

DOI: 10.5846/stxb202108242369

陈冰瑞, 邹慧, 孟祥红, 王铃茜, 郝秀丽, 康勋, 王臣, 张欣欣. 气候变化对柴胡与狭叶柴胡适生分布的影响. 生态学报, 2022, 42(20): 8471-8482.

Chen B R, Zou H, Meng X H, Wang L X, Hao X L, Kang X, Wang C, Zhang X X. Prediction of distribution pattern and change of suitable areas of *Bupleurum chinense* and *Bupleurum scorzonerifolium* under climate change in China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(20): 8471-8482.

## 气候变化对柴胡与狭叶柴胡适生分布的影响

陈冰瑞<sup>1</sup>, 邹慧<sup>1</sup>, 孟祥红<sup>1</sup>, 王铃茜<sup>2</sup>, 郝秀丽<sup>3</sup>, 康勋<sup>4</sup>, 王臣<sup>1</sup>, 张欣欣<sup>1,\*</sup>

1 哈尔滨师范大学生命科学与技术学院, 黑龙江省野生地道药材种质资源研究中心, 哈尔滨 150025

2 东北师范大学生命科学学院, 长春 130024

3 黑龙江省中医药管理局, 野生药材资源保护中心, 哈尔滨 150000

4 黑龙江省森林植物园, 哈尔滨 150036

**摘要:** 研究气候变化下物种适生区的分布格局与变迁, 对于物种的保护和资源的可持续利用具有重要的理论和实践意义。选取柴胡 (*Bupleurum chinense*) 与狭叶柴胡 (*Bupleurum scorzonerifolium*) 在中国地域内的 381 个有效分布点和 36 个环境因子, 利用 MaxEnt 模型模拟当前以及未来 (2050 和 2070 年) 两种气候情景下 (RCP4.5 和 RCP8.5) 其适生区的分布格局, 并分析了制约其适生区分布的主导环境因子。结果表明: (1) 影响柴胡适生区分布的主导环境因子为最湿月份降水量、最干季度平均温度以及海拔。影响狭叶柴胡适生区分布的主导环境因子为最湿月份降水量、温度季节性变化标准差以及海拔; (2) 当前气候条件下, 柴胡适生区总面积为  $1.4755 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 约占我国国土面积的 15.37%, 中、高度适生区主要分布在陕西南部、山西东部、甘肃东南部、山东中部、河北中西部等地; 狭叶柴胡适生区总面积为  $1.8034 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 约占我国国土面积的 18.78%, 中、高度适生区主要分布在黑龙江西部和东部、内蒙古中部和东北部、河北北部、陕西中部等地。 (3) 未来气候背景下, 两种柴胡总适生区面积呈现增加趋势。柴胡适生区分布质心向东北方向的高纬度地区迁移, 狭叶柴胡适生区分布质心向西部方向的高海拔地区迁移。

**关键词:** 柴胡; 狭叶柴胡; 气候变化; MaxEnt 模型; 环境因子; 适生区分布格局

## Prediction of distribution pattern and change of suitable areas of *Bupleurum chinense* and *Bupleurum scorzonerifolium* under climate change in China

CHEN Bingrui<sup>1</sup>, ZOU Hui<sup>1</sup>, MENG Xianghong<sup>1</sup>, WANG Lingxi<sup>2</sup>, HAO Xiuli<sup>3</sup>, KANG Xun<sup>4</sup>, WANG Chen<sup>1</sup>, ZHANG Xinxin<sup>1,\*</sup>

1 School of Life Sciences and Technology, Harbin Normal University, Heilongjiang Genuine Wild Medicinal Materials Germplasm Resources Research Center, Harbin 150025, China

2 School of Life Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China

3 Wildlife Resources Protection Center, Heilongjiang Administration of Traditional Chinese Medicine, Harbin 150000, China

4 Forest Botanical Garden of Heilongjiang Province, Harbin 150036, China

**Abstract:** It is of great theoretical and practical importance to study the distribution patterns and changes of species suitable geographical distribution areas under the background of climate change for the protection of species and the sustainable use of resources. In this study, 381 effective distribution sites of *Bupleurum chinense* and *Bupleurum scorzonerifolium* in China (excluding duplicate, invalid and cultivated distribution sites) and 36 environmental factors (terrain, soil and climate data) were selected. Based on the data mentioned above, the spatial distribution patterns of the suitable geographical distribution areas, *B. chinense* and *B. scorzonerifolium*, were simulated by the maximum entropy (MaxEnt) model under

**基金项目:** 国家中医药管理局全国中药资源普查项目 (GZY-KJS-2018-004); 全国第四次中药资源普查黑龙江专项 (2018hljzyzyjc-12); 黑龙江省自然科学基金 (C2018038)

收稿日期: 2021-08-24; 网络出版日期: 2022-06-15

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: alanzhangxinxin@163.com

current climate and two climate scenarios (RCP4.5 and RCP8.5) for the future (2050 and 2070), respectively. Meanwhile, the dominant environmental factors that restrict the distribution of these two species suitable geographical distribution areas were analyzed. The results show that (1) Precipitation of wettest period (Bio13) was the most important environmental factor affecting the suitable geographical distribution areas of *B. chinense*, followed by mean temperature of driest quarter (Bio09), and altitude (Elevation). In the same way, precipitation of wettest period (Bio13), temperature seasonality (Bio04), and altitude (Elevation) are the dominant environmental factors that affect the distribution of *B. scorzonerifolium* suitable geographical distribution areas. (2) Under the current climate conditions, the total area of suitable geographical distribution areas for *B. chinense* is  $1.4755 \times 10^6 \text{ km}^2$ , which is account for about 15.37% of the total land area of China. And the middle and high suitable geographical distribution areas are mainly distributed in southern Shaanxi, eastern Shanxi, southeastern Gansu, central Shandong, central and western Hebei, etc. At the same time, the total area of suitable geographical distribution areas for *B. scorzonerifolium* is  $1.8034 \times 10^6 \text{ km}^2$ , accounting for approximately 18.78% of the total land area of China, of which the middle and high suitable geographical distribution areas are mainly distributed in western and eastern Heilongjiang, central and northeastern Inner Mongolia, northern Hebei and central Shaanxi, etc. (3) Under the background of future climate change, the total suitable geographical distribution area of two species of *Bupleurum* both shows an increasing trend. In term of the migration study of suitable geographical distribution geometric center, the suitable geographical distribution geometric center of *B. chinense* will step by step move to the high latitude area in the northeast, while the suitable geographical distribution geometric center of *B. scorzonerifolium* will gradually migrate to the high altitude areas in the west.

**Key Words:** *Bupleurum chinense*; *Bupleurum scorzonerifolium*; climate change; MaxEnt model; environmental factors; distribution pattern of suitable areas

植物的分布和生长与环境条件关系密切。研究物种分布与环境的关系,找出影响其分布的主要环境因子,确定适生区的分布格局,分析未来气候条件下适生区的变迁,已成为生态学、保护生态学、全球变化生物学和生物地理学的研究热点之一<sup>[1-2]</sup>。在大尺度空间上,物种分布格局主要受非生物环境因素(如气候、土壤条件等)的影响,其中,气候是决定植物地理分布格局的最主要因素<sup>[3-4]</sup>。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次评估报告表明,到21世纪末,全球地表平均气温将会升高0.3—4.8℃,降水格局会有明显变化<sup>[5]</sup>。气候变化是21世纪全球生物多样性面临的最主要威胁因素之一<sup>[6]</sup>。气候变化可能会导致物种未来地理分布格局的改变、加剧生物多样性的减少和种质资源的流失,甚至加快物种的灭绝速度<sup>[7]</sup>。因此,开展气候变化下物种适生区分布格局与变迁的研究,弄清物种未来地理分布格局的特征及变化趋势,对物种的保护和资源的可持续利用具有至关重要的作用。

柴胡作为常用清虚热药材,在我国已有两千多年的使用历史,含有皂苷、黄酮、香豆素、木脂素、挥发油等多种化学成分,具有抗病毒、抗肿瘤、抗氧化等作用<sup>[8]</sup>。自古柴胡入药的种类较多,来源也比较复杂。2020版《中国药典》规定柴胡为伞形科植物柴胡(*Bupleurum chinense* DC.)和狭叶柴胡(*Bupleurum scorzonerifolium* Willd.)的干燥根,按性状不同分别习称“北柴胡”和“南柴胡”<sup>[9]</sup>。近些年来,随着国内外市场需求量日益增加,柴胡价格不断上涨,引发了对野生柴胡和狭叶柴胡的超量采挖,资源濒临枯竭,黑龙江、内蒙古、山东等省份对两种柴胡已制定了省级保护制度。目前,栽培品种成为当今商品柴胡的主要来源之一<sup>[10]</sup>。人工种植极大程度上缓解了柴胡药材的供给需求,但其有效成分的含量受种质、环境因子等影响较大,导致质量稳定性差<sup>[11-12]</sup>。当前关于两种柴胡的研究主要集中在化学成分、药理作用、质量评价与栽培技术等方面<sup>[13-15]</sup>,对全国两种柴胡的适生区分布格局及其对气候变化响应的研究鲜有报道。

物种分布模型(Species Distribution Model, SDM)是研究物种与环境因子相关关系的重要工具之一,其中最大熵模型(MaxEnt)因对小样本、少量偏差数据耐受性高等优点而被广泛应用于道地药材生境适宜性划

分<sup>[16]</sup>、气候变化对物种分布的影响<sup>[17-18]</sup>、濒危物种管理与保护等研究<sup>[19]</sup>,并表现出较高的预测能力。本研究以柴胡和狭叶柴胡为研究对象,运用最大熵模型预测当代、未来 2050 年和 2070 年两个物种的适生区分布格局,分析影响其分布的主导环境因子,揭示全球气候变化背景下柴胡与狭叶柴胡适生区分布格局的变化和迁移趋势,旨在为今后柴胡和狭叶柴胡的野生资源保护、优良种质资源保存与利用以及产区布局提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 地理位置数据

柴胡与狭叶柴胡的地理位置数据来源于黑龙江省野生道地药材种质资源研究中心前期的种质资源调查、第四次中药资源普查、全球生物多样性信息平台(<http://www.gbif.org>)、中国国家标本资源平台(<http://www.nsii.org.cn>)和中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.org.cn>)等。将收集到地理位置数据加载入 ArcGIS10.5 软件中,剔除重复、无效及人工栽培的数据。为降低地理位置数据间的空间自相关性并与环境数据空间范围保持一致,对存在于同一个栅格空间范围内的两个位置数据只保留其中一个,最终柴胡与狭叶柴胡用于建模的地理位置数量分别为 260 与 121。

### 1.2 环境数据来源与筛选

本文选用地形(高程)、土壤与气候三类共 36 个环境因子进行研究。地形数据(高程数据)和 19 个气候数据来源于 WorldClim(<http://www.worldclim.org>)。16 个表层土壤数据来源于世界土壤数据库(<http://www.fao.org>),包括表层土壤沙含量(T-Sand)、表层土壤可交换钠盐(T-ESP)等。未来气候数据选择 CCSM4 模式,该模型对气候变量的模拟和预测准确性较高<sup>[20]</sup>。选取 2050 和 2070 年代表全球较低排放情景和高排放情景的 RCP4.5 和 RCP8.5 两种二氧化碳典型浓度路径<sup>[21]</sup>,共涉及 4 种未来气候情景组合方式,分别为:RCP4.5—2050、RCP4.5—2070、RCP8.5—2050、RCP8.5—2070。环境数据空间分辨率为 30",运用 ArcGIS10.5 软件与全国地理信息资源目录服务系统网站(<https://www.webmap.cn>)提供的 2021 版 1:100 万中国行政区划图数据将各环境因子数据进行裁剪。

环境因子间的高相关性容易使 MaxEnt 模型产生过度拟合,因此需对所选择的环境因子进行筛选<sup>[22]</sup>。利用 MaxEnt3.4.4 对所选择的 36 个环境因子进行 10 次运算,建立初始模型。根据 10 次运算的平均结果,剔除贡献率小于 1%的环境因子,并对各因子进行 Spearman 秩相关性分析,对相关性系数绝对值 $\geq 0.8$ 的两个变量依据初始模型运算的结果,保留贡献率较大的环境因子。筛选后用于两个物种建模的环境因子如表 1 所示。

### 1.3 模型的构建与评估

分别将两物种的分布数据与各时期环境因子数据导入 MaxEnt 模型中,设置 75%的分布数据为训练集,剩余的 25%作为测试集,Bootstrap 重复运算 10 次,其余参数选择默认。选择刀切法(Jackknife)确定各环境因子对物种分布的贡献率,同时运用该方法检验各环境因子对两物种分布的影响,得到影响两物种分布的主导环境因子。使用接受者操作特性(receiver operating characteristic,ROC)曲线下面积(area under curve,AUC)对模型预测结果进行检验,其值越接近 1,表明模型精确性越高。AUC 值的评价标准为 0.5—0.6(不及格),0.6—0.7(较差),0.7—0.8(一般),0.8—0.9(良好),0.9—1.0(优秀)。为了保持时间序列上模型的可比性,除气候因子外,土壤因子与地形因子在未来分布模拟中保持不变<sup>[23]</sup>。

### 1.4 适生区划分与空间格局变化的模拟

物种的真实分布状态包括存在和不存在,将连续型的预测结果转换成“适生区”和“非适生区”(即存在与不存在的布尔值(Boolean value)形式时,选择合适的阈值十分关键<sup>[20]</sup>。大量研究表明灵敏度—特异度和最大化的阈值划分方法要优于其他阈值的划分方法<sup>[24]</sup>。本研究将灵敏度—特异度之和最大时所对应的概率值  $P$  作为阈值,物种存在概率  $p \geq P$  作为适生区,物种存在概率  $p < P$  作为非适生区。其中适生区又包括了低度适生区( $P \leq p < 0.5$ )、中度适生区( $0.5 \leq p < 0.7$ )和高度适生区( $p \geq 0.7$ )三类。为估计柴胡与狭叶柴胡的分布对

未来气候变化的响应,对栅格数据进行重分类并通过栅格计算器来计算不同未来气候情景下两种柴胡适生区分布范围的扩张或缩减情况<sup>[25]</sup>。使用 SDMtoolbox2.4 计算适生区分布质心随气候变化迁移的情况<sup>[26]</sup>。

表 1 筛选后环境因子

Table 1 Environmental factors after selected

类型 Type	代码 Code	变量描述 Variable description	物种 Species	
			柴胡 <i>B. chinense</i>	狭叶柴胡 <i>B. scorzonerifolium</i>
气候 Climate	Bio02	昼夜温差月均值	√	√
	Bio03	昼夜温差与年温差比值	√	√
	Bio04	温度季节性变化标准差	√	√
	Bio09	最干季度平均温度	√	—
	Bio10	最暖季度平均温度	—	√
	Bio13	最湿月份降水量	√	√
	Bio14	最干月份降水量	√	—
	Bio15	降水量季变异系数	√	—
	Bio19	最冷季度降水量	—	√
土壤 Soil	T_BS	上层基本饱和度	√	√
	T_Gravel	上层碎石体积分比	—	√
	T_CACO3	上层碳酸盐或石灰含量	—	√
	T_CEC_Clay	上层黏性层土壤的阳离子交换能力	—	√
	T_USDA_TEX	上层 USDA 土壤质地分类	√	√
地形 Terrain	Elevation	海拔	√	√

## 2 结果

### 2.1 模型运算结果评估

基于 260 个柴胡、121 个狭叶柴胡地理位置数据与各自所选环境因子经 MaxEnt3.4.4 软件运算 10 次后所得平均训练 AUC 值分别为 0.931 与 0.932(表 2),达到优秀水平。4 种未来气候情景预测结果的平均训练 AUC 值均在 0.9 以上,说明 MaxEnt 模型运算结果具有很高的精确度和可信度。

表 2 当前和未来 4 种气候情景下的受试者工作特征曲线下面积(AUC)

Table 2 Area under the receiver operating characteristic curve (AUC) under current climate and four future scenarios

物种 Species	年份 Years	气候情景 Climatic scenario	训练 AUC Training AUC	标准差 Standard deviation	
柴胡 <i>B. chinense</i>	当前	—	0.931	0.006	
	2050	RCP4.5	0.932	0.007	
		RCP8.5	0.933	0.005	
		2070	RCP4.5	0.929	0.004
			RCP8.5	0.929	0.003
狭叶柴胡 <i>B. scorzonerifolium</i>	当前	—	0.932	0.006	
	2050	RCP4.5	0.929	0.009	
		RCP8.5	0.929	0.009	
		2070	RCP4.5	0.934	0.008
			RCP8.5	0.933	0.007

### 2.2 影响地理分布格局的主导环境因子

Jackknife 测试了 36 个环境因子对模型预测结果的贡献率,对两个物种分布格局贡献较大的 5 个环境因子(累积贡献率>80%)如表 3 所示。其中,最湿月份降水量(32.4%)对柴胡地理分布贡献率最大,最干季度平

均温度(20.5%)、海拔(18.7%)次之,表明这三个环境因子对柴胡地理分布格局起主导作用;对狭叶柴胡地理分布格局起主导作用的三个环境因子分别为:最湿月份降水量(26.8%),温度季节性变化标准差(24.9%)、海拔(17.6%)。一般认为,当存在概率大于0.5时,对应的环境因子数值适宜物种的生长<sup>[23]</sup>。根据主导环境因子响应曲线(图1),适宜柴胡生存的最湿月份降水量的范围为99.41—213.36mm,最干季度平均温度的范围为-8.91—4.78℃,海拔的范围为105.00—2500.57m;适宜狭叶柴胡生存的最湿月份降水量的范围为75.95—189.17mm;温度季节性变化标准差的范围为1137.14—1731.32;海拔的范围为100.00—1659.40m。

表3 影响两种柴胡适生区分布格局的主要环境因子

Table 3 Main environmental factors affecting the distribution pattern of two kinds of *Bupleurum* suitable areas

物种 Species	代码 Code	变量描述 Variable description	贡献率 Contribution/%	适宜区间 Suitable range
柴胡	Bio13	最湿月份降水量	32.4	99.41—213.36mm
<i>B. chinense</i>	Bio09	最干季度平均温度	20.5	-8.91—4.78℃
	Elevation	海拔	18.7	105.00—2500.57m
	Bio03	昼夜温差与年温差比值	7.6	21.19—31.50
	Bio02	昼夜温差月均值	6.1	7.53—12.93
狭叶柴胡	Bio13	最湿月份降水量	26.8	75.95—189.17mm
<i>B. scorzonifolium</i>	Bio04	温度季节性变化标准差	24.9	1137.14—1731.32
	Elevation	海拔	17.6	100.00—1659.40m
	Bio03	昼夜温差与年温差比值	6.1	17.17—28.41
	T_USDA_TEX	上层 USDA 土壤质地分类 <sup>(1)</sup>	4.7	2、4、5、7、9、10、11

(1)上层 USDA 土壤质地分类:1.黏土(重);2.粉质黏土;3.黏土;4.粉砂黏壤土;5.黏壤土;6.粉沙;7.粉砂壤土;8.砂土;9.壤土;10.砂质黏壤土;11.砂壤土;12.壤砂土;13.沙土<sup>[27]</sup>。

### 2.3 当前气候条件下柴胡和狭叶柴胡适生区分布格局

在当前气候条件下,柴胡适生区主要集中在我国中部和东北部地区,呈带状分布(图2),总面积约为 $147.55 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,约占我国国土面积的15.37%。高、中、低适生区面积分别约为 $34.96 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $34.09 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $78.50 \times 10^4 \text{ km}^2$ (表4)。中、高度适生区主要分布在陕西南部、山西东部、甘肃东南部、山东中部、河北中西部等我国半湿润和湿润区;狭叶柴胡适生区广泛分布于我国北部地区(图2),总面积约为 $180.34 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,约占我国国土面积的18.78%。高、中、低适生区面积分别约为 $35.39 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $69.67 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $75.28 \times 10^4 \text{ km}^2$ (表4)。中、高度适生区主要分布在黑龙江西部和东部、内蒙古中部和东北部、河北北部、陕西中部等我国半干旱及半湿润区。模型预测结果与两种柴胡的地理位置基本一致,进一步表明模型预测结果准确性较高。当前,柴胡和狭叶柴胡中、高度适生区面积之和分别约占国土面积的7.16%和10.90%,由此可见,两种柴胡适生范围较小且集中。

### 2.4 未来气候情景下柴胡和狭叶柴胡适生区动态变化

#### 2.4.1 柴胡适生区分布格局变化

2050年两种气候情景(RCP4.5和RCP8.5)下,柴胡适生区总体呈现下降趋势,下降面积分别约为 $4.11 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $0.83 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,各占当前适生区总面积的2.79%和0.56%(表4)。各等级适生区面积变化表现为:随着碳排放浓度的增加,高度适生区面积呈现出先减少后增加的趋势,在RCP8.5情景下比当前增加了 $3.88 \times 10^4 \text{ km}^2$ ;中度适生区面积则持续增加,增加速率逐渐加快;而低度适生区面积呈现出缩减的趋势,缩减速率逐渐加大(表4)。柴胡适生区扩张较为集中地区为内蒙古东部和东北部、黑龙江西北部、吉林西北部、河北西北部、山西北部,辽宁、山东、重庆、新疆、西藏、甘肃等地也有少量增加。适生区缩减较为集中的地区为黑龙江中西部、吉林中部、甘肃东南部、四川北部和东南部、湖北东北部、河南西北部等地,辽宁、西藏、青海、贵州、浙江等也呈斑块状缩减(图3)。

2070年两种气候情景(RCP4.5和RCP8.5)下,柴胡适生区总体呈现增长趋势,增加面积分别约为 $1.21 \times$

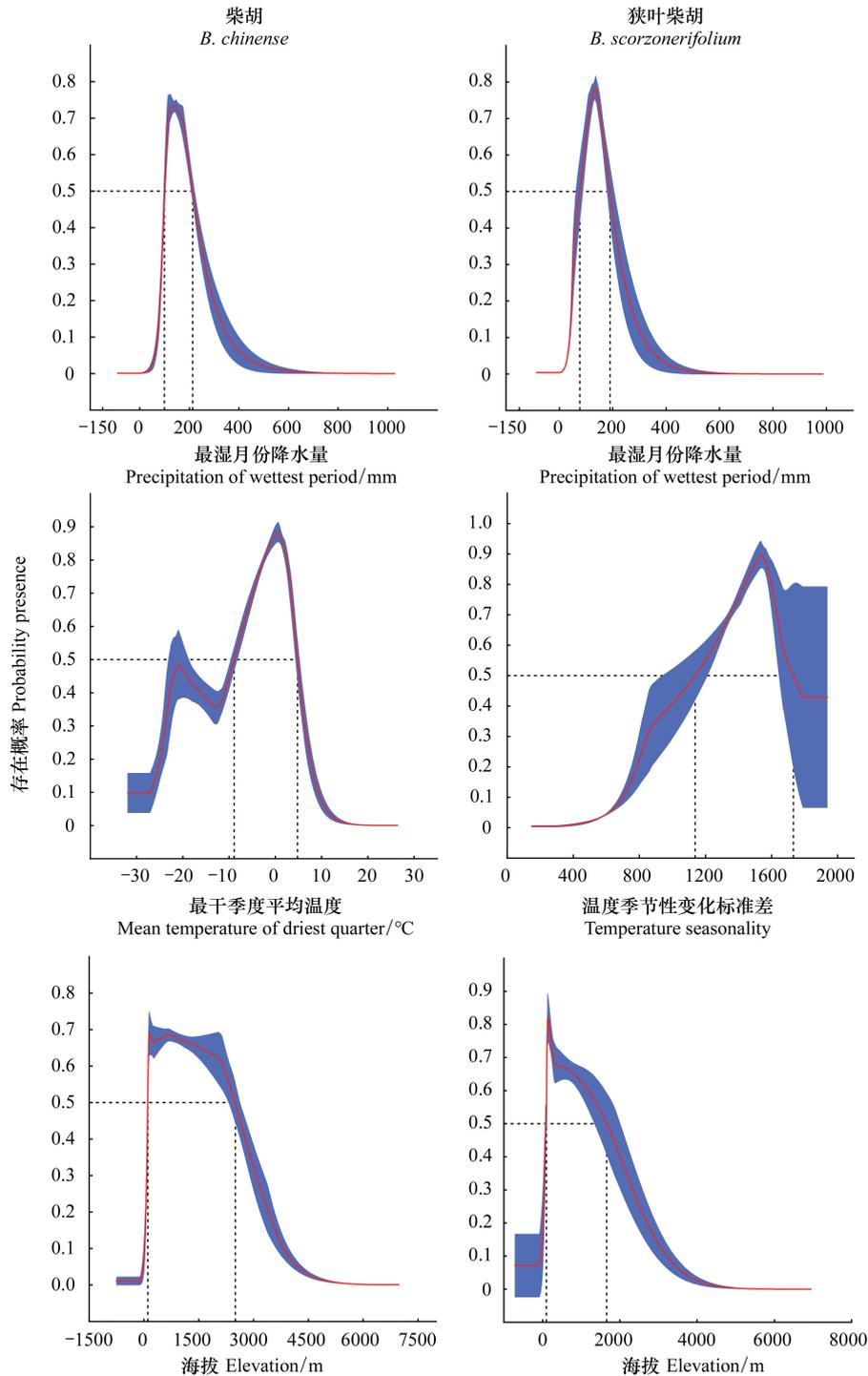


图 1 主导环境因子的响应曲线

Fig.1 Response curve of dominant environmental factors

$10^4\text{km}^2$ 和  $45.07\times 10^4\text{km}^2$ , 分别占当前适生区总面积的 0.82% 和 30.55% (表 4)。各等级适生区面积变化表现为: 随着碳排放浓度的增加, 高度适生区面积呈现出先减少后增加的趋势, 在 RCP8.5 情景下比当前增加了  $21.22\times 10^4\text{km}^2$ ; 中度适生区面积与低度适生区面积则持续增加, 增加速率逐渐加大 (表 4)。2070 年柴胡适生区的扩张和缩减的趋势与 2050 年较为相似, 差别在于: 在 RCP8.5 情景下, 2070 年柴胡适生区面积在黑龙江西北部和东南部及吉林中东部扩张显著, 而在黑龙江中西部与吉林中部地区适生区面积的缩减趋势明显减弱 (图 3)。

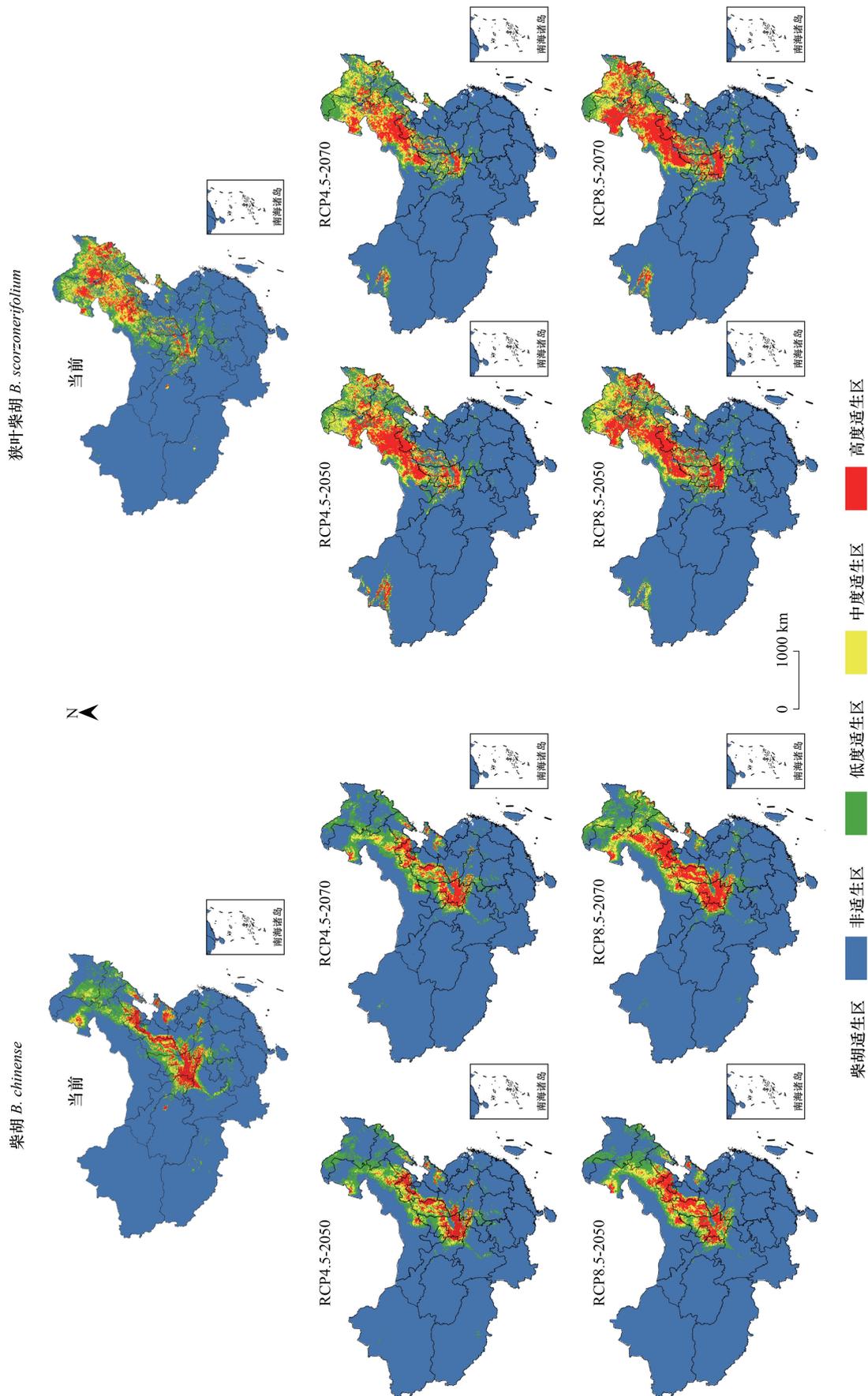


图 2 不同气候情景下两种柴胡适生区的分布格局  
Fig. 2 Distribution pattern of two species of *Bupleurum* under different climate scenarios

表 4 不同气候情景下两种柴胡各等级适生区分布面积与变化

Table 4 Distribution and changes of two species of *Bupleurum* suitable areas under different climate scenarios

物种 Species	年份 Years	气候情景 Climate scenarios	面积 Area/( $\times 10^4$ km <sup>2</sup> )				总变化 Total change
			高度适生区 Highly suitable area	中度适生区 Moderately suitable area	低度适生区 Lowly suitable area	总面积 Total area	
柴胡 <i>B. chinense</i>	当前	-	34.96	34.09	78.50	147.55	-
	2050	RCP4.5	29.82	35.54	78.08	143.44	-4.11
		RCP8.5	38.84	41.61	66.27	146.72	-0.83
	2070	RCP4.5	30.52	37.71	80.53	148.76	1.21
		RCP8.5	56.18	51.91	84.53	192.62	45.07
狭叶柴胡 <i>B. scorzonerifolium</i>	当前	-	35.39	69.67	75.28	180.34	-
	2050	RCP4.5	67.47	74.42	65.84	207.73	27.39
		RCP8.5	74.41	78.62	62.86	215.89	35.55
	2070	RCP4.5	48.61	72.04	71.17	191.82	11.48
		RCP8.5	88.35	70.70	60.06	219.11	38.77

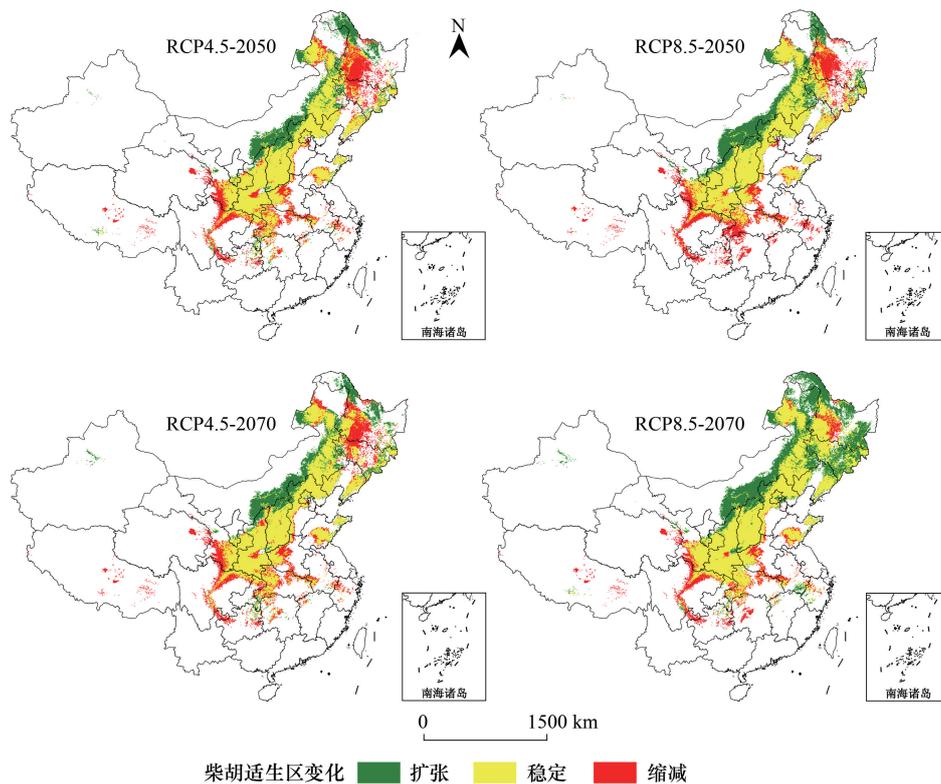


图 3 不同气候情境下柴胡适生区分布格局的变化

Fig.3 Spatial shifts for *B.chinense* under different climatic scenarios

总体上,柴胡在 2050 年适生区面积变化处于较为稳定状态,而 2070 年适生区面积则显著增加,在 RCP8.5 情景下变化最为明显,表明柴胡对高浓度碳排放场景更为敏感。与当前气候条件相比,未来气候背景下柴胡的适生区分布格局呈现出“北扩”与“南缩”的变化趋势,并随着温室效应的加剧,“北扩”趋势更加显著。

#### 2.4.2 狭叶柴胡适生区分布格局变化

2050 年两种气候情景(RCP4.5 和 RCP8.5)下,狭叶柴胡适生区总体呈现增加趋势,增加面积分别约为  $27.39 \times 10^4 \text{ km}^2$  和  $35.55 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,各占当前适生区面积的 15.19% 和 19.71%(表 4)。各等级适生区面积变化表现为:随着碳排放浓度的增加,中、高度适生区面积呈增加趋势,增加速率急剧加快;而低度适生区面积呈减小

趋势(表 4)。狭叶柴胡适生区扩张较为集中地区为黑龙江西北部、内蒙古中部、新疆西北部、甘肃东部、湖北西北部,宁夏、山西、陕西,辽宁、山东等地也有零星增加。适生区缩减较为集中的地区为甘肃东南部、湖北西南部等地,黑龙江、西藏、青海、贵州等也呈斑块状缩减(图 4)。

2070 年两种气候情景(RCP4.5 和 RCP8.5)下,狭叶柴胡适生区总体呈现增加趋势,增加面积分别约为  $11.48 \times 10^4 \text{ km}^2$  和  $38.77 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 分别占当前适生区面积的 6.37% 和 21.50%(表 4)。各等级适生区面积变化表现为:随着碳排放浓度的增加,中、高度适生区面积呈增加趋势;而低度适生区面积则呈现出减小的趋势(表 4)。2070 年狭叶柴胡适生区的扩张和缩减与 2050 年的差别在于:随着碳排放浓度的增加,黑龙江中西部与吉林中部地区适生区面积的缩减趋势明显下降,而甘肃中部、湖南中部适生区面积扩张较大(图 4)。

狭叶柴胡在未来气候背景下适生区面积也呈现增加的趋势,同时在 RCP8.5 情景下适生区增长范围更大,表明其对高浓度排放场景更为敏感。与当前气候条件相比,未来气候背景下狭叶柴胡的适生区分布格局呈现“西扩”与“东缩”的变化趋势,北部和南部的适生区则呈斑块状缩减。

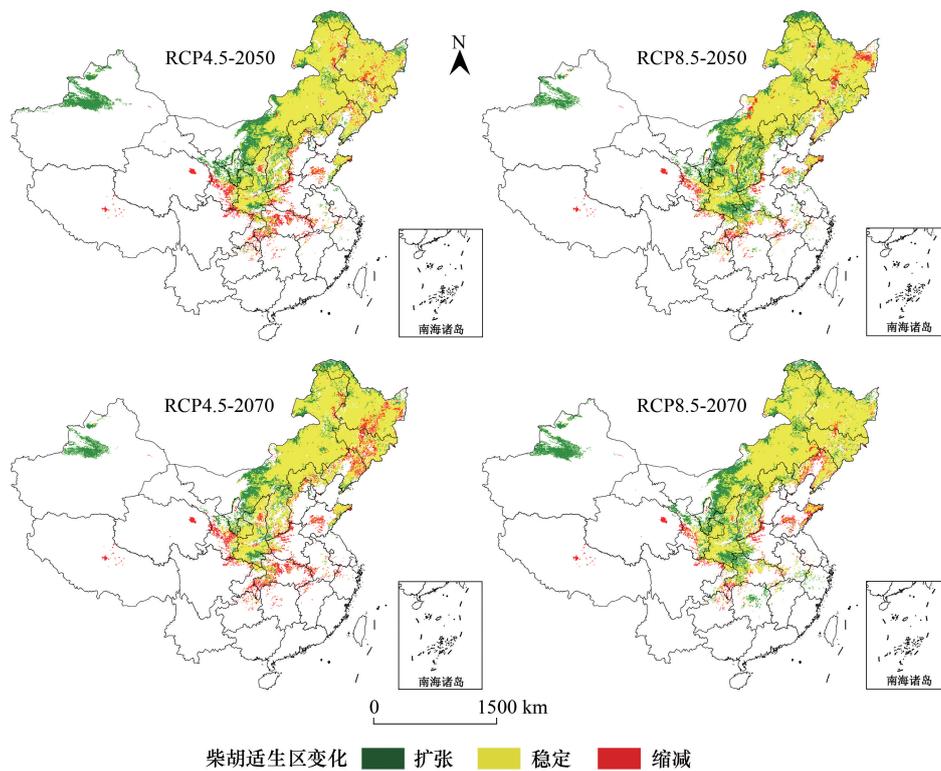


图 4 不同气候情境下狭叶柴胡适生区分布格局的变化

Fig.4 Spatial shift for *B. scorzonerifolium* under different climatic scenarios

#### 2.4.3 不同气候情景下两种柴胡适生区分布质心的迁移

当前,柴胡适生区分布质心位于保定市东北部,坐标为  $39.1^\circ \text{N}, 115.7^\circ \text{E}$ 。在 RCP4.5 气候情景下,2050 年柴胡分布质心向东北方向迁移至北京市西部,坐标为  $40.3^\circ \text{N}, 116.0^\circ \text{E}$ ;2070 年继续沿东北方向迁移至北京市西北部,坐标为  $40.4^\circ \text{N}, 116.1^\circ \text{E}$ 。在 RCP8.5 气候情景下,2050 年柴胡分布质心向东北方向迁移至北京市西南部,坐标为  $39.7^\circ \text{N}, 116.0^\circ \text{E}$ ;2070 年沿东北方向迁移至承德市东北部,坐标为  $41.5^\circ \text{N}, 117.8^\circ \text{E}$ 。由此可以看出,在未来气候背景下,柴胡适生区分布质心向东北方向的高纬度地区迁移(图 5)。

狭叶柴胡当前适生区分布质心位于赤峰市东南部,坐标为  $42.9^\circ \text{N}, 119.2^\circ \text{E}$ 。在 RCP4.5 气候情景下,2050 年狭叶柴胡分布质心向西迁移至赤峰市西部,坐标为  $43.3^\circ \text{N}, 116.8^\circ \text{E}$ ;2070 年向东北方向迁移至赤峰市西北部,坐标为  $43.6^\circ \text{N}, 117.7^\circ \text{E}$ 。在 RCP8.5 气候情景下,2050 年狭叶柴胡分布质心向西南方向迁移至赤峰

市西南部,坐标为 42.8°N,117.3°E;2070 年向西北方向迁移至赤峰市西部,坐标为 42.9°N,116.9°E。由此可以看出,狭叶柴胡在不同气候情景下其分布质心迁移方向存在一定差异,在 RCP4.5—2070 情景下有向东北方向回迁的趋势,但总体呈现向西部高海拔区域迁移(图 5)。

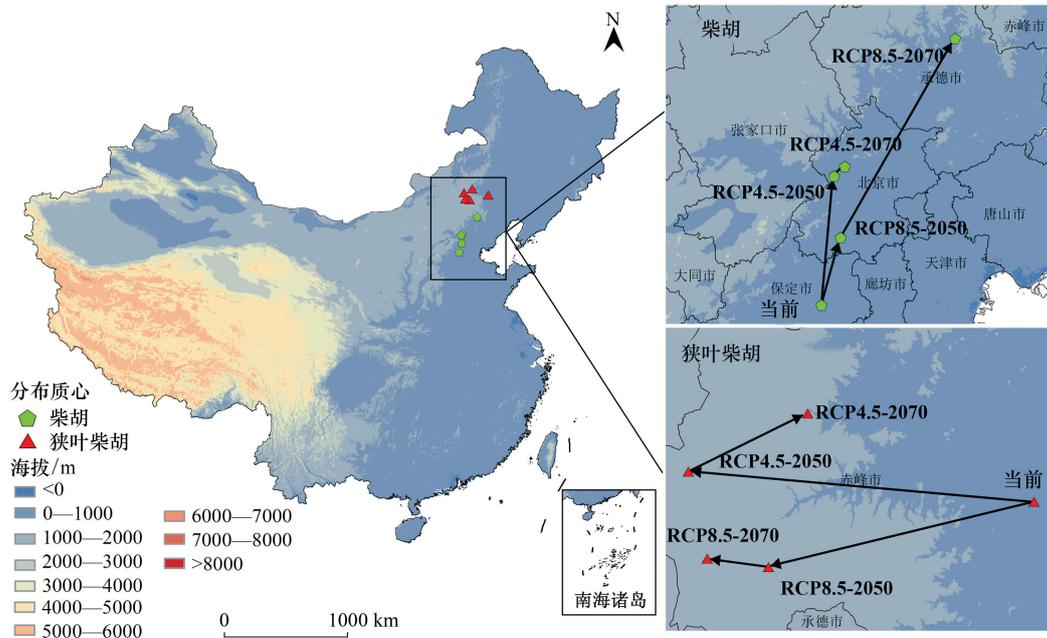


图 5 不同气候情景下两种柴胡适生区质心位置

Fig.5 Centroid position of two species of *Bupleurum* under different climate change scenarios

### 3 讨论

本研究基于 MaxEnt 模型并结合 ArcGIS 空间分析技术,对当前和未来 2 个时期柴胡与狭叶柴胡的适生区分布格局的动态变化进行了预测比较,AUC 精度评价显示模拟结果准确可靠,能够很好地用于两种柴胡地理分布的预测研究。预测结果与前人的调查结果及两种柴胡当前在我国的实际分布高度吻合<sup>[11]</sup>。

#### 3.1 环境因子对两种柴胡适生区分布的制约

综合 Jackknife 检验结果显示气候因素(降雨、温度)是影响两种柴胡分布的主导环境因素,地形因素次之。各环境因子对柴胡与狭叶柴胡存在概率的影响呈现出先促进后抑制的趋势,说明环境因子对两种柴胡存在着一定的负向影响。对于柴胡而言,最干季度平均温度的适宜区间为-8.91—4.78℃,达到约 0.68℃ 以上时,柴胡存在概率呈现下降趋势;最湿月份降水量的适宜区间为 99.41—213.36mm,约 142.5mm 时最适宜其生存。相关研究<sup>[28-30]</sup>指出柴胡抗寒性较强,冬季最低气温低至-41℃ 的情况下也能正常自然越冬,其优质产地的降雨量临界值表现为早春≥30mm,夏秋≤215mm,这与本研究结果高度一致;限制狭叶柴胡地理分布的最湿月份降水量和温度季节性变化标准差适宜范围为 75.95—189.17mm 和 1137.14—1731.32,表明狭叶柴胡适宜生存在气候较为干燥,季节间温度变化较大的生境中,这与前人研究指出狭叶柴胡生于我国偏北地带的环境特点相一致<sup>[31]</sup>。适宜柴胡与狭叶柴胡分布的海拔数值区间分别为 105.00—2500.57m、100.00—1659.40m,这与《中国植物志》<sup>[32]</sup>中的记载基本一致。本研究考虑了土壤因子对两种柴胡分布格局的影响,但研究结果显示用于柴胡和狭叶柴胡建模的土壤因子的总贡献率均低于 10%,可见土壤因子对两种柴胡的分布格局具有一定的影响,但与气候因子相比,其限制作用较小,此结论符合柴胡属植物具有适应性广、抗不良环境及对土壤的选择不严格的地理分布特点<sup>[31]</sup>。两种柴胡的适生区分布范围除了受气候和地形因子影响外,生物间的相互作用、人类活动等因素也会干扰其生存,应用时还需结合当地的实际情况。目前,尚未有能够将所有影

响因子整合到一个模型中来模拟物种潜在分布的技术<sup>[33]</sup>,因此本研究有效地反应了两种柴胡的适生区分布与环境因子的关系,对其种群保护与人工繁育仍然具有重要指导意义。

### 3.2 未来气候背景下两种柴胡适生区分布格局的变化

全球气候变暖可导致物种的地理分布动态变化及适生区范围的改变<sup>[31]</sup>。与当前气候条件相比,柴胡在 2050 年总适生区面积呈现小幅度缩减,但整体变化趋于稳定,而 2070 年总适生区面积则增长幅度较大。2070 年 RCP4.5 情景下总适生区面积扩张缓慢,仅增长了 0.82%,而 RCP8.5 情景下总适生区面积扩张幅度较大,增长了 30.55%,增加区域主要位于内蒙古东部和东北部、黑龙江西北部、吉林西北部、河北西北部、山西北部。柴胡适应性强、耐旱,但其在较长的发芽周期中水分是否充足是影响柴胡发芽的关键因素<sup>[29]</sup>。高浓度排放情景下较高的降水量能降低或者解决降水因子对物种分布的限制,使适生区得以扩张。在低浓度排放情景下增加的降水量不能降低或解决降水因子对物种分布的限制,反而会随着全球变暖导致可供物种吸收的有效水减少<sup>[34-35]</sup>。因此柴胡在 2050 年总适生区缩减的原因可能是因温度升高导致的环境过度干旱而造成的,但随着年份的增长,降雨量逐渐积累使得部分地区变得适合柴胡生存。柴胡适生区分布格局呈现为“北扩”与“南缩”的变化趋势,质心向东北方向的高纬度地区迁移,其原因可能是未来我国西南地区与甘肃等秦岭地区的气温增幅明显、降水量减少,同时东北地区中西部将相对干旱,而其余地区则会相对变湿润所导致的<sup>[36-37]</sup>;在未来气候背景下,狭叶柴胡的适生区显著扩张,增加区域主要位于黑龙江西北部、内蒙古中部、新疆西北部、甘肃东部、湖北西北部,适生区分布格局呈现“西扩”与“东缩”的变化趋势,质心向西部方向的高海拔地区迁移。狭叶柴胡广泛分布于我国北部半湿润及半干旱地区。未来,东北地区中部和南部降水的增加幅度更大<sup>[37]</sup>,半湿润及半干旱的环境可能因此而减少。相比之下,西北干旱半干旱的部分高海拔地区可能随着温度的升高和降雨量的增加而形成半湿润环境,因此随着全球气候的变暖,高海拔地区可能成为狭叶柴胡理想生境。值得注意的是,本研究结果显示柴胡在 2050 年总适生区呈现缩减趋势,2070 年则呈现增长趋势,说明在相同浓度的碳排放场景下物种适生区在不同年份间可能会有不同的变化趋势。因此,单一年份预测的结果可能会影响物种保护、繁育等管理方案的制定,建议采用多时间多气候模式对物种未来分布进行模拟,保证预测结果的准确性与合理性。

未来全球温度的持续升高和降水格局及降水强度的变化,将导致很多植物有向高纬度和高海拔地区迁移的趋势<sup>[38]</sup>,本研究结论与之一致。到 2050 年,在中等气候变暖的情况下,将有 15%—37% 的物种“濒临灭绝”<sup>[35]</sup>。本研究结果显示,两种柴胡适生区面积在未来气候条件下总体呈现出增加趋势,表明未来可能会出现适宜两种柴胡生长的新区域,同时也意味着柴胡与狭叶柴胡不会面临因气候变化所导致的灭绝风险,但柴胡在气候变暖初期会发生适生区面积的小幅度缩减,需注意对其进行及时、有效的保护。两种柴胡未来分别有向高纬度和高海拔地区迁移的趋势,因此,在建立物种保护区和人工栽培时,除考虑当前高度适生区外,还需根据未来气候变化对适生区的影响来制定合理的保护管理方案和规划最佳的种植区域。

## 4 结论

MaxEnt 模型检验 AUC 值均在 0.9 以上,预测结果具有很高的精确度和可信度。当前,柴胡适生区主要集中在我国中部和东北部地区,狭叶柴胡适生区则广泛分布于北部地区。影响两种柴胡分布的主导环境因素为气候与地形,其中最湿月份降水量、最干季度平均温度以及海拔对柴胡的适生区分布格局起着主导作用;限制狭叶柴胡适生区分布的环境因子为最湿月份降水量、温度季节性变化标准差和海拔。在未来气候背景下,两种柴胡的适生区面积总体呈现增加趋势。柴胡适生区向北方高纬度地区迁移,分布格局呈现“北扩”与“南缩”的变化趋势;狭叶柴胡适生区向西部高海拔地区迁移,分布格局呈现“西扩”与“东缩”的变化趋势。因此可根据上述预测结果,有效开展两种柴胡的野生种质资源保护和抚育,促进其种群的恢复。同时,作为我国常用药材,两种柴胡在我国各适生区的引种栽培将缓解野生资源供应量萎缩与市场需求量增加的不平衡。除传统产区外,可根据影响其分布的主导环境因子和未来适生区变化趋势合理规划选址范围,提高品质和产量,推

动柴胡产业发展。

参考文献 (References):

- [1] 徐翔, 许瑶, 谢婷, 孙青青, 田永兰, 张化永. 朝鲜淫羊藿于中国东三省的潜在分布预测. 生态学杂志, 2018, 37(7): 1990-1996.
- [2] 姬柳婷, 郑天义, 陈倩, 钟娇娇, 康冰. 北重楼潜在适生区对气候变化的响应及其主导气候因子. 应用生态学报, 2020, 31(1): 89-96.
- [3] 朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 高玉葆. 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用. 生物多样性, 2013, 21(1): 90-98.
- [4] 曹雪萍, 王婧如, 鲁松松, 张晓玮. 气候变化情景下基于最大熵模型的青海云杉潜在分布格局模拟. 生态学报, 2019, 39(14): 5232-5240.
- [5] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Midgley P M. The physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. 2013
- [6] 冉巧, 卫海燕, 赵泽芳, 张权中, 刘静, 顾蔚. 气候变化对孑遗植物银杉的潜在分布及生境破碎度的影响. 生态学报, 2019, 39(7): 2481-2493.
- [7] 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.
- [8] 欧小龙, 黄涛阳. 柴胡属植物化学成分研究进展. 中药材, 2021, 44(3): 751-757.
- [9] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典—一部: 2020年版 分辑号: 一部. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 293.
- [10] 王玉庆, 牛颜冰, 秦雪梅. 野生柴胡资源调查. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2007, 27(1): 103-107.
- [11] 李晓伟, 王玉庆, 杜国军, 马宏飞, 石凯, 秦雪梅, 邢捷, 张福生. 药用柴胡资源调查及市场现状分析. 海峡两岸暨 CSNR 全国第十届中药及天然药物资源学术研讨会论文集. 兰州, 2012: 185-191.
- [12] 刘照东, 杨林林, 张阳, 韩梅, 林红梅, 杨利民. 不同产地北柴胡中柴胡皂苷含量与土壤因子的关系. 中草药, 2020, 51(20): 5328-5336.
- [13] 林飞武, 王自善, 戎珍, 田春雨, 韩佳, 贺伟丽, 李晓, 秦博, 张燕歌, 刘青, 赵润, 刘佳. 柴胡的药理作用、化学成分及开发利用研究. 亚太传统医药, 2020, 16(10): 202-205.
- [14] 李震宇, 崔伊凡, 秦雪梅. 中药材质量评价的挑战与代谢组学应用于中药材质量评价的研究进展. 中草药, 2018, 49(10): 2221-2229.
- [15] 客绍英, 张胜珍, 王向东, 马艳芝. 柴胡规范化栽培现状与产业发展分析. 河北农业大学学报: 社会科学版, 2020, 22(4): 21-26.
- [16] Wang Y, Zhang L, Du Z X, Pei J, Huang L F. Chemical diversity and prediction of potential cultivation areas of *Cistanche* herbs. Scientific Reports, 2019, 9: 19737.
- [17] Subba B, Sen S, Ravikanth G, Nobis M P. Direct modelling of limited migration improves projected distributions of Himalayan amphibians under climate change. Biological Conservation, 2018, 227: 352-360.
- [18] Bertrand R, Perez V, Gégout J C. Disregarding the edaphic dimension in species distribution models leads to the omission of crucial spatial information under climate change: the case of *Quercus pubescens* in France. Global Change Biology, 2012, 18(8): 2648-2660.
- [19] Li X H, Tian H D, Wang Y, Li R Q, Song Z M, Zhang F C, Xu M, Li D M. Vulnerability of 208 endemic or endangered species in China to the effects of climate change. Regional Environmental Change, 2013, 13(4): 843-852.
- [20] 李文庆, 徐洲锋, 史鸣明, 陈家辉. 不同气候情景下四子柳的亚洲潜在地理分布格局变化预测. 生态学报, 2019, 39(9): 3224-3234.
- [21] Vuuren D P, Edmonds J, Kainuma M, Riahi K, Thomson A, Hibbard K, Hurtt G C, Kram T, Krey V, Lamarque J F, Masui T, Meinshausen M, Nakicenovic N, Smith S J, Rose S K. The representative concentration pathways: an overview. Climatic Change, 2011, 109(1/2): 5-31.
- [22] Peterson A T. Uses and requirements of ecological niche models and related distributional models. Biodiversity Informatics, 2006, 3: 59-72.
- [23] 廖剑锋, 易自力, 李世成, 肖亮. 基于 maxent 模型的双药芒不同时期潜在分布研究. 生态学报, 2020, 40(22): 8297-8305.
- [24] Jiménez-Valverde A, Lobo J M. Threshold criteria for conversion of probability of species presence to either-or presence-absence. Acta Oecologica, 2007, 31(3): 361-369.
- [25] 邱浩杰, 孙杰杰, 徐达, 焦洁洁, 薛敏, 袁位高, 沈爱华, 江波, 李胜. 末次盛冰期以来红豆杉在不同气候变化情景下的分布动态. 生态学报, 2020, 40(9): 3016-3026.
- [26] 李艳红, 张立娟, 朱文博, 张静静, 徐帅博, 朱连奇. 全球变化背景下南方红豆杉地域分布变化. 自然资源学报, 2021, 36(3): 783-792.
- [27] 赵泽芳, 卫海燕, 郭彦龙, 栾文飞, 赵泽斌. 气候变化下的孑遗植物裸果木 (*Gymnocarpus przewalskii*) 适宜生境分布. 中国沙漠, 2020, 40(2): 125-133.
- [28] 丁自勉, 张旭. 柴胡生物学研究进展. 中国野生植物资源, 2005, 24(2): 11-13.
- [29] 路领科. 不同种源柴胡生长特性及品质的比较研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.
- [30] Atabaki Z M, Gherekhloo J, Ghaderi-Far F, Ansari O, Hassanpour-Bourkheili S. Investigating the effects of temperature on seed germination of cutleaf geranium (*Geranium dissectum* L.) and determination of its cardinal temperatures. Phytoparasitica, 2021, 49(1): 143-152.
- [31] 杜景红, 左廷兵, 李凤兰, 胡宝忠. 柴胡属 (*Bupleurum* L.) 植物研究进展. 东北农业大学学报, 2003, 34(3): 352-359.
- [32] 吴征镒. 中国植物志 (英文版) -Flora of China. 北京: 科学出版社, 2005: 60-74.
- [33] 樊信, 盘金文, 何嵩涛. 气候变化背景下基于 MaxEnt 模型的刺梨潜在适生区分布预测. 西北植物学报, 2021, 41(1): 159-167.
- [34] 张华, 赵浩翔, 王浩. 基于 maxent 模型的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.
- [35] 张晓芹, 李国庆, 杜盛. 未来气候变化对沙枣适宜分布区的影响预测. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3213-3220.
- [36] 王颖, 李栋梁. 变暖背景下青藏高原夏季季风变异及其对中国西南气候的影响. 气象学报, 2015, 73(5): 910-924.
- [37] 陶纯苇, 姜超, 孙建新. CMIP5 多模式集合对东北三省未来气候变化的预估研究. 地球物理学报, 2016, 59(10): 3580-3591.
- [38] 鲁客, 贺一鸣, 毛伟, 杜忠毓, 王莉君, 刘国民, 封文佳, 段义忠. 未来气候变化下黑沙蒿在中国的潜在地理分布及变迁. 应用生态学报, 2020, 31(11): 3758-3766.