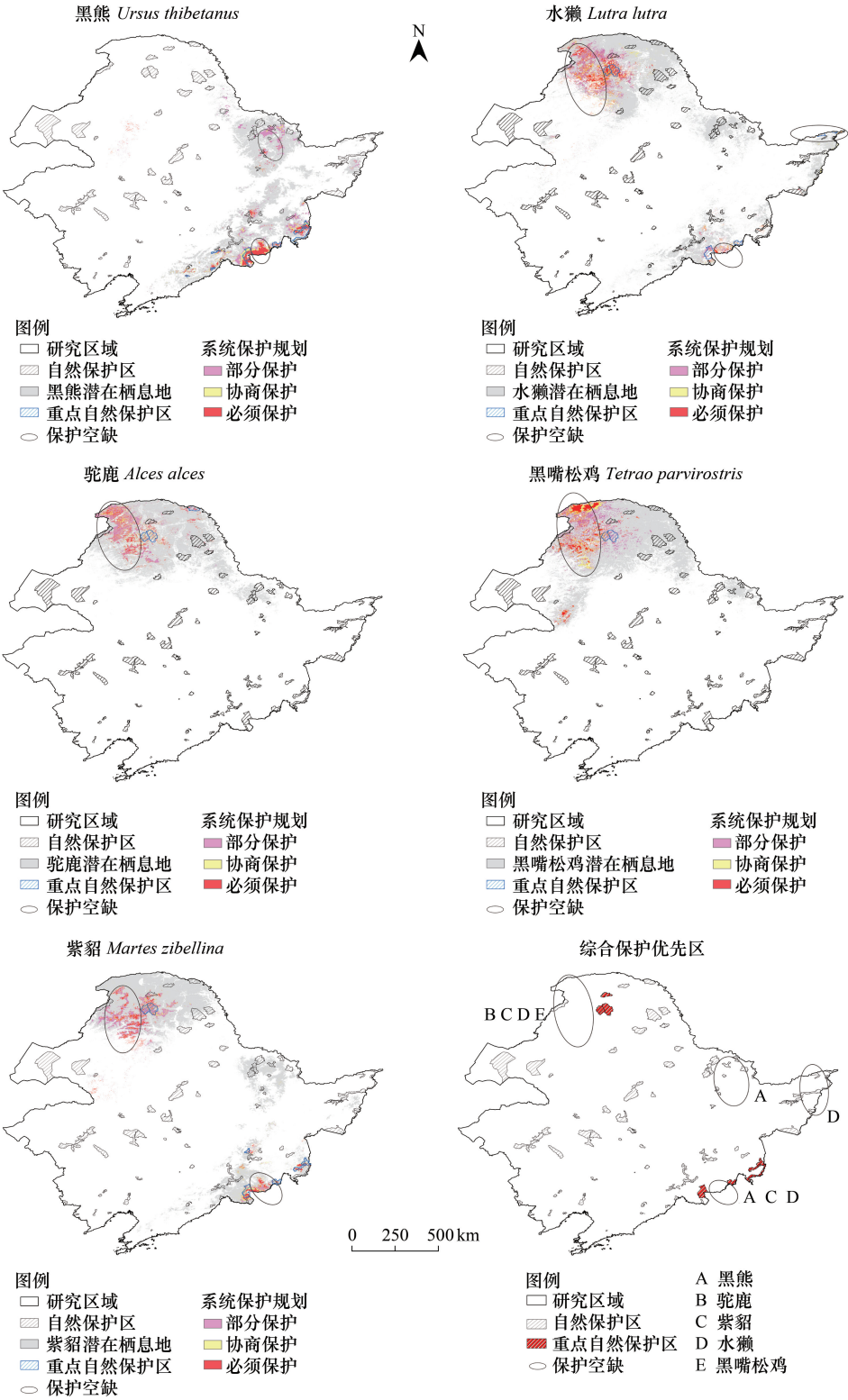


图 3 5 个物种潜在栖息地、保护优先区和热点保护区

Fig.3 Five species of potential distribution area, priority reserve area and hotspot nature reserve

选择适合的气候模式能够优化未来物种潜在栖息地的预测,综合多个气候模式的结果能够降低单一气候

模式的缺陷。本研究结果显示,东北地区的物种分布模拟使用 CCSM4、NorESM1-M、HadGEM2-AO 及 GFDL-CM3 具有较好结果,在不同物种之间,其定积分评价体系的表现也明显高于其他气候模式,且在不同年代不同 RCP 情况下的预测趋势都与总体趋势一致,不会出现过于极端的情况。因此,CCSM4、NorESM1-M、HadGEM2-AO 及 GFDL-CM3 气候模式在东北区域对物种未来变迁的预测较为合适,建议在东北区域的物种分布变迁研究中使用。

4.2 物种保护策略的制定

目前东北地区保护工作持续升温,保护地体系的不断完善,东北虎豹国家公园的建设也在逐步推进中,未来保护力度将逐渐增强。保护策略制定过程中必须考虑环境因素的影响,基于气候变化下进行物种系统保护规划,能够提高物种保护成效。

对比优先保护区域与自然保护区,物种之间保护优先区域(图 3)和重点关注的自然保护区存在差异(表 7)。气候变化下 5 个物种主要在大兴安岭西侧仍存在大片保护空缺,大兴安岭地区的林场管理方式与经营计划将直接影响 5 个物种的保护工作,应当在推进天然林保护工程的基础上开展森林抚育和物种监测。针对小兴安岭及完达山地区生境破碎化加剧的问题,重点关注区域森林植被恢复工程。在长白山地区人口密度大,人为干扰剧烈,侧重人为影响的管控工作。

表 7 保护优先区与已建自然保护区的对比

Table 7 Priority reserve area compare with nature reserve

地区 Areas	自然保护区 Nature reserves	黑熊 <i>Ursus thibetanus</i>				驼鹿 <i>Alces alces</i>				水獭 <i>Lutra lutra</i>				紫貂 <i>Martes zibellina</i>				黑嘴松鸡 <i>Tetrao parvirostris</i>			
		PR NR MR P				PR NR MR P				PR NR MR P				PR NR MR P				PR NR MR P			
		PR	NR	MR	P	PR	NR	MR	P	PR	NR	MR	P	PR	NR	MR	P	PR	NR	MR	P
小兴安岭	乌伊岭	●																			
Xiaoxing'an	大沾河	●																			
Mountains	友好	●																			
	红星湿地	●																			
	胜山	●																			
延边地区	穆棱东北红豆杉	●																			
Yanbian Area	大峡谷黄泥河	●	●	●																	
	老爷岭东北虎	●	●	●	✓					●				●	●	●	✓				
	珲春东北虎	●	●	●	✓									●	●	●					
	汪清原麝	●	●	●	✓					●				●	●	●	✓				
长白山地区	天佛指山	●	●	●	✓					●	●	●	✓	●	●	●	✓				
Changbai	长白山	●	●	●	✓					●	●	●	✓	●	●	●	✓				
Mountains	鸭绿江上游	●	●	●	✓					●				●	●						
	黄泥河	●																			
	大峡谷	●												●	●	●	✓				
	哈尼	●	●	●	✓									●							
	集安			●	✓																
	白石砬子			●	✓																
	老秃顶子	●	●	●																	
	白山原麝	●	●																		
三江平原	八岔岛									●	●	✓									
Sanjiang Plain	三江									●	●	✓									
	洪河									●											
	饶力河									●											
	呼中					●	●	●	✓	●	●	●	✓	●	●	●	✓	●	●	●	✓
Daxing'an	汗马					●	●	●	✓	●	●	●	✓	●	●	●	✓	●	●	●	✓
Mountains	额尔古纳					●	●	●		●				●				●		●	

续表

地区 Areas	自然保护区 Nature reserves	黑熊 <i>Ursus thibetanus</i>				驼鹿 <i>Alces alces</i>				水獭 <i>Lutra lutra</i>				紫貂 <i>Martes zibellina</i>				黑嘴松鸡 <i>Tetrao parvirostris</i>			
		PR	NR	MR	P	PR	NR	MR	P	PR	NR	MR	P	PR	NR	MR	P	PR	NR	MR	P
	双河					●	●	●	√												
	南瓮河					●	●	●													
	绰尔河					●															
	中央站黑嘴松鸡					●															
内蒙古	红花尔基													●							

MR:必须保护, mandatory reserve; NR:协商保护, negotiable reserve; PR:部分保护, partially reserve; P:保护优先性, protection priority。●代表保护区内涵盖不同级别的优先保护区域, √代表这一物种需要重点关注的保护区, 即保护区内必须保护区域面积成片且较大, 或者自然保护区位置在保护优先区域内有重要意义

物种保护经常面临资源有限、投入不足, 所以识别保护空缺、优先保护地, 能够提高保护工作的成效。大兴安岭的呼中、汗马与额尔古纳国家级自然保护区, 延边地区的天佛指山、老爷岭东北虎、珲春东北虎与汪清原麝国家级自然保护区, 长白山国家级自然保护区是本研究 5 个物种的优先保护区域, 保护优先性高, 应考虑优先开展多个物种的专项科研监测和保护行动。

4.3 展望

由于目前东北地区保护政策的逐步推进, 物种栖息地面临的人为干扰等因素趋于稳定, 未来气候变化将是影响物种分布的主要因素。在物种分布变迁的研究中应更慎重地选择气候模式, 针对不同物种、不同地区的研究, 先一步对气候模式进行评估。在物种系统保护规划中也需要考虑气候变化的影响。后期研究可关注:

(1) 本研究选用研究数据比较充足, 在研究区域具有代表性, 在野外易于辨认的重点保护物种, 但为保证模型选择在不同物种间的适用性, 还需要增加物种数量, 未来研究应对不同类型开展验证实验。同时, 不同区域、不同尺度的模拟可能对不同气候模式的适用性存在差异, 应对气候模式的适用性进行跨尺度、跨地区的评价。

(2) 系统保护规划需要统筹规划各个层面的信息, 包括物种保护成本, 在同样支持下尽量保护更多物种。后期研究应当着重气候变化对保护规划的影响, 注重关键保护地, 并针对保护空缺开展小尺度保护规划。

参考文献 (References):

- [1] Butchart S H M, Walpole M, Collen B, van Strien A, Scharlemann J P W, Almond R E A, Baillie J E M, Bomhard B, Brown C, Bruno J, Carpenter K E, Carr G M, Chanson J, Chenery A M, Csirke J, Davidson N C, Dentener F, Foster M, Galli A, Galloway J N, Genovesi P, Gregory R D, Hockings M, Kapos V, Lamarque J F, Leverington F, Loh J, McGeoch M A, McRae L, Minasyan A, Morcillo M H, Oldfield T E E, Pauly D, Quader S, Revenga C, Sauer J R, Skolnik B, Spear D, Stanwell-Smith D, Stuart S N, Symes A, Tierney M, Tyrrell T D, Vié J C, Watson R. Global biodiversity: indicators of recent declines. *Science*, 2010, 328(5982): 1164-1168.
- [2] Noss R F, Coopenter A Y. *Saving Nature's Legacy: Protecting and Restoring Biodiversity*. Washington: Island Press, 1994.
- [3] Beauprand G, Edwards M, Raybaud V, Goberville E, Kirby R R. Future vulnerability of marine biodiversity compared with contemporary and past changes. *Nature Climate Change*, 2015, 5(7): 695-701.
- [4] Willis K J, Gillson L, Knapp S. Biodiversity hotspots through time: an introduction. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2007, 362(1478): 169-174.
- [5] Li J, Liu F, Xue Y D, Zhang Y, Li D Q. Assessing vulnerability of giant pandas to climate change in the Qinling Mountains of China. *Ecology and Evolution*, 2017, 7(11): 4003-4015.
- [6] Elith J, Leathwick J R. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2009, 40: 677-697.
- [7] Markovic D, Carrizo S, Freyhof J, Cid N, Lengyel S, Scholz M, Kasperdus H, Darwall W. Europe's freshwater biodiversity under climate change: distribution shifts and conservation needs. *Diversity and Distributions*, 2014, 20(9): 1097-1107.
- [8] IPCC. What is a GCM?. (2013-08-16). http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html.

- [9] IPCC. Climate Change 2014; Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2015: 151-151.
- [10] Margules C R, Pressey R L. Systematic conservation planning. *Nature*, 2000, 405(6783): 243-253.
- [11] Vimal R, Rodrigues A S, Mathevet R, Thompson J D. The sensitivity of gap analysis to conservation targets. *Biodiversity and Conservation*, 2011, 20(3): 531-543.
- [12] 郭云, 梁晨, 李晓文. 基于水鸟保护的长江流域湿地优先保护格局模拟. *生态学报*, 2018, 38(6): 1984-1993.
- [13] 周桂双. C-Plan 软件在自然保护区规划中的应用. *哈尔滨师范大学自然科学学报*, 2017, 33(4): 124-126.
- [14] Moilanen A. Landscape Zonation, benefit functions and target-based planning: unifying reserve selection strategies. *Biological Conservation*, 2007, 134(4): 571-579.
- [15] Lehtomäki J, Moilanen A. Methods and workflow for spatial conservation prioritization using Zonation. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 47: 128-137.
- [16] Wan J Z, Wang C J, Han S J, Yu J H. Planning the priority protected areas of endangered orchid species in northeastern China. *Biodiversity and Conservation*, 2014, 23(6): 1395-1409.
- [17] 肖静, 崔莉, 李俊清. 基于 ZONATION 的岷山山系多物种保护规划. *生态学报*, 2016, 36(2): 420-429.
- [18] 李祯, 郑承留, 孙文昌. 东北地区自然地理. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [19] 蒋志刚, 江建平, 王跃招, 张鹗, 张雁云, 李立立, 谢锋, 蔡波, 曹亮, 郑光美, 董路, 张正旺, 丁平, 罗振华, 丁长青, 马志军, 汤宋华, 曹文宣, 李春旺, 胡慧建, 马勇, 吴毅, 王应祥, 周开亚, 刘少英, 陈跃英, 李家堂, 冯祚建, 王燕, 王斌, 李成, 宋雪琳, 蔡蕾, 臧春鑫, 曾岩, 孟智斌, 方红霞, 平晓鸽. 中国脊椎动物红色名录. *生物多样性*, 2016, 24(5): 500-551.
- [20] 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的影响. *生态学报*, 2016, 36(7): 1815-1823.
- [21] Zhang R, Yang L, Laguardia A, Jiang Z, Huang M J, Lv J, Ren Y H, Zhang W, Luan X F. Historical distribution of the otter (*Lutra lutra*) in north-east China according to historical records (1950-2014). *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2016, 26(3): 602-606.
- [22] Zhang R, Yang L, Ai L, Yang Q Y, Chen M H, Li J X, Yang L, Luan X F. Geographic characteristics of sable (*Martes zibellina*) distribution over time in Northeast China. *Ecology and Evolution*, 2017, 7(11): 4016-4023.
- [23] Ren Y H, Yang L, Zhang R, Lv J, Huang M J, Luan X F. Decline and range contraction of black-billed capercaillie (*Tetrao urogalloides*) in northeast China from 1950 to 2010 based on local historical documents. *Pakistan Journal of Zoology*, 2016, 48(6): 1825-1830.
- [24] Yang L, Zhang C, Chen M H, Li J X, Yang L, Huo Z M, Ahmad S, Luan X F. Long-term ecological data for conservation: Range change in the black-billed capercaillie (*Tetrao urogalloides*) in northeast China (1970s - 2070s). *Ecology and Evolution*, 2018, 8(8): 3862-3870.
- [25] 张树清, 蔡洪岩, 李延明, 姜臣学. 辽宁省黑熊资源现状及保护. *野生动物学报*, 2008, 29(4): 214-216.
- [26] 赵文双, 张敏, 赵文元, 李景梅. 辽宁省黑熊资源调查研究. *辽宁林业科技*, 2005, (3): 17-19.
- [27] 朴正吉, 朴龙国, 王卓聪, 罗玉梅, 王超, 睢亚橙. 长白山自然保护区黑熊和棕熊种群数量动态分析. *动物学杂志*, 2012, 47(3): 66-72.
- [28] 战如亮, 王文, 陈洋, 冯妍. 黑龙江省通河县乌拉浑林场黑熊的生境选择. *野生动物学报*, 2010, 31(2): 69-73.
- [29] Brown J L. SDMtoolbox: a python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses. *Methods in Ecology and Evolution*, 2014, 5(7): 694-700.
- [30] Wisz M S, Hijmans R, Li J, Peterson A T, Graham C, Guisan A. Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Diversity & Distributions*, 2008, 14(5): 763-773.
- [31] 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.
- [32] Moilanen A, Pouzols F M, Meller L, Veatch V, Arponen A, Leppänen J, Kujala H. Zonation: Spatial Conservation Planning Methods and Software. Version 4 User Manual. Finland: C-BIG Conservation Biology Informatics Group, Department of Biosciences University of Helsinki, 2014.
- [33] Margules C R, Sarkar S. Systematic Conservation Planning. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 243-253.
- [34] 栾晓峰, 孙工棋, 曲艺, 黄维妮, 李迪强, 刘世荣, 吴波. 基于 C-Plan 规划软件的生物多样性就地保护优先区规划——以中国东北地区为例. *生态学报*, 2012, 32(3): 715-722.