邓迪,赵泽斌,马媛.基于GIS的柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)分布模型[J].中国沙漠,2020,40(5):74-80.

基于GIS的柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)分布模型

邓 迪[1],赵泽斌[2],马 媛[2]

(1.太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024; 2.中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 基于地理信息系统、生态位理论与组合模型分析影响柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)分布的主要气候因子及适宜生境分布,从而探究未来气候变化对柠条锦鸡儿适宜生境可能的影响,为未来柠条锦鸡儿的保护提供理论依据,并为中国北方干旱区生态治理与恢复提供建议。结果表明:(1)影响柠条锦鸡儿分布的主要因子有最热季降水量、最冷季平均温度、年平均气温、年降水量、第二层土壤pH、表土碳酸钙含量、表土黏土含量、表层土壤有机碳含量;(2)在当前气候情景下柠条锦鸡儿适宜生境主要分布在中国七大沙漠周边;(3)在未来不同的温室气体排放情景下,柠条锦鸡儿的适宜生境均有不同幅度的扩大。在方法层面,本研究证实在干旱区组合模型精度优于单算法物种分布模型,可为未来干旱区物种分布相关研究提供借鉴。

关键词: 空间分析; 柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*); 组合模型; 气候变化; 适宜生境分布

文章编号: 1000-694X(2020)05-074-07　　**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00021

中图分类号: Q948.2　　**文献标志码:** A

0 引言

柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)为豆科锦鸡儿属落叶灌木[1-2],根系发达,适应干旱区环境,具有较高的生态价值。该物种还具有不怕沙埋、耐风蚀等特点,因此具有很好的防风固沙、水土保持作用[3-5]。全株皆可入药,有通经、镇静等效用[1]。目前,关于柠条锦鸡儿的研究集中在其生态生理特性[3-12]、饲用价值[13-15]、群落特点[16-17]及防风固沙特性[18-21]等方面,对地理分布预测缺少研究。

地理信息系统(GIS)是将空间属性数据在计算机空间中合理组织并实现可视化的数据系统,基本功能是对带有属性信息的空间数据的采集、分析、管理以及制图等。物种分布研究旨在以现有物种分布数据及其与环境变量之间的同级关系,预测物种在实际空间上的地理分布,整个分析过程中涉及到地理数据的采集预处理、空间信息建模以及最后模型结果的制图、计算等过程,这些正符合地理信息系统的功能特点,因此GIS技术为物种分布研究提供了良好的计算环境与平台。组合模型概念的提出旨在解决物种分布模型(SDMs)在预测未来气候变化情形下物种分布中造成的误差问题。造成SDMs不准确的因素主要有物种点位数据的记录和搜集不够、物种与环境之间存在的复杂关系,还有模型本身的局限性。在物种分布相关研究中已有大量实证,组合物种分布模型能够减少模型本身以及数据处理过程中的不确定性[22-23]。

柠条锦鸡儿的地理空间分布受全球气候变化的影响显著。准确预测柠条锦鸡儿生长环境适宜性的变化,有利于柠条锦鸡儿物种保护以及合理利用。本文通过对众多文献[1-2,7-9]及数据记录,使用目前最为流行的物种分布单模型集合预报平台BIOMOD2柠条锦鸡儿的地理空间分布以及适宜性生长环境进行分析,选取BIOMOD2中的5种单模型算法[24-25]:广义线性模型(GLM)、广义相加模型(GAM)、推进式回归树(GBM)、随机森林(RF)及

收稿日期:2020-02-03; **改回日期:**2020-04-01
资助项目:山西省自然科学基金项目(2014011001-3);山西省研究生创新项目(2019SY122)
作者简介:邓迪(1994—),女,山西忻州人,硕士研究生,研究方向为GIS。E-mail: dengdisx@163.com
通信作者:赵泽斌(E-mail: zhaozebin@lab.ac.cn);马媛(E-mail: may15@lzu.edu.cn)

MaxEnt模型[26]构建组合物种分布模型，预测未来不同气候变化情景（RCP 2.6、RCP4.5、RCP 6.0以及RCP 8.5）下柠条锦鸡儿2个时间段（2041—2060年，2061—2080年）适宜生长范围地理空间分布，希望能为未来柠条锦鸡儿生态保护以及其可持续利用提供依据。

1　材料和方法

1.1　柠条锦鸡儿的点位数据

共采集到557个柠条锦鸡儿采样点信息（图1），主要来自国家科技基础条件平台（http://www.nsii.org.cn/2017/home.php），通过对数据预处理，剔除不符合要求的采样点，最终以118个采样点参与建模。筛选出的采样点主要分布于陕西省北部毛乌素沙漠周边、山西省全境、河西走廊以及内蒙古中部、新疆北部，零星分布于东北三省。

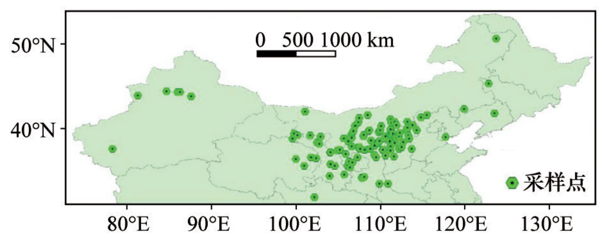

图1　柠条锦鸡儿种群分布

Fig.1　Populations distribution of *Caragana korshinskii*

1.2　环境图层数据说明以及预处理

多种因素影响物种的潜在分布，一般情况下，气候因素是物种分布的主导因子，但干旱区环境条件限制性较高，土壤、地形等因素也会影响小范围植被分布。本文综合考虑上述3类环境因子，共收集了3大类33个环境因子参与模型的构建。其中，气候因子数据采用具有生态学意义的气候环境变量数据Bio（Bioclimatic variables）系列数据（http://www.worldclim.org/）。本研究中，采用30″（1 km^2）的数据进行建模。海拔数据来源于全球气候数据中心；坡度、坡向数据基于海拔数据由ArcGIS软件空间分析功能获取；土壤数据采用通用的HWSD[27]数据，本文一共提取了11个土壤因子参与建模（表1）。

环境因子的共线性会造成物种分布模型构建过程中统计信息的冗余，从而影响建模结果的准确性，因此在建模之前，需要对所有的环境因子进行筛选[28]，以相关系数来检验33个环境因子的共线性。结果表明，在气候因子中，19个因子有较强的共线性。对于相关系数绝对值>0.7的多组环境因子，我们只选择每组中能够表现柠条锦鸡儿适宜生境特征的一个变量参与模型构建。最后选取了AMAT、MDTR、IM、TAR、AP、PCT、PDQ、PWQ及全部的地形因子和土壤因子进行建模。

表1　参与建模的环境要素指标

Table 1　Indicators of environmental elements involved in modeling

环境因子类型	编码	环境因子
气候因子	AMAT	年平均气温
	MDTR	平均日较差
	IM	等温性
	TAR	温度年较差
	AP	年降水量
	PCT	最冷季平均温度
	PDQ	降水量的季节性变化
	PWQ	最热季降水量
地形因子	ASL	海拔
	SLOP	坡度
	ASPE	坡向
土壤因子	T_OC	表层土壤有机碳含量/%
	T_PH	表层土壤pH
	T_CACO3	表土碳酸钙含量/%
	T_CASO4	表土硫酸钙含量/%
	T_ESP	表土碱度/%
	T_ECE	表土盐度/（dS·m^{-1}）
	T_GRAVEL	表土砾石含量/%
	T_SAND	表土含砂率/%
	T_SILT	表土粉沙含量/%
	T_CLAY	表土黏土含量/%
	S_PH	第二层土壤pH

1.3　组合模型构建

本文采用真实技巧统计值（TSS）对模型进行评价，TSS为源于Kappa系数的改良检验指标，TSS定义为模型正确预测存在点与伪存在点的百分比之和与1的差值，因此其值在−1至1之间，当取值大于0.7时，模型模拟结果较好。

首先对单一模型进行筛选，在BIOMOD2和

SDM中的10个模型中选取TSS值大于0.7的模型，分别为推进式回归树模型（GBM）、广义线性模型（GLM）、广义相加模型（GAM）、随机森林模型（RF）、最大熵模型（MaxEnt）。

组合模型构建时，对达到精度要求的5个模型求加权平均。

归一化处理参与建模的5个模型，根据各自的TSS值确定权重：

$$w_j = \frac{r_j}{\sum_{j=1}^{h} r_j} \tag{1}$$

式中：w_j为第j个模型的权重；r_j为第j个模型的TSS值；h为5。

然后利用加权平均构建模型，计算所有栅格的柠条锦鸡儿适宜生境分布指数BT_i：

$$BT_i = \sum_{j=1}^{h} w_j \times x_{ij} \tag{2}$$

式中：BT_i是第i个栅格中柠条锦鸡儿潜在适宜生长环境分布指数；x_{ij}为第j个模型中第i个栅格的值；w_j指第j个模型的权重。BT_i取值0~1，当BT_i越接近于1时，表明此空间分布气候条件更适合柠条锦鸡儿的生长。

典型浓度目标（RCPs），即关于未来气候环境数据科学假设中的新排放场景，由IPCC于2013年发布，包括最低（RCP2.6）、中等（RCP4.5）、较高（RCP6.0）、最高（RCP8.5）4种温室气体排放场景[29]，本研究将这4种情景下的BIO数据代入上述模型计算未来不同气候情景下该物种的适宜生境分布。

2 结果与分析

2.1 同模型精度评价

本研究利用TSS评价模型精度（图2），性能最优的单模型为RF与MAXENT，GAM的精度较差，TSS值为0.82，模型精度最低的是GLM与GBM，TSS值均低于0.8；但组合模型TSS值（0.92）表明，在一定程度上该模型精度优于其他模型。

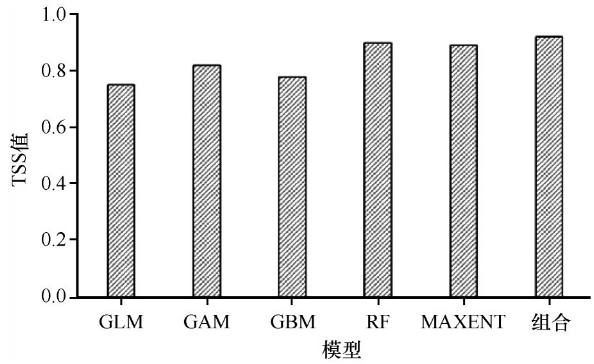

图2 不同模型的TSS值

Fig.2 TSS values for different models

2.2 柠条锦鸡儿当前潜在地理分布

由不同模型对于该物种的分布预测（图3）判断，各个模型在预测柠条锦鸡儿当前潜在地理分布上存在一定的差异。

由GLM模型可知，柠条锦鸡儿的适生区主要分布在中国中北部干旱区。适宜生境和低适宜生境主要包括浑善达克沙地、库布齐沙漠、科尔沁沙地、腾格里沙漠、毛乌素沙地、巴丹吉林沙漠南部、古尔班通古特沙漠西部及南部、河北省张家口市、山西省大部分地区、关中平原及周边、宁夏回族自治区大部，甘肃省内则主要分布于河西走廊中部以及周边地区。与GLM模型相较，GAM模型中，柠条锦鸡儿的适生区减少的区域为科尔沁沙地，增加的低适宜生境区域主要位于古尔班通古特沙漠。GBM模型中，柠条锦鸡儿的适宜生境范围减少的区域为陕西省中部、山西省中部地区（变为低适宜生境）。RF模型中，柠条锦鸡儿的适生范围在各个沙漠中均有不同程度的减少。其中，适宜生境仅有陕西省北部、山西省北部、河北省张家口市、宁夏回族自治区中卫市东部、甘肃省庆阳市北部。低适宜生境分布在甘肃省的张掖市、兰州市、定西市、白银市，新疆克拉玛依塔城市，陕西的关中平原。MAXENT模型中，柠条锦鸡儿的低适宜生境范围在各个沙漠中均有所增加，而适宜生境则在山西南部、陕西中部变为低适宜区域。而在组合模型中，柠条锦鸡儿的适生范围基本涵盖整个黄土高原及北方七大沙漠周边地区。与中国冰川冻土沙漠图[30]进行对比发现，由组合模型得出的柠条锦鸡儿的适生范围更符合北方沙漠的分布情况。

2.3 环境因子

本文共选取了22个因子参与构建柠条锦鸡儿适宜生境分布模型，气候因子是柠条锦鸡儿适宜生境分布的决定性因子。在气候因子中，影响最大的为最热季降水量（PWQ），权重为18.2%，之后依次为最冷季平均温度（PCT，16.8%）、年平均气温（AMAT，13%）及年降水量（AP，10%）；土壤因子中权重

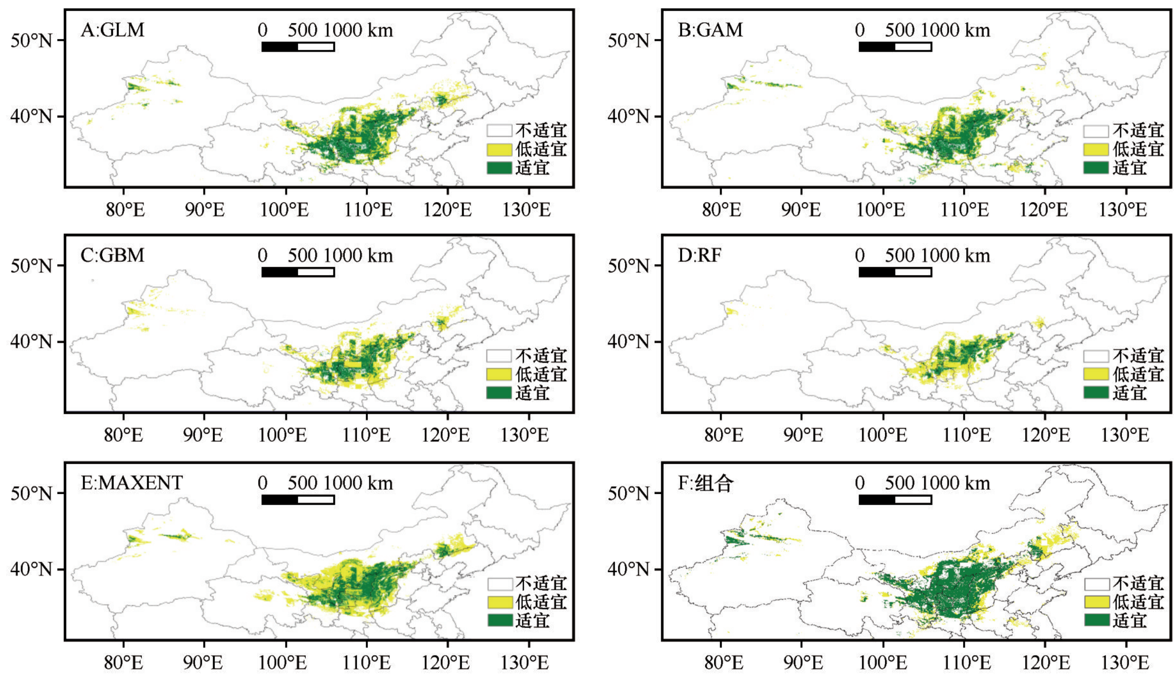

图3　各模型及组合模型预测的柠条锦鸡儿的当前潜在地理分布

Fig.3　The current geographic distribution of *Caragana korshinskii*

较大的依次为第二层土壤pH(S_PH,15%)、表土碳酸钙含量(T_CACO3,10%)、表土黏土含量(T_CLAY,8%)、表层土壤有机碳含量(T_OC,5%)。这8个因子的累计贡献率为96%。利用上述8个影响最大因子和组合模型建立各个因子的响应模型,绘制柠条锦鸡儿地理空间潜在分布概率以及相关气候因子之间的响应关系,进一步计算各主导气候因子的阈值(假设存在概率>0.3)。PWQ为76~305 mm,PCT小于0 ℃,AMAT为50~102 ℃,AP为50~650 mm,S_PH大于7.6,T_CACO3为1%~17%,T_CLAY为3%~35%,T_OC小于1%(图4)。

2.4　气候变化情景下柠条锦鸡儿的分布预测

利用组合模型预测柠条锦鸡儿在不同气候背景下潜在地理空间分布。将柠条锦鸡儿在未来气候环境条件下生长适宜性划分为3类,分类依据为:BT_i 0~0.3为不适宜区,0.3~0.5为低适宜区,0.5~1为适宜区。得到了在不同气候变化情景下,中国北方柠条锦鸡儿潜在地理空间分布范围(图5),结果表明,在未来所有的气候情景下,该物种的适宜生境均将有不同程度的增加。4种气候情景下所预测柠条锦鸡儿在前20年适宜生境面积分别为22.2%、17.6%、15.2%和14.2%;到后20年,研究区内柠条锦鸡儿适宜生境有了不同程度的增加,分别占研究区总面积的21.52%、20.25%、20.97%和22.76%。当前气候环境下柠条锦鸡儿的低适宜生境比例为7.24%,在未来4种气候变化情景下,柠条锦鸡儿低适宜生境面积比例变化范围相对较小(8.54%~11.23%),但在未来4种气候情景下低适宜生境面积比例均有所增加,分别占研究区总面积8.54%、8.76%、9.22%和11.23%(2041—2060年),以及8.69%、9.55%、9.72%和10.11%(2061—2080年)。在不同的气候变化情景下,柠条锦鸡儿的适宜生境和低适宜生境的空间分布范围均由周边向中心集中。内蒙古和甘肃及新疆三省的适宜生境比例增长较快,随着未来气候的变化,低适宜生境与适宜生境的面积都有所增加,但增加量较小。

3　讨论

本研究在GIS技术的支持下,基于5种物种分布模型构建了精度更高(TSS=0.92)的组合模型,并利用该模型对柠条锦鸡儿在当前以及未来不同气候变化情景下潜在空间分布进行了研究,同时分析比较了不同环境因素对柠条锦鸡儿空间分布的影响。但是物种的实际地理分布受到诸多因素限制,如相同生态位物种竞争等生物间相互作用,以及放牧等人类活动影响,本文未能全部涉及。在以后的研究中,可以注意上述影响因子对该物种实际分布

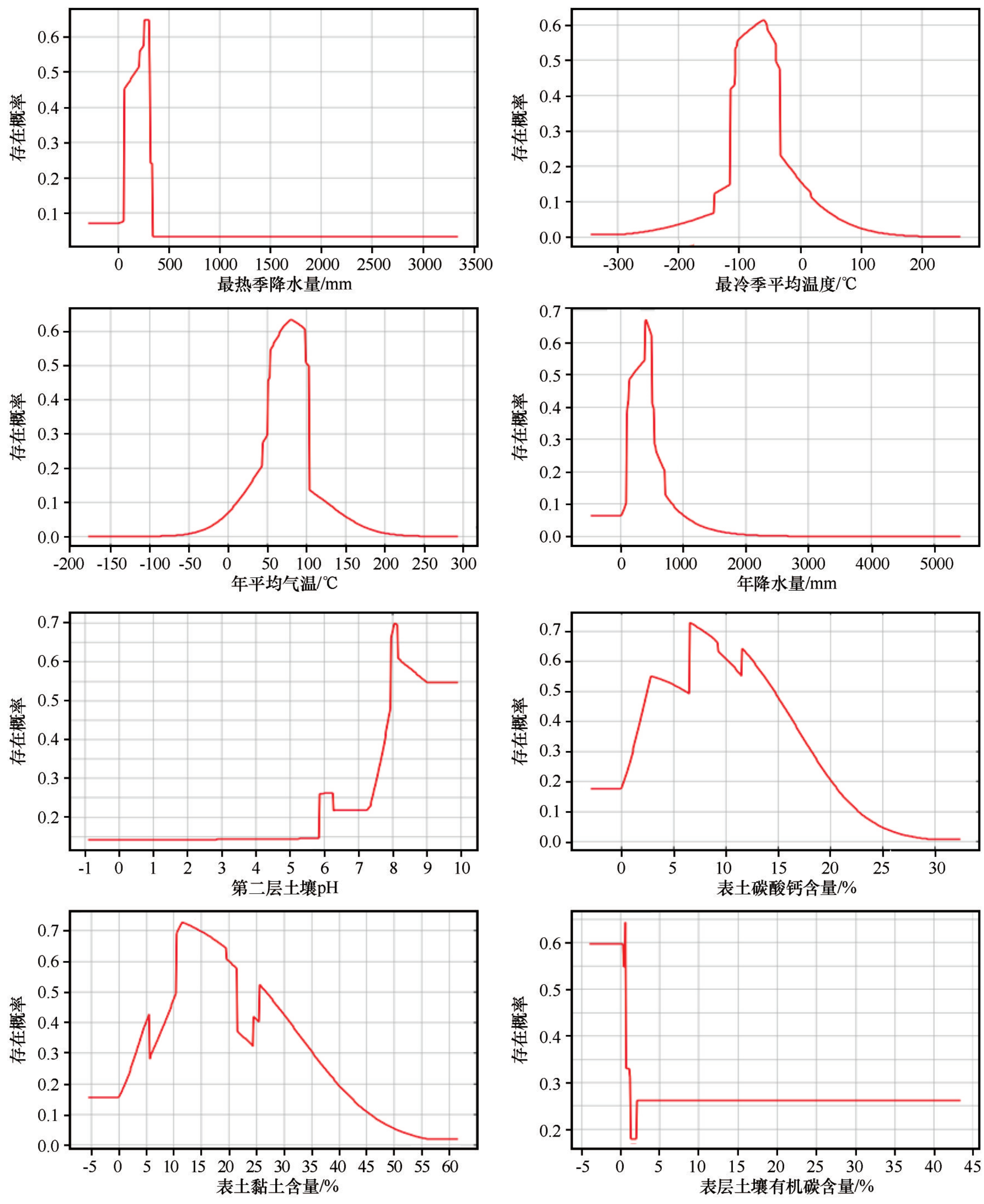

图 4 主导气候因子与柠条锦鸡儿的存在概率关系

Fig.4 Relationship of survival probability between eight dominant climate factors and *Caragana korshinskii*

的影响。

利用组合模型预测了在未来不同气候情景下研究区柠条锦鸡儿潜在地理空间分布。预测结果表明，柠条锦鸡儿的适宜生境面积在未来气候情景下都将有一定程度的增加：北方七大沙漠中部及边缘均有柠条锦鸡儿的适宜生境和低适宜生境，分布范围由周边向中心集中，腾格里沙漠及古尔班通古特沙漠的适宜生境面积增长较快。大量文献记载：柠条锦鸡儿主要分布在沙漠及其周边，这与本研究的结果相符。根据对各气候因子贡献率的结果进行分析，发现降水及土壤数据对柠条锦鸡儿适宜生境空间分布的贡献率达到了96%，这与前人的研究一致[9,17]，也证明了本文构建模型的科学性。

在荒漠生境中，柠条锦鸡儿是一种生态价值很

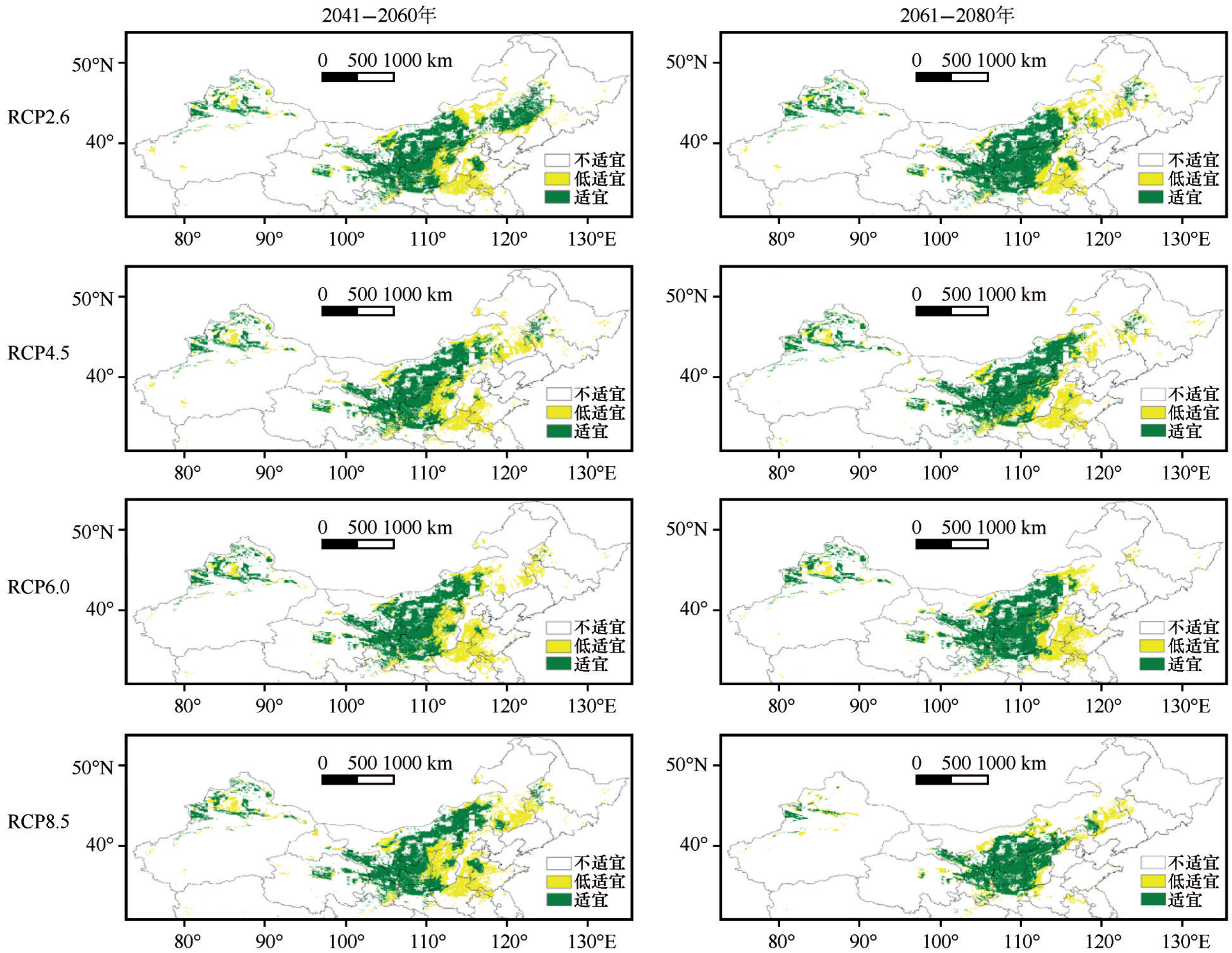

图 5　柠条锦鸡儿在未来气候情景下的适宜生境分布

Fig.5　Suitable habitat distribution of *Caragana korshinskii* in future climate

高的植物，预测其地理空间分布对于水土保持和荒漠化防治具有重要意义。在未来的物种保护以及种植区规划上，应当充分考虑柠条锦鸡儿未来适宜生境的分布区域，辅以有效的人工干预，适当控制柠条锦鸡儿的种群数量，确保其生态价值的可持续利用达到最大化。

参考文献：

[1]　强伟．柠条锦鸡儿种子成分及抗皮肤癣菌活性研究[D]．北京：中国科学院大学，2012.

[2]　马成仓，高玉葆，郭宏宇，等．内蒙古高原西部荒漠区锦鸡儿属（*Caragana*）优势种的形态适应特征[J]．生态学报，2006，26(7)：250–254.

[3]　刘颖，冯金朝，吴亚丽，等．内蒙古和林格尔地区柠条锦鸡儿生化成分分析[J]．干旱区资源与环境，2008，22(9)：159–162.

[4]　周萌．锦鸡儿属响应干旱胁迫的形态适应特征和生理机制的研究[D]．兰州：兰州大学，2016.

[5]　廖空太，严子柱，满多清，等．黑河流域防风固沙林生态效益研究：以甘肃省高台县为例[J]．中国生态农业学报，2007(6)：26–29.

[6]　杨慧玲，梁振雷，朱选伟，等．沙埋和种子大小对柠条锦鸡儿种子萌发、出苗和幼苗生长的影响[J]．生态学报，2012，32(24)：7757–7763.

[7]　贺学礼，陈烝，郭辉娟，等．荒漠柠条锦鸡儿 AM 真菌多样性[J]．生态学报，2012，32(10)：80–88.

[8]　张燕娜，于秀敏，杨杞，等．柠条锦鸡儿 CkLEA4 基因克隆及表达分析[J]．西北植物学报，2014，34(1)：23–30.

[9]　王志会，夏新莉，尹伟伦．不同种源的柠条锦鸡儿的生理特性与抗旱性[J]．东北林业大学学报，2007，35(9)：27–29.

[10]　张烨．柠条锦鸡儿咖啡酰辅酶 A–O–甲基转移酶基因 cDNA 和 gDNA 全长克隆及生物信息学分析[D]．呼和浩特：内蒙古农业大学，2011.

[11]　贾会丽，郭继承，吴欣明，等．柠条锦鸡儿基因的克隆、表达分析及载体构建[J]．华北农学报，2019，34(3)：43–51.

[12]　耿倩倩，杨九艳，李奉时，等．内蒙古高原锦鸡儿属地理替代种植物叶表皮微形态对不同气候环境的适应特征[J]．应用与环境生物学报，2019，25(2)：281–290.

[13]　薛久洲，高晓娟，白艳艳，等．柠条锦鸡儿、梭梭和砂生槐简介及其饲用价值研究进展[J]．畜牧与饲料科学，2018，39(10)：46–49.

[14]　弓剑．柠条叶粉对羊的饲用价值的研究[D]．陕西杨凌：西北农林科技大学，2004.

[15] 高优娜.鄂尔多斯高原锦鸡儿属几个种的营养价值与饲用价值研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2006.

[16] 曹娃,周华荣,史磊.哈密地区白皮锦鸡儿群落特征[J].生态科学,2018(3):27-34.

[17] 周伶,上官铁梁,郭东罡,等.晋、陕、宁、蒙柠条锦鸡儿群落物种多样性对放牧干扰和气象因子的响应[J].生态学报,2012,32(1):111-122.

[18] 邓正正,王阳,王力华,等.锦鸡儿属防风固沙树种的离体培养试验[J].沈阳农业大学学报,2004(3):67-71.

[19] 邬玉明.柠条锦鸡儿平茬复壮技术[J].内蒙古林业科技,2001(增刊1):60-64.

[20] 陈廷珠,李树军,王晋生,等.山西省锦鸡儿蜜源植物分布特点及开花流蜜规律[J].中国蜂业,2014,65(11):29-30.

[21] 廖空太.河西走廊防风固沙林体系结构配置及生态效益研究[D].兰州:甘肃农业大学,2006.

[22] 赵泽芳,卫海燕,郭彦龙,等.人参潜在地理分布以及气候变化对其影响预测[J].应用生态学报,2016(11):3607-3615.

[23] Gael G,Laetitia B,Nicolas C,et al.Ensemble modelling of species distribution: the effects of geographical and environmental ranges[J].Ecography,2011,34(1):9-17.

[24] Huiller W T.BIOMOD-Optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change[J].Global Change Biology,2003,9(10):1122-1130.

[25] Thuiller W,Lafourcade B,Engler R,et al.BIOMOD-a platform for ensemble forecasting of species distributions[J].Ecography,2009,32(3):369-373.

[26] Guo Y L,Li X,Zhao Z F,et al.Modeling the distribution of *Populus euphratica* in the Heihe River Basin, an inland river basin in an arid region of China[J].Science China-Earth Sciences,2018,61(11):1669-1684.

[27] Kumar S K,Lee J H,Lahuerta J J,et al.Risk of progression and survival in multiple myeloma relapsing after therapy with IMiDs and bortezomib: a multicenter international myeloma working group study[J].Leukemia,2012,26(1):149-157.

[28] Ray D,Behera M D,Jacob J.Predicting the distribution of rubber trees (*Hevea brasiliensis*) through ecological niche modelling with climate, soil, topography and socioeconomic factors[J].Ecological Research,2016,31:75-91.

[29] 辛晓歌,吴统文,张洁.BCC气候系统模式开展的CMIP5试验介绍[J].气候变化研究进展,2017(5):70-74.

[30] 王涛.1:400万中国冰川冻土沙漠图[M].北京:中国地图出版社,2006.

Modeling of species distribution with GIS in arid regions: take *Caragana korshinskii* for example

Deng Di[1], Zhao Zebin[2], Ma Yuan[2]

(1.*College of Mining Engineering*, *Taiyuan University of Technology*, *Taiyuan* 030024, *China*; 2.*Northwest Institute of Eco-Environment and Resources*, *Chinese Academy of Sciences*, *Lanzhou* 730000, *China*)

Abstract: With GIS and niche theory and ensemble models (*TSS*=0. 92), we analyzed the main climatic factors influencing the distribution of *Caragana korshinskii*, to learn the suitable habitat distribution of it, probe the influence of climate change on the suitable environment of *C. korshinskii*, and provide theoretical basis and technical support for the protection of *C. korshinskii*. The results showed that: (1) The main factors influencing the distribution of *C. korshinskii* were precipitation in the warmest season, mean temperature in the coldest season, mean annual temperature, annual precipitation, the second soil pH value, calcium carbonate content in the topsoil, clay content in the topsoil, and organic carbon content in the surface soil. (2) Under impacts of climate change, *C. korshinskii* is mainly distributed around 7 deserts. (3) Under impacts of different future greenhouse gas emission scenarios, the habitat of *C. korshinskii* increased by different degrees.

Key words: spatial analysis; *Caragana korshinskii*; ensemble models; climate change; optimum condition distribution