

DOI: 10.5846/stxb202008302254

乔雪丽, 林峻, 吴建国, 赵雪迷, 巨喜锋, 郑江华. 气候变化情景下大沙鼠潜在地理分布. 生态学报, 2021, 41(17): 6904-6912.

Qiao X L, Lin J, Wu J G, Zhao X M, Ju X F, Zheng J H. Potential geographical distribution of *Rhombomys opimus* under climate change scenarios. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(17): 6904-6912.

气候变化情景下大沙鼠潜在地理分布

乔雪丽¹, 林峻², 吴建国², 赵雪迷¹, 巨喜锋¹, 郑江华^{1,3,*}

¹ 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046

² 新疆治蝗灭鼠指挥部办公室, 乌鲁木齐 830001

³ 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

摘要:大沙鼠(*Rhombomys opimus*)是中亚地区典型的荒漠啮齿动物,其采食和掘洞行为造成了荒漠林和荒漠草原退化加剧,生态环境恶化。基于大沙鼠分布数据、气候、土壤和地形因子数据,采用 MaxEnt 模型预测大沙鼠在当前气候和温室气体低、中、高 3 种浓度排放情景下 2050 年和 2070 年的潜在适生区,分析亚洲大陆未来气候条件下大沙鼠适生面积和分布格局的变化趋势,探讨影响大沙鼠分布的主要环境因子。结果表明:模型 AUC(Area Under Curve)值达到 0.9 以上,预测的准确性达到“极好”。经刀切法分析(Jackknife)表明,影响大沙鼠在适生区分布最主要的环境变量为温度季节性变化的标准差、土壤基本饱和度、最干季度降水量、最暖季度降水量和土壤可交换钠盐。Rcp2.6、Rcp4.5 和 Rcp8.5 三种气候场景下 2050 年高适生区面积较当前分别增长 15.78%、15.10%和 13.44%;Rcp2.6、Rcp4.5 和 Rcp8.5 三种气候场景下 2070 年高适生区面积较当前增长 8.32%、13.18%和 18.18%。中国大沙鼠适生区范围内,新疆所分布的大沙鼠适生区分布范围变化较大,3 种情景模式下大沙鼠的适生区位置向新疆北部扩张;甘肃适生区位置向西北部扩张;内蒙西北部和阿拉善地区大沙鼠的适生区位置向四周扩张。研究揭示了未来气候下大沙鼠高适生区范围和空间变化,并得到影响其分布的主要环境变量,对其防控具有重要意义。

关键词:大沙鼠;荒漠林;荒漠草原;MaxEnt 模型;潜在地理分布;气候变化

Potential geographical distribution of *Rhombomys opimus* under climate change scenarios

QIAO Xueli¹, LIN Jun², WU Jianguo², ZHAO Xuemi¹, JU Xifeng¹, ZHENG Jianghua^{1,3,*}

¹ College of Resources and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

² Xinjiang Locust Control and Rodent Control Headquarters Office, Urumqi 830001, China

³ Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Urumqi 830046, China

Abstract: The *Rhombomys opimus* is a typical desert rodent in Central Asia. Its feeding and burrowing behaviors have caused the deterioration of desert forests and desert grasslands and the deterioration of the ecological environment. Based on the distribution data of gerbils, climate, soil and topographic factor data, the MaxEnt model was used to predict the potential suitable areas of *Rhombomys opimus* in 2050 and 2070 under the current climate and the low, medium and high concentration emission scenarios of greenhouse gases. we analyze the changing trend of suitable area and distribution pattern of *Rhombomys opimus* in the Asian continent in the future, and discuss the main environmental factors that affect the distribution of gerbils. The results showed that the model's Area Under Curve value was above 0.9, and the accuracy of prediction reached excellent. Jackknife analysis showed that the most important environmental variables affecting the distribution of *Rhombomys opimus* in suitable areas were the standard deviation of seasonal changes in temperature, basic

基金项目:新疆“天山雪松计划”项目(2021);新疆草原生物灾害遥感监测(070216328);新疆维吾尔自治区草原有害生物普查项目

收稿日期:2020-08-30; **网络出版日期:**2021-06-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Zheng_jianghua@126.com

soil saturation, precipitation of the driest quarter, precipitation of the warmest quarter, and the soil exchangeable sodium salt. Under three climate scenarios of Rcp2.6, Rcp4.5 and Rcp8.5, the area of high growth zone in 2050 will increase by 15.78%, 15.10% and 13.44% compared with the current climate model. Under the three climate scenarios, the area of high growth zone in 2070 will increase by 8.32%, 13.18% and 18.18% compared with the current climate model. Within the range of suitable areas for *Rhombomys opimus* in China, the distribution range of suitable areas for gerbils in Xinjiang varies greatly. Under the three scenarios, suitable areas for *Rhombomys opimus* will expand to the north of Xinjiang; the suitable areas for Gansu will expand to the northwest. The suitable areas of *Rhombomys opimus* in northwest Inner Mongolia and Alxa area will expand to the surrounding area. The study revealed the range and spatial changes of highly suitable habitat of gerbils in the future climate, and the main environmental variables that affect its distribution, which was of great significance to the prevention and control of *Rhombomys opimus*.

Key Words: *Rhombomys opimus*; desert forest; desert grasslands; MaxEnt model; potential geographic distribution; climate change

大沙鼠(*Rhombomys opimus*)是亚洲中部荒漠林以及荒漠草原的典型栖居者,栖息地为亚洲大陆部分国家,是家庭集群动物,其洞穴系统的入住率平均持续 11a^[1-3]。大沙鼠生活在地下洞穴系统中的家庭群体中,该系统包括一个复杂的隧道和小室网络,深度达数米。一个典型的家庭群体包括一个成年雄性,一个或多个成年雌性及其未成熟的后代^[4]。

大沙鼠的危害是多方面的。近年来,荒漠林鼠害持续高发,严重危害着荒漠林的健康生长,导致生物结皮层退化,荒漠化加剧,生态环境持续恶化^[5-6]。更为严重的是,鼠类大量挖掘洞穴,导致地表植物覆盖率显著下降,地区沙漠化显著加剧。鼠类挖掘洞穴时所留下的土丘受风蚀、径流的影响,不但使荒漠林和荒漠草原出现大片无植被覆盖地区,而且也成为了沙尘暴沙尘的重要来源^[7];另一方面,大沙鼠也是亚洲沙漠和草原中鼠疫细菌(耶尔森氏菌)的主要宿主^[1]。当前,鼠疫病病原体主要在非洲、美洲和亚洲的啮齿类动物中传播,并主要在非洲造成人类死亡^[8]。近年来,我国也陆续发现多例青海、内蒙等地的人间鼠疫病例。因此,准确地监测和预测大沙鼠的空间分布及危害情况,对及时采取有效措施进行防治具有重要意义。

大沙鼠对于栖息生境的选择是伴随着自然选择的长期进化过程而不断发展变化的,这种选择受诸多条件制约,如不同物种间的竞争或相互利用、自然地理因素、人类社会活动的影响等等^[9]。影响大沙鼠栖息地选择的三个最主要因素是食物条件、地形特点和植被覆盖度,季节差异对大沙鼠栖息地的选择也有明显的影响作用^[9]。戴昆、赵天飙等学者认为大沙鼠主要选择丘间地及固定沙丘为筑巢地形^[10-11];张三亮等认为大沙鼠的洞群主要分布在固定沙丘,其洞群主要分布在丘间地,其次是迎风坡,大沙鼠不会选择背风坡和丘顶营巢,并发现大沙鼠分布与优势植物种类、植被盖度有显著关系^[12]。

气候变化影响到世界各地的许多生态系统和生物群,包括目前许多物种的分布^[13-16]。未来的气候变化会加速物种的分布,根据生态位模型(ENMs)预测物种的潜在分布^[17]可以提醒科学家和决策者未来气候变化将对生物多样性构成威胁的潜在风险,并帮助他们提出积极的应对策略以减轻气候对生物多样性变化的影响^[18]。在各种 ENM 中,最大熵(MaxEnt)算法具有相对较高的预测精度,同时使用少量数据根据环境变量确定物种发生率^[19]。杨楠等使用 MaxEnt 模型对蓝马鸡(*Crossoptilon auritum*)栖息地适宜性进行了分析和评价^[20];Md.Mamun 等利用最大熵模型(MaxEnt)对朝鲜半岛入侵外来物种大嘴鲈(*Micropterus salmoides*)的分布模式进行预测^[21];袁智文等利用 MaxEnt 模型构建了华南梅花鹿栖息地适宜性模型^[22]。

目前,国内外大沙鼠的研究大多集中在对其局域分布格局、生理生化等方面^[23-24],对于亚洲大陆大沙鼠的潜在分布预测处于空白状态,本研究通过收集和筛选大沙鼠地理分布信息,结合相关环境数据,利用 MaxEnt 模型对在不同环境条件下大沙鼠在亚洲的潜在地理分布变化进行预测,旨在研究以下问题:(1)现代气候条件下大沙鼠在亚洲的潜在地理分布,并以此为依据探究大沙鼠的潜在地理分布与环境因子的关系,探

讨不同情景下限制大沙鼠潜在地理分布的重要环境因子;(2)未来气候变化情景下,大沙鼠在亚洲各个国家潜在分布区的地理变化。本文对大沙鼠的空间分布进行预测、预报,对有效保护森林资源的可持续发展和公共卫生监测方面起着不可比拟的作用,对亚洲国家制定合理的预防方案具有重要意义。

1 材料和方法

1.1 物种发生数据

大沙鼠的发生数据以下列方式获得:(1) 2016 至 2020 年的实地调查和新疆治蝗灭鼠指挥部办公室提供的新疆大沙鼠发生数据点,共计 89 个。新疆境内的采样点多为实地考察获得,调查点主要位于古尔班通古特沙漠荒漠林、和布克赛尔蒙古自治县、玛纳斯县等区域,使用 GPS 记录大沙鼠的纬度、经度和高度,部分数据已发表^[23-25];(2) 国内外公开发表的论文^[9,12,26-33],分布数据中仅有地名无经纬度信息,通过 GPSSPG 网站(<http://www.gpsspg.com/>)进行查询^[34];(3) 全球生物多样性信息交换平台(GBIF, <https://www.gbif.org/>)。基于上述收集到 207 个分布数据,本文从空间上筛选了大沙鼠的分布数据,并利用 ArcGIS10.4 在研究区域建立了 10'×10' 网格,以确保每个网格中只有一条记录。最终得到 123 个物种发生数据记录,如图 1。

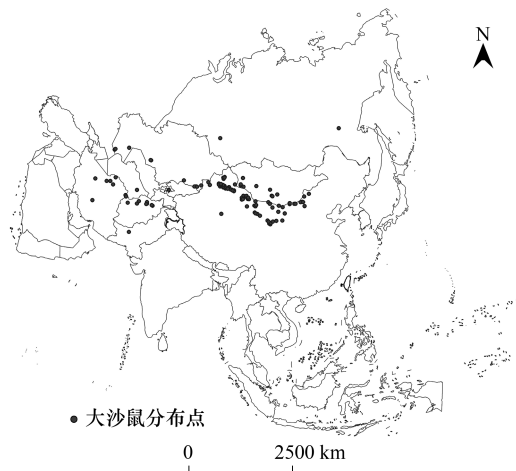


图 1 大沙鼠的分布点数据

Fig.1 Distribution point data of *Rhombomys opimus*

1.2 环境变量数据

本文初步选择了 39 个可能影响大沙鼠空间分布的环境变量:气候数据来源于全球气候数据库网站(<http://www.worldclim.org/>),获得 19 个生物气候变量,空间分辨率为 5arc-minutes,IPCC AR5 分析了 4 种典型温室气体排放浓度(RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5)对未来气候的影响^[35-36],本研究选取 BCC-CSM1.1 全球未来气候模式 2050 年及 2070 年三种气候情景(RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5)作为未来气候情景;从世界土壤数据库(<http://www.iiasa.ac.at/>)获得 17 个土壤变量;选择了 3 个地形变量(<http://www.resdc.cn/>)(表 1)。

环境变量被重新采样为 30s 的空间分辨率,许多环境变量在空间上是相关的,这可能导致预测过度拟合。因此,用斯皮尔曼的相关系数来研究环境变量中因子之间的相关性。如果系数为 $b < 0.75$,则保留环境变量;如果系数为 $b > 0.75$,则保留其中生态意义较强的环境变量^[37]。

1.3 模型预测及评估

将大沙鼠分布数据和不同场景下的环境数据导入 MaxEnt 模型中(maxent 3.4.1; <http://www.cs.princeton.edu/wschapire/maxent>),为了确定影响大沙鼠分布的关键环境因子,随机选择 75%的大沙鼠分布数据作为训练集,其余 25%的数据作为测试集,共有 10000 个背景点,进行了 10 次重复,并对重复运行进行了交叉验证,以保证模型的准确性,开启刀切法(Jackknife)计算环境变量对大沙鼠分布的影响,最终得到各气候环境因子的响应曲线。

利用接受者操作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)对 MaxEnt 模型运算结果进行检验, AUC 值从 0 到 1 不等, AUC 值高表示优越,预测效果的表现分为差(0—0.6)、较差(0.6—0.7)、一般(0.7—0.8)、较好(0.8—0.9)和极好(0.9—1)^[38]。

1.4 适生等级划分和主导环境因子分析

参照 IPCC 报告有关评估可能性划分方法,并结合大沙鼠实际分布情况,将大沙鼠潜在地理分布划分为不同等级及相应分布范围,划分标准为:存在概率 < 0.05 为不适生区; $0.05 \leq$ 存在概率 < 0.33 为低适生区;

0.33≤存在概率<0.66 为中适生区;存在概率≥0.66 为高适生区^[39]。综合 Jackknife 检验、贡献率和置换重要值分析结果确定影响大沙鼠适生分布的主导环境变量,根据大沙鼠潜在分布概率在不同主导环境变量中的响应曲线,获得不同分布等级下主导环境因子的贡献率。

表 1 气候变量名称及描述
Table 1 Names and descriptions of climate variables

代码 Code	描述 Description	代码 Code	描述 Description
BIO1	年均温	T_TEXTURE	顶层土壤质地
BIO2	昼夜温差月均值	T_GRAVEL; Real	碎石体积百分比
BIO3	等温性	T_SAND; Real	沙含量
BIO4	温度季节性变化的标准差	T_SILT; Real	淤泥含量
BIO5	最暖月最高温	T_CLAY; Real	粘土含量
BIO6	最冷月最低温	T_USDA_TEX; Real	USDA 土壤质地分类
BIO7	年均温变化范围	T_REF_BULK; Real	土壤容重
BIO8	最湿季度平均温度	T_OC; Real	有机碳含量
BIO9	最干季度平均温度	T_PH_H2O; Real	酸碱度
BIO10	最暖季度平均温度	T_CEC_CLAY; Real	粘性层土壤的阳离子交换能力
BIO11	最冷季度平均温度	T_CEC_SOIL; Real	土壤的阳离子交换能力
BIO12	年均降水量	T_BS; Real	基本饱和度
BIO13	最湿月降水量	T_TEB; Real	交换性盐基
BIO14	最干月降水量	T_CACO3; Real	碳酸盐或石灰含量
BIO15	降水量变异系数	T_CASO4; Real	硫酸盐含量
BIO16	最湿季度降水量	T_ESP; Real	可交换钠盐
BIO17	最干季度降水量	T_ECE; Real	电导率
BIO18	最暖季度降水量	Altitude	海拔
BIO19	最冷季度降水量	Slope	坡度
		Aspect	坡向

2 结果与分析

2.1 模型精度评价

基于 MaxEnt 模型建模重复运行 10 次后得到的训练数据 AUC 值在 0.984—0.985 之间,测试集 AUC 值在 0.969—0.987,见表 2。根据 AUC 值的评估标准^[39],模型预测的准确性达到“极好”,表明模型能很好的拟合大沙鼠物种分布数据,其预测结果可信。

表 2 不同气候场景下 AUC 及标准差
Table 2 AUC and standard deviation in different climate scenarios

情景 Scenario	训练 AUC AUCtrain	测试 AUC Auctest	标准差 Standard deviation	情景 Scenario	训练 AUC AUCtrain	测试 AUC Auctest	标准差 Standard deviation
目前 Current	0.985	0.987	0.003	RCP4.5 2070	0.984	0.969	0.018
RCP2.6 2050	0.984	0.972	0.014	RCP8.5 2050	0.984	0.969	0.016
RCP2.6 2070	0.985	0.969	0.018	RCP8.5 2070	0.985	0.968	0.017
RCP4.5 2050	0.984	0.971	0.013				

2.2 环境变量对大沙鼠分布的影响

利用 Jackknife 检验可以评估环境变量对预测结果的影响程度,从而判断不同变量对大沙鼠潜在分布的

重要性。Jackknife 检验结果表明如表 3 所示,影响大沙鼠在适生区分布最主要的环境变量为温度季节性变化的标准差(BIO4)、土壤基本饱和度(T_BS)、最干季度降水量(BIO17)、最暖季度降水量(BIO18)和土壤可交换钠盐(T_ESP),五类环境变量累计贡献率达 64.5%,其余变量贡献较小。

表 3 影响大沙鼠环境变量重要性的刀切法检验

Table 3 Jackknife test that affects the importance of environmental variables in <i>Rhombomys opimus</i>					
环境变量 Environmental variable	贡献率/% Percent contribution	累计贡献率/% Permutation importance	环境变量 Environmental variable	贡献率/% Percent contribution	累计贡献率/% Permutation importance
BIO4	26.8	35.8	BIO7	0.8	1.3
T_BS	16.8	0.2	T_SILT	0.6	2.0
BIO17	9.1	0.6	BIO9	0.5	5.1
BIO18	5.9	18.6	T_CACO4	0.5	0.6
T_ESP	5.9	0.5	T_CACO3	0.4	0.5
BIO1	5.6	0.0	ASPECT	0.4	0.4
BIO11	5.6	21.2	T_ECE	0.4	0.5
BIO5	3.9	0.7	T_GRAVEL	0.3	0.1
BIO19	3.4	1.0	BIO15	0.3	0.8
BIO13	2.1	0.6	BIO6	0.3	0.0
ALTITUDE	1.7	1.3	BIO14	0.2	0.0
T_USDA_TEX_CLASS	1.7	1.3	T_CEC_SOIL	0.1	1.8
T_TEXTURE	1.4	0.0	BIO10	0.1	1.0
BIO8	1.4	0.9	T_OC	0.1	0.0
BIO3	1.3	0.1	T_TEB	0.1	0.7
BIO2	1.0	0.2	T_SAND	0.1	0.1
SLOPE	0.9	2.0	T_CEC_CLAY	0.1	0.1

2.3 当前气候下大沙鼠在亚洲大陆的潜在分布区

大沙鼠在当前气候情境下的高适生区面积为 940830km²,约占研究区总面积的 1.28%;中适生区面积为 3638189km²,占研究区总面积的 4.95%;低适生区面积为 10594040km²,约占研究区总面积的 14.43%。

高适生区(0.66—1)主要分布在:(1)中国境内:新疆北部和东部地区的荒漠地区;甘肃省安西的明水、酒泉、嘉峪关、张掖和民勤等区域;内蒙古阿拉善等的部分荒漠草原地区;(2)蒙古国的科布多省、南戈壁省和东戈壁省等地区;哈萨克斯坦国家的巴尔喀什湖的东部部分地区、曼吉斯套州和克孜勒奥尔达州等部分荒漠地区;乌兹别克斯坦的中部地区;土库曼斯坦的克兹勒阿尔瓦特和达绍古兹州的部分地区;土耳其的南部地区;伊拉克的萨拉赫丁省;其次在吉尔吉斯斯坦伊塞克湖的西南部呈零星分布、塔吉克斯坦南部与阿富汗交界处、阿富汗的北部萨曼甘省、巴格兰省、昆都士省和塔哈尔省等部分区域;伊朗也有少量分布区域,见图 2。

中适生区(0.33—0.66)和低适生区(0.05—0.33)同样分布在以上国家,其中低适生区增加了俄罗斯的阿加布里亚特自治区南部与蒙古国交界处和额尔齐斯河东部的少量区域,阿塞拜疆西部和沙特阿拉伯北部边疆区。

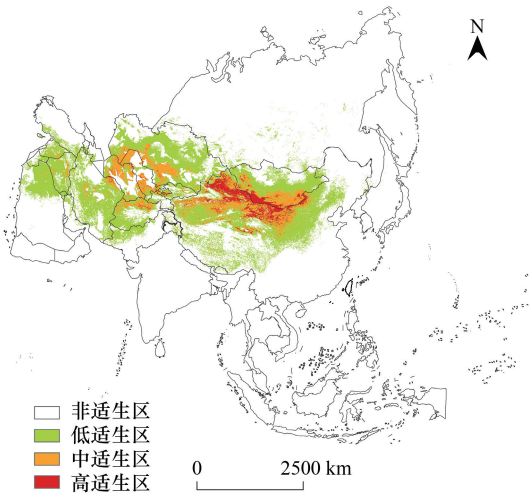


图 2 大沙鼠当前在亚洲的适生区分布范围

Fig.2 The current suitable distribution range of *Rhombomys opimus* in Asia

2.4 未来气候下大沙鼠在亚洲大陆的潜在分布区

从表 4 中可以得到,Rcp2.6 场景下 2050 年和 2070 年大沙鼠高适生区面积和中适生区面积较当前气候场景下呈增大趋势,其中 2050 年和 2070 年高适生区面积较当前分别增大 15.78%和 8.32%,中适生区面积和低适生区均较当前气候场景下呈明显增大趋势。Rcp4.5 场景下 2050 和 2070 年大沙鼠高适生区面积较当前气候场景下增大 15.10%和 13.18%;中适生区面积较当前气候场景下呈增大趋势,低适生区呈明显增大趋势。Rcp8.5 场景下 2050 年和 2070 年高适生区面积较当前增加了 13.44%和 18.18%,中适生区面积较当前呈下降趋势;低适生区面积较当前呈明显增大趋势。对比 4 种气候场景(图 3),大沙鼠的高适生区和中适生区空间位置偏移程度较小,但低适生区空间位置偏移程度较大。

表 4 不同气候变化情境下大沙鼠适生区面积
Table 4 The suitable area of *Rhombomys opimus* under different climate change scenarios

气候情景 Scenario	高适生区面积/km ² Optimal area	中适生区面积/km ² Suitable area	低适生区面积/km ² Marginal area	高适生区面积较 目前增长百分比/% The area of the high-fit area is increasing by a percentage of the current level
RCP2.6 2050	1 089 281	4 289 373	11 029 226	15.78
RCP2.6 2070	1 019 129	4 077 398	11 106 134	8.32
RCP4.5 2050	1 082 932	3 900 462	11 722 547	15.10
RCP4.5 2070	1 064 858	3 777 977	11 806 871	13.18
RCP8.5 2050	1 067 284	3 560 822	11 329 616	13.44
RCP8.5 2070	1 111 880	3 562 051	11 638 749	18.18

3 结论与讨论

1) 本研究基于大沙鼠的分布点数据和 39 个环境变量数据,利用 MaxEnt 模型对大沙鼠在亚洲大陆的适生区进行预测,ROC 曲线即 AUC 值高于 0.9,标准差在 0.015 上下浮动,表明模型达到“极好”的标准。

2) Jackknife 检验结果表明,影响大沙鼠在适生区分布最主要的环境变量为温度季节性变化的标准差(BIO4)、土壤基本饱和度(T_BS)、最干季度降水量(BIO17)、最暖季度降水量(BIO18)和土壤可交换钠盐(T_ESP),5 类环境变量累计贡献率达 64.5%。

3) 研究结果表明,气候变化影响大沙鼠 2050 年代和 2070 年代大沙鼠的分布,并且影响会因地区而异。对比四种气候场景下,大沙鼠的高适生区和中适生区空间位置偏移程度较小,但低适生区空间位置偏移程度较大。与其他国家相比,中国适生区的温度季节性变化的标准差、土壤基本饱和度、最干季度降水量、最暖季度降水量和土壤可交换钠盐更适于大沙鼠生存。中国境内的适生范围为 36°—49°N,76°—114°E;高适生区主要分布于西起新疆裕民县巴鲁克山西麓和中(国)哈(萨克斯坦)边界的阿拉山口一带,经甘肃省到内蒙古苏尼特右旗的赛汗高毕苏木。新疆大沙鼠适生区分布范围变化较大,3 种情景模式下大沙鼠的适生区位置向新疆北部扩张;甘肃适生区位置向西北部扩张;内蒙西北部和阿拉善地区大沙鼠的适生区位置向四周扩张。

4) 当前气候场景下,大沙鼠高适生区面积为 940 830km²,Rcp2.6、Rcp4.5 和 Rcp8.5 三种气候场景下 2050 年高适生区面积较当前分别增长 15.78%、15.10%和 13.44%;Rcp2.6、Rcp4.5 和 Rcp8.5 三种气候场景下 2070 年高适生区面积较当前增长 8.32%、13.18%和 18.18%。大沙鼠高适生区主要分布在中国、蒙古国、哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦、土耳其和伊拉克,其次在吉尔吉斯斯坦国、塔吉克斯坦国、阿富汗国、伊拉克和伊朗国也有少量分布区域。今后,相关部门应制定合理的预防方案,防止鼠害对森林资源和公共卫生的影响进一步扩大。

本研究运用 MaxEnt 生态位模型对大沙鼠的潜在分布进行模拟,模型 AUC 值达到 0.9 以上,说明对大沙鼠分布预测具有较好的效果。大沙鼠的采食和掘洞强烈影响荒漠植物的发育和外貌,以及荒漠生态系统的结

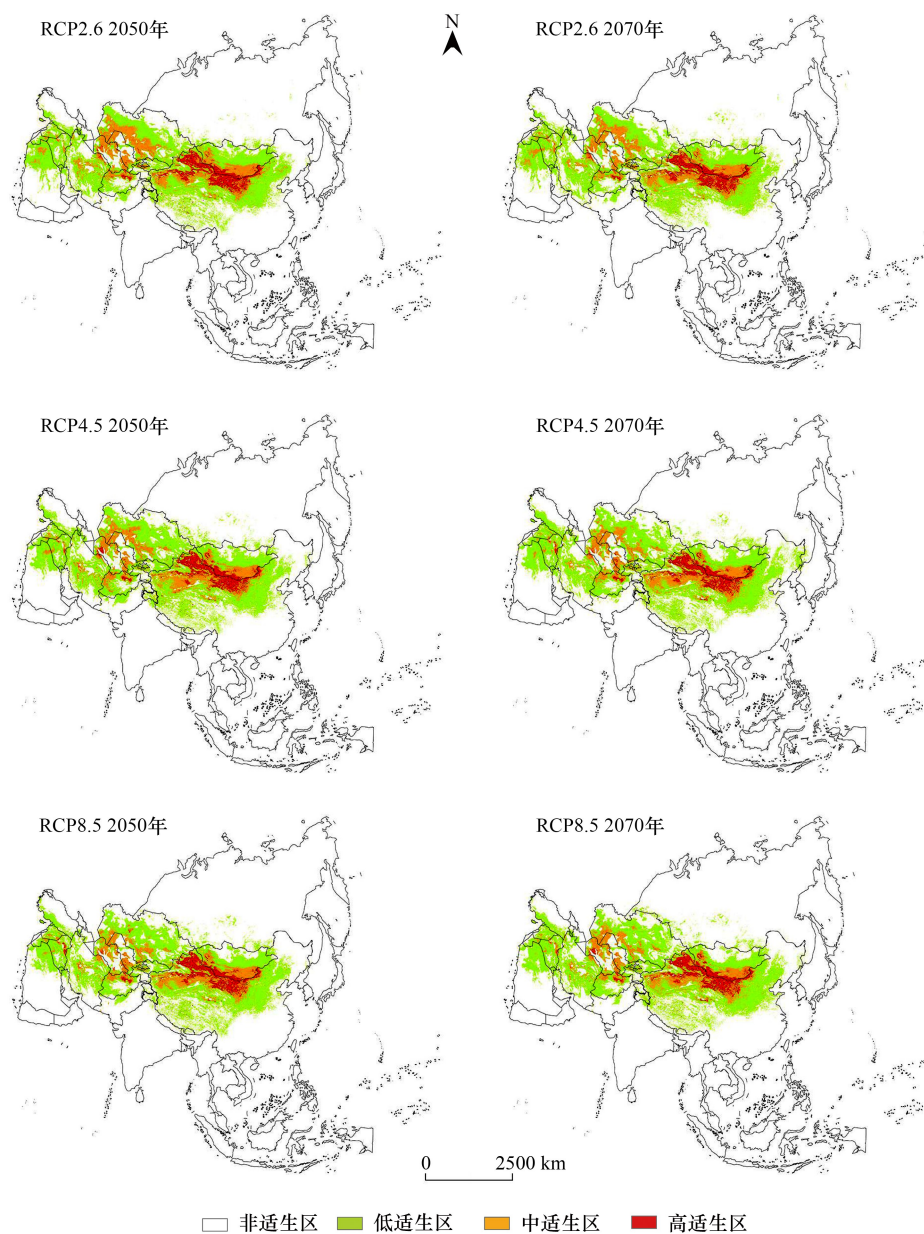


图3 未来30年和50年不同气候变化情景下的大沙鼠的潜在分布区

Fig.3 Potential distribution areas of *Rhombomys opimus* under different climate change scenarios in the next 30 and 50 years

PCR 为气候情景

构和功能,严重威胁着天然草地生态环境的健康,本研究将模拟结果与GIS相结合,对大沙鼠的监测、风险评估具有重要意义。在建立物种分布模型时,环境变量和样本量的选择会对生态位模型的预测结果产生一定的影响^[40]。多数研究者只考虑气候因子^[41-42]对物种分布的影响,本研究将地形、土壤共39个环境变量加入其中,剔除贡献率较小的环境变量,减少了冗余信息对模拟结果的影响,模拟效果较好。

结果显示,大沙鼠在中国的高适生区面积在不同场景下达 7.9×10^5 — $8.7 \times 10^5 \text{ km}^2$;同时中国的大沙鼠适生区范围随着碳排放量的增加并没有表现出规律性,2050年,在Rcp2.6场景下大沙鼠在中国的高适生区范围达到最大为 $8.7 \times 10^5 \text{ km}^2$;2070年,在Rcp8.5场景下大沙鼠在中国的高适生区范围达到最大为 $8.2 \times 10^5 \text{ km}^2$;大沙鼠在中国的中适生区面积在不同场景下达 14.0×10^5 — $15.4 \times 10^5 \text{ km}^2$;大沙鼠在中国的低适生区面积在不同场景下达 35.6×10^5 — $38.0 \times 10^5 \text{ km}^2$;大沙鼠在中国的高适生区和低适生区面积较当前呈明显增长趋势。

大沙鼠在蒙古国的高适生区范围较中国次之,2070 年大沙鼠在蒙古国的高适生区范围随着碳排放量的增加而增长;中适生区和低适生区范围随着碳排放量的增加而下降;大沙鼠在蒙古国的高适生区范围在 Rcp8.5 场景下达到最大为 $2.3 \times 10^5 \text{ km}^2$;2050 年大沙鼠在蒙古国的高适生区和中适生区范围随着碳排放量的增加并没有表现出规律性,大沙鼠在蒙古国的高适生区范围在 Rcp4.5 场景下达到最大值为 $2.33 \times 10^5 \text{ km}^2$;低适生区范围随着碳排放量的增加而下降。

这表明在未来 50 年,大沙鼠仍对草地生态环境造成严重危害,大沙鼠在中国和蒙古国的危险系数极高,有关部门应密切关注,严防鼠害成灾。

未来气候变化下,大沙鼠的适生区范围波动较大,高适生区范围较当前气候模式呈现明显增大趋势,7 种气候模式下的高适生区面积大小排名为:2070Rcp8.5>2050Rcp2.6>2050Rcp4.5>2050Rcp8.5>2070Rcp4.5>2070Rcp2.6>当前气候,表明未来气候变化越来越适宜大沙鼠的生存,大沙鼠的危害程度会加重,分布地区扩大。

刘洋等^[34]利用最大熵模型 MaxEnt 分析了埃及吹绵蚧在中国当前和未来(2050 年和 2070 年)的适生区范围,结果表明 Rcp8.5 气候模式下的适生区范围大于 Rcp4.5 气候模式下的适生区范围,说明温室气体的大量排放导致的全球温度的持续升高所带来的环境变化可能更加适宜于埃及吹绵蚧的生存,该虫的危害在未来可能加重;赵佳强等^[43]基于 MaxEnt 模型,对刺槐叶瘿蚊在中国当前和未来(2050 年)的适生区进行预测,结果显示:3 种外排情景 Rcp2.6、Rcp4.5、Rcp8.5 的总适生区均比当前气候的总适生范围大,以高度、中度适生区面积的增大为主,新疆和我国北部区域面积显著扩增;唐继洪等^[44]结合政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告发布的 BCC-CSM1.1 气候模式数据,采用最大熵(Maxent)模型预测了 4 种气候变化(RCP2.6,4.5,6.0 和 8.5)情景下 2050s 及 2070s 我国草地螟越冬区的变化情况,结果表明:我国草地螟越冬区将会较当前在面积上有所增长并且位置上有向北移动的趋势。上述研究结果表明:随着全球气候变暖,物种的现代潜在地理分布范围将会扩大,本研究结论一致。

MaxEnt 模型较其他生态位模型 CLIMEX、GARP 具有操作简便、样本需求量和预测精度高等优势,但不可避免也存在部分局限性,如数据量较庞大时运行速度将会滞后等。其他环境因子变量如:未来的人类活动强度和植被覆盖等数据对大沙鼠的潜在地理分布变化也有影响,由于未来时期的人类强度和植被覆盖数据难以获取,未加入对大沙鼠潜在地理分布的预测,在实际应用时必须结合当地的综合条件。接下来,应增加更为全面的环境变量,探讨其对物种分布模型结果的影响。

致谢:感谢新疆产学研联合培养研究生基地-新疆治蝗灭鼠指挥部办公室提供平台和数据支持。

参考文献(References):

- [1] Addink E A, de Jong S M, Davis S A, Dubyanskiy V, Burdellov L A, Leirs H. The use of high-resolution remote sensing for plague surveillance in Kazakhstan. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(3): 674-681.
- [2] Kausrud K L, Viljugrein H, Frigessi A, Begon M, Davis S, Leirs H, Dubyanskiy V, Stenseth N C. Climatically driven synchrony of gerbil populations allows large-scale plague outbreaks. *Proceedings of the Royal Society B*, 2007, 274(1621): 1963-1969.
- [3] Prakash I, Ghosh P K. *Rodents in Desert Environments*. Dordrecht: Springer, 1975.
- [4] Davis S, Begon M, De Bruyn L, Ageyev V S, Klassovskiy N L, Pole S B, Viljugrein H, Stenseth N C, Leirs H. Predictive thresholds for plague in Kazakhstan. *Science*, 2004, 304(5671): 736-738.
- [5] 梁倩玲,刘萍,陈梦,刘忠军,盛兆湖,苏延乐. 林业有害生物灾害损失评估研究进展. *林业资源管理*, 2015, (2): 139-144.
- [6] 冯文武,阿地力·沙塔尔. 昌吉市荒漠林鼠害种类调查及其防治技术研究. *防护林科技*, 2014, (2): 8-11, 13-13.
- [7] 陈立坤. 川西北草原鼠类危害特点及防治技术. *四川草原*, 2004, (11): 44-45.
- [8] World Health Organization. Human plague in 2002 and 2003. *Weekly Epidemiological Record*, 2004, 79(33): 301-306.
- [9] 罗婧婧. 甘肃省河西荒漠区大沙鼠发生规律及防治技术研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2010.
- [10] 戴昆,姚军,高行宜. 大沙鼠的巢域选择. *干旱区研究*, 1999, 16(4): 5-9.
- [11] 赵天飙,杨持,周立志,张忠兵,靳飞虎,宁恕龙. 中国大沙鼠生态学研究进展. *内蒙古大学学报:自然科学版*, 2005, 36(5): 591-596.

- [12] 张三亮, 刘荣堂. 荒漠梭梭林大沙鼠为害及不同生境类型对其巢域选择的影响. 草原与草坪, 2008, (5): 11-14.
- [13] Bosso L, Luchi N, Maresi G, Cristinzio G, Smeraldo S, Russo D. Predicting current and future disease outbreaks of *Diplodia sapinea* shoot blight in Italy: species distribution models as a tool for forest management planning. Forest Ecology and Management, 2017, 400: 655-664.
- [14] Jarvie S, Svenning J C. Using species distribution modelling to determine opportunities for trophic rewilding under future scenarios of climate change. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 2018, 373(1761): 20170446.
- [15] Mohammadi S, Ebrahimi E, Shahriari Moghadam M, Bosso L. Modelling current and future potential distributions of two desert jerboas under climate change in Iran. Ecological Informatics, 2019, 52: 7-13.
- [16] Zhang K L, Yao L J, Meng J S, Tao J. Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of two peony species under climate change. Science of the Total Environment, 2018, 634: 1326-1334.
- [17] Sillero N. What does ecological modelling model? A proposed classification of ecological niche models based on their underlying methods. Ecological Modelling, 2011, 222(8): 1343-1346.
- [18] Lawler J L, Shafer S L, White D, Kareiva P, Maurer E P, Blaustein A R, Bartlein P J. Projected climate - induced faunal change in the Western Hemisphere. Ecology, 2009, 90(3): 588-597.
- [19] Wang D, Cui B C, Duan S S, Chen J J, Fan H, Lu B B, Zheng J H. Moving north in China: the habitat of *Pedicularis kansuensis* in the context of climate change. Science of the Total Environment, 2019, 697: 133979.
- [20] 杨楠, 马东源, 钟雪, 杨孔, 周志强, 周华龙, 周材权, 王彬. 基于 MaxEnt 模型的四川王朗国家级自然保护区蓝马鸡栖息地适宜性评价. 生态学报, 2020, 40(19): 7064-7072.
- [21] Mamun M, Kim S, An K G. Distribution pattern prediction of an invasive alien species largemouth bass using a maximum entropy model (MaxEnt) in the Korean peninsula. Journal of Asia-Pacific Biodiversity, 2018, 11(4): 516-524.
- [22] 袁智文, 徐爱春, 俞平新, 郭瑞, 李春林. 浙江清凉峰国家级自然保护区华南梅花鹿栖息地适宜性评价. 生态学报, 2020, 40(18): 6672-6677.
- [23] 马涛, 郑江华, 温阿敏, 陈梦, 刘忠军. 基于 UAV 低空遥感的荒漠林大沙鼠洞群覆盖率及分布特征研究——以新疆古尔班通古特沙漠南缘局部为例. 生态学报, 2018, 38(3): 953-963.
- [24] 马涛, 郑江华, 温阿敏, 陈梦, 穆晨. 基于无人机低空遥感的荒漠林大沙鼠洞分布与地形的关系——以新疆古尔班通古特沙漠南缘局部为例. 林业科学, 2018, 54(10): 180-188.
- [25] 温阿敏, 郑江华, 陈梦, 穆晨, 马涛. 荒漠生态林区大沙鼠鼠洞密度的无人机遥感监测技术初探. 林业科学, 2018, 54(4): 186-192.
- [26] 阿力古恩. 阿拉善荒漠梭梭林大沙鼠防治与危害状况研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.
- [27] 周立志, 马勇, 李迪强. 大沙鼠在中国的地理分布. 动物学报, 2000, 46(2): 130-137.
- [28] 赵天颢. 大沙鼠种群空间分布格局、栖息地选择及种群动态的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2006.
- [29] 杨琳. 新疆准噶尔盆地东南区动物间鼠疫流行趋势的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆医科大学, 2019.
- [30] 张忠兵, 赵天颢, 李新民, 张春福, 齐林. 大沙鼠种群空间分布格局的研究. 动物学杂志, 1997, 32(4): 29-31.
- [31] 刘江, 徐先英, 张荣娟, 丁爱强, 付贵全, 赵鹏. 人工梭梭(*Haloxylon ammodendron*)林大沙鼠(*Rhombomys opimus*)鼠洞空间格局. 中国沙漠, 2017, 37(6): 1180-1188.
- [32] 陈伟, 赵文清, 黄伟, 艾斯卡尔, 韩德礼. 塔里木盆地东南部啮齿动物调查. 地方病通报, 1999, 14(1): 39-40.
- [33] 赵中和, 赵坚, 王文祥, 唐蒙昌, 李平, 潘建军. 内蒙古西部梭梭林大沙鼠的防治. 植物保护, 2003, 29(4): 38-39.
- [34] 刘洋, 石娟. 气候变化背景下埃及吹绵蚧在中国的适生区预测. 植物保护, 2020, 46(1): 108-117.
- [35] Jie W H, Wu T W, Wang J, Li W J, Polivka T. Using a deterministic time-lagged ensemble forecast with a probabilistic threshold for improving 6-15 day summer precipitation prediction in China. Atmospheric Research, 2015, 156: 142-159.
- [36] Liu X W, Wu T W, Yang S, Jie W H, Nie S P, Li Q P, Cheng Y J, Liang X Y. Performance of the seasonal forecasting of the Asian summer monsoon by BCC_CSM1.1(m). Advances in Atmospheric Sciences, 2015, 32(8): 1156-1172.
- [37] 刘攀峰, 王璐, 杜庆鑫, 杜兰英. 杜仲在我国的潜在适生区估计及其生态特征分析. 生态学报, 2020, 40(16): 5674-5684.
- [38] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. Science, 1988, 240(4857): 1285-1293.
- [39] 陈新美, 雷渊才, 张雄清, 贾宏炎. 样本量对 MaxEnt 模型预测物种分布精度和稳定性的影响. 林业科学, 2012, 48(1): 53-59.
- [40] 王茹琳, 李庆, 封传红, 石朝鹏. 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.
- [41] 赵健, 李志鹏, 张华伟, 陈宏, 翁启勇. 基于 MaxEnt 模型和 GIS 技术的烟粉虱适生区预测. 植物保护学报, 2019, 46(6): 1292-1300.
- [42] 张华, 赵浩翔, 王浩. 基于 Maxent 模型的未来气候变化情景下胡杨在中国的潜在地理分布. 生态学报, 2020, 40(18): 6552-6563.
- [43] 赵佳强, 石娟. 基于新型最大熵模型预测刺槐叶瘿蚊(双翅目: 瘿蚊科)在中国的适生区. 林业科学, 2019, 55(2): 118-127.
- [44] 唐继洪, 程云霞, 罗礼智, 张蕾, 江幸福. 基于 Maxent 模型的不同气候变化情景下我国草地螟越冬区预测. 生态学报, 2017, 37(14): 4852-4863.