

DOI: 10.5846/stxb201712102220

魏博, 马松梅, 宋佳, 贺凌云, 李晓辰. 新疆贝母的潜在分布区域及生态适宜性预测. 生态学报, 2019, 39(1): - .

Wei B, Ma S M, Song J, He L Y, Li X C. Prediction of the potential distribution and ecological suitability of *Fritillaria walujewii*. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(1): - .

新疆贝母的潜在分布区域及生态适宜性预测

魏 博¹, 马松梅^{2,*}, 宋 佳², 贺凌云², 李晓辰²

1 石河子大学生命科学学院, 石河子 832000

2 石河子大学理学院, 石河子 832000

摘要: 基于新疆贝母的 62 个自然分布点和 15 个环境因子, 利用 ArcGIS 软件和最大熵模型 (MAXENT), 预测、分析了该植物在基准气候 1961—1990 及 2050 (2041—2060, 基于 RCP2.6 和 RCP6.0 情景) 条件下的潜在适生区、驱动因子及其生态位参数。结果表明: (1) 基准气候下, 新疆贝母的适生区主要集中在阿勒泰地区、准噶尔盆地西部、南部、阿拉山口西南部、伊犁河谷南部及吐鲁番盆地西部地区。其中, 最适宜的分布主要集中在准噶尔盆地西南部、塔城地区和伊犁河谷中部和南部; (2) 新疆贝母在 2050 时段气候情境下的潜在分布范围与基准气候相比, 将分别增加 0.94% 和 0.23%, 新增的潜在生境主要分布在准噶尔盆地西部。但最适生的分布区将在伊犁河谷中部、南部及塔城地区略有减少 (0.42% 和 0.39%); (3) 年平均降水量、最干月降水量、最干季平均气温和海拔主要限制了新疆贝母的潜在分布, 累积贡献率之和达 88.58%; 基准气候下该植物最适宜分布区的生态位参数为: 年平均降水量 248—469 mm, 最干月降水量 3—19 mm, 最干季平均气温 -22.7—-2.0℃, 海拔 1350—2100 m。

关键词: 气候变化; 新疆贝母; 适宜分布; 驱动因子; 生态位参数

Prediction of the potential distribution and ecological suitability of *Fritillaria walujewii*.

WEI Bo¹, MA Songmei^{2,*}, SONG Jia², HE Lingyun², LI Xiaochen²

1 College of Life Sciences, Shihezi University, shihezi 832000, China

2 College of Science, Shihezi University, shihezi 832000, China

Abstract: Based on 62 natural distribution points and 15 environmental factors, we analyzed and predicted the potentially suitable areas, driving factors, and ecological niche parameters determining the distribution of *Fritillaria walujewii* under the reference climate of 1961–1990 and under the predicted climate of 2050 (2041–2060). We based our predictions on RCP2.6 and RCP6.0 scenarios using ArcGIS and the maximum entropy (MAXENT) model. The major results were as follows: (1) under the reference climate, the potentially suitable areas for *F. walujewii* were mainly restricted to the Altai region, western and southern Junggar Basin, southwestern Alashankou, southern Ili River Valley, and western Turpan Basin. Specifically, the most suitable areas were concentrated in southwestern Junggar Basin, Tacheng, and the middle and southern Ili River Valley; (2) the potential distribution of *F. walujewii* in 2050, based on two climate scenarios and compared with the reference climate, will possibly decrease by about 0.94% and 0.23%. The new potential habitats would mainly distributed in the western Junggar Basin. However, the most suitable distributions for *F. walujewii* are predicted to become slightly smaller (by about 0.42% and 0.39%) in the middle and southern Ili River Valley and Tacheng; (3) annual precipitation, precipitation in the driest month, mean temperature in the driest quarter, and altitude were the main limiting factors affecting distribution of *F. walujewii*; the total cumulative contribution of these factors was 88.58%.

基金项目: 国家自然科学基金 (41561007, 41261011); 旱区作物逆境生物学国家重点实验室 (西北农林大学) 开放基金 (CSBAA2015014)

收稿日期: 2017-12-02; **网络出版日期:** 2018-00-00

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

Ecological niche parameters that determine the most suitable areas under the reference climate were: an annual precipitation of 248—669 mm, precipitation in the driest month of 3—19 mm, mean temperature in the driest quarter of -22.7 to -2.0°C , and altitude of 1350—2100 m.

Key Words: climate change; *Fritillaria walujewii*; suitable distribution; driving factors; ecological niche parameters

气候变化影响了世界范围内的许多生态系统及生物类群。未来气候变化可能将加速生物多样性的丧失^[1],威胁物种当前的分布^[2]。基于 ArcGIS 与生态位模型预测物种的潜在分布,可警示科学家和决策者注意未来气候变化将给生物多样性带来的潜在风险,而且能帮助他们提出积极的应对策略以减轻气候变化对生物多样性造成的影响^[1]。药用植物是与人类生活息息相关的重要植物资源,随着市场对中药材需求量的不断增加,日益加剧的人类活动对野生药用植物资源及其自然分布都造成了严重的干扰与破坏^[3]。目前,尤其是一些濒危药用植物的生存、生长正面临着巨大威胁。所以,基于生态位模型预测濒危药用植物在不同气候情景下的潜在适生境及其生态位,不仅利于指导药用植物的异地栽培,还可以为这类植物的科学保护(如建立更时效的保护区)提供具体建议。

新疆贝母(*Fritillaria walujewii*),隶属百合科(Liliaceae),贝母属(*Fritillaria*),为多年生草本,其地下鳞茎具有重要的药用价值^[4]。新疆贝母的自然分布主要集中在新疆阿勒泰、富蕴、托里、塔城、奇台、昌吉、呼图壁、乌鲁木齐、石河子、伊宁、新源、巩留等地^[5]。该植物除具有较高的药用价值与经济价值外,还具有较好的观赏价值^[4]。但是,由于近期人类活动对新疆贝母生境的干扰与破坏,以及对其地下鳞茎的毁灭性采挖,其自然分布面积和蕴藏量正急剧缩减,在低山带已绝迹,中山带仅在灌木丛中零星分布,存量稀少^[6]。新疆贝母已被列为渐危种,新疆 I 级保护植物^[6]。目前,新疆伊犁、昌吉、木垒等地开始了对新疆贝母野生种的驯化种植,但是它的栽培种地下鳞茎较小,产量较低,种植面积有限^[7]。所以,该植物在新疆的潜在分布范围及其在不同地区的适生程度如何?限制其分布的驱动因子及其生态位参数如何?尤其是未来气候变化将对该植物的潜在分布范围和空间分布格局造成怎样的影响?这些科学问题尚不可知,成为对该濒危药用植物进行科学管理、保护与利用的瓶颈。因此,基于 GIS 工具与生态位模型研究气候变化情景下新疆贝母的潜在分布范围与空间分布格局,对于该濒危植物的管理、保护与种植区划都具有重要的现实意义。

进行物种的潜在分布预测时,有多种不同的物种分布模型可供选择^[8]。本研究选择最大熵模型(MAXENT)作为预测工具,因为最近的研究表明该方法具有比其他模型方法更强的区分物种的适生区和非适生区的能力^[9-11]。MAXENT 探索物种已知分布区的环境特征与研究区域的非随机关系,是在满足一定限制条件的情况下找到熵最大的概率分布(即最均匀的分布)作为最优分布,用于物种的适生区预测。而且,MAXENT 是在 0—100 的连续尺度上预测每一个栅格的生境适生值,可以较好地地区分物种在不同地区的适生程度。目前,由于 MAXENT 模型的预测准确性较好,已被广泛应用于预测外来入侵种的危害^[12]、濒危物种的保护^[10,13-14]、植物病害的适生性预测^[15]、濒危动物的潜在分布研究^[16]、植物病菌爆发的预测^[17],以及药用植物潜在适生生境的识别^[18-19],并显示出了较好的应用前景。

本研究基于 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)第五次排放报告的新情景:典型浓度路径 RCP(Representative concentration pathways) 2.6(低排放情景)和 RCP6.0(中等排放情景)获得的气候因子数据,以及海拔和世界土壤数据库获得的土壤因子数据,结合新疆贝母的自然分布数据,利用最大熵模型和 ArcGIS 工具估计基准气候和未来气候条件下,该濒危药用植物在新疆的潜在分布范围、空间格局及其变化。旨在解决以下科学问题:(1)基准气候下新疆贝母在新疆的分布潜力;(2)未来气候变化对新疆贝母的适宜分布范围、空间格局将造成的影响;(3)限制新疆贝母分布的关键环境因子和生态位参数。本研究将为新疆贝母的管理、保护和种植区划提供有利的指导。

1 数据来源与处理

1.1 分布数据获取与处理

新疆贝母的自然分布数据,主要来源于已发表的文献^[5],中国珍稀濒危药用植物资源调查^[7],中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.org.cn/>),以及中国自然保护区资源平台(<http://www.papc.cn/>)。共收集到 118 个自然分布点,基本覆盖了该植物在新疆的自然分布区。对已获取到的分布点,删除了描述不够具体以及经纬度重复或相似的分布点。最终,整理获得 62 个具有准确分布信息的自然分布点,用于本研究的模拟。

1.2 环境数据来源与处理

本研究共选取 37 个环境因子。其中,19 个生物气候变量和海拔数据来源于全球生物气候数据库(<http://www.worldclim.org>,空间分辨率 30 s);17 个土壤因子数据来源于世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database, HWSD,空间分辨率 30 s)。HWSD 数据库包括上层土壤(0—30 cm)的数据、有机碳含量和土壤 pH 值。基于 HWSD 数据库,利用 ArcGIS 特定属性字段查询工具提取各土壤属性数据,基于空间插值方法生成土壤数据图层。

2 研究方法

2.1 模型数据处理

为了避免所用的各环境因子之间的共线性,本研究利用 MAXENT 的刀切法将 37 个环境因子按贡献率大小进行排序,选取了 15 个累积贡献率之和>90%的环境因子,包括 9 个生物气候变量、5 个土壤变量和海拔数据(表 1),用于最终的模型模拟。

利用生物地理信息系统软件 DIVA-GIS7.5 随机选取大概 75%的分布点用于训练模型,剩余的约 25%的分布点用于验证模型的模拟效果,设置 10 次重复,其余的参数设置参照已发表的研究^[10]。对不同气候情景下的 10 次重复结果,都分别利用 ArcGIS 求均值作为模型的最终模拟结果^[10],基于阈值选择进行适生等级划分和可视化表达。并利用 ArcGIS 空间分析工具提取不同气候下适宜分布区和最适宜分布区内各关键因子的生态位参数,包括最小值、最大值和平均值。

表 1 本研究所用的环境因子
Table 1 Environmental factors used in this study

环境因子 Environmental factors	描述 Description	环境因子 Environmental factors	描述 Description
Bio 6/℃	最冷月最低气温 Min temperature of coldest month	Bio 19/mm	最冷季降水 Precipitation of coldest quarter
Bio 7/℃	气温年较差 Annual temperature range	t_gravel	碎石百分比 Percentage of gravel
Bio 9/℃	最干季平均气温 Mean temperature of driest quarter	t_oc	有机碳含量 Organic carbon
Bio 12/mm	年平均降水量 Annual precipitation	t_pH	土壤 pH 值 Soil pH
Bio 14/mm	最干月降水量 Precipitation of driest month	t_sand	含沙量 Sand content
Bio 15	降水季节性 Precipitation seasonality (CV)	t_clay	粘土含量 Clay content
Bio 17/mm	最干季降水量 Precipitation of driest quarter	Alt/m	海拔 Altitude
Bio 18/mm	最热季降水 Precipitation of warmest quarter		

2.2 模型结果评价与阈值选择

利用 ROC (receiver operating characteristic) 曲线下方面积 AUC 值^[20]和 Kappa 值^[21]检验模型的模拟效果。AUC 和 Kappa 的取值范围分别为 0—1 和-1—1。两种评价指标都是值越大表示模型的判断力越强,值为 1 是理想情况,表示模型预测的分布区与物种的实际分布区完全吻合;值>0.5,表示模型的模拟效果好于随机^[10]。而且,AUC 值≥0.9 和 Kappa 值≥0.85 都表示模型的模拟结果可信,可以较为准确的反映物种的潜在

分布^[10]。

本研究选取阈值进行适宜性划分的方法是:利用 ArcGIS 空间分析工具计算所有已知分布点在潜在分布图上的适宜性,并计算这些值的标准差 σ 和平均值 μ ,选择 $p=\sigma-\mu$ 作为阈值,区分“适宜分布区”和“不适宜分布区”;选择 $p=\sigma+\mu$ 作为阈值,区分“适宜分布区”和“最适宜分布区”^[22]。

3 结果与分析

3.1 潜在适生区预测及适宜性等级划分

基于 AUC 和 Kappa 值评价的不同气候下新疆贝母的预测模型都具有较高的准确性(表 2)。具体说,在基准及 2050 (2041—2060) 时段两个情景下,模型模拟结果验证的 AUC 值均大于 0.970 (标准差 $SD \leq 0.012$), Kappa 值均大于 0.854 (标准差 $SD \leq 0.014$),说明模型模拟的准确性较高,且不同模型重复之间的稳定性较好,说明本研究模拟的新疆贝母的潜在适生区域及生态适宜性区划都具有较高的准确性和可信度。所以,本研究计算不同气候情景下模型阈值的均值,作为划分新疆贝母潜在分布区适宜性等级的最终阈值,将新疆贝母潜在分布的适宜性划分为 3 个等级: $P \leq 32.01$,不适宜分布; $32.01 < P \leq 66.37$,适宜分布; $P > 66.37$,最适宜分布(表 2)。

表 2 模型在不同气候下的 AUC 值、Kappa 值和阈值

Table 2 AUC values, Kappa values, and the used thresholds of distribution models under different climatic conditions				
气候变化情景 Climate change scenarios	AUC 值 AUC values	Kappa 值 Kappa values	阈值 Thresholds	
			适宜 Suitable	最适宜 Most suitable
1961—1990	0.970±0.012	0.854±0.012	31.98	66.53
2050RCP (2.6)	0.979±0.010	0.869±0.011	32.04	66.42
2050RCP (6.0)	0.977±0.011	0.874±0.014	32.02	66.16

AUC (Area under the curve): 曲线下方面积; RCP (Representative concentration pathways): 典型浓度路径

因此,新疆贝母的适宜分布区主要集中在阿勒泰地区、准噶尔盆地西部和南部、阿拉山口西南部、伊犁河谷南部到吐鲁番盆地西部地区(图 1)。其中,最适宜的分布主要集中在准噶尔盆地西南部、伊犁河谷南部和塔城地区,具体主要包括塔城、额敏、裕民、托里、博乐、温泉、精河、乌苏、霍城、伊宁、尼勒克、沙湾、察布查尔、昭苏、特克斯、巩留、新源以及和静县。

不同气候情境下,新疆贝母总的适宜分布面积与基准气候相比,将在阿勒泰东南部及准噶尔盆地东部略微增加(0.94%和 0.23%)(表 3)。但是,最适生的分布面积将略有减少(0.42%和 0.39%),减少的分布主要集中在昭苏县南部、霍城县和伊宁县中部、温泉县西部、博乐西南部、塔城西南及额敏县中部地区。

表 3 不同气候下新疆贝母不适生区、适生区、最适生区的面积占新疆面积的比例(%)

Table 3 The areas proportion in the unsuitable distributions, suitable distributions and the most suitable distributions of *Fritillaria walujewii* to the total areas of Xinjiang under different climate conditions

适生等级 Suitable grade	气候变化情景 Climate change scenarios		
	1961—1990	2050RCP (2.6)	2050RCP (6.0)
不适生区 Unsuitable distribution areas	84.45	83.93	84.09
适生区 Suitable distribution areas	12.20	13.14	13.37
最适生区 Most suitable distribution areas	3.35	2.93	2.54

另外,本研究还选取了未来气候情境下新疆贝母分布面积较多且相对基准气候面积变化较为明显的几个县域,进一步分析了气候变化下该植物不同适生等级的面积比例及其变化(表 4, 5)。未来气候(基于 RCP2.6 和 RCP6.0 情景)与基准气候相比,新疆贝母在博乐、额敏、托里和昭苏地区的最适宜分布面积将明显减少,减少比例平均为 0.22%和 0.45%。4 个地区相比,该植物在昭苏县的减少比例较明显,平均为 0.12%;其次是博乐市,减少比例为 0.11%。未来气候下,新疆贝母在布尔津、富蕴、阿勒泰和奇台的适宜分布面积均呈增加

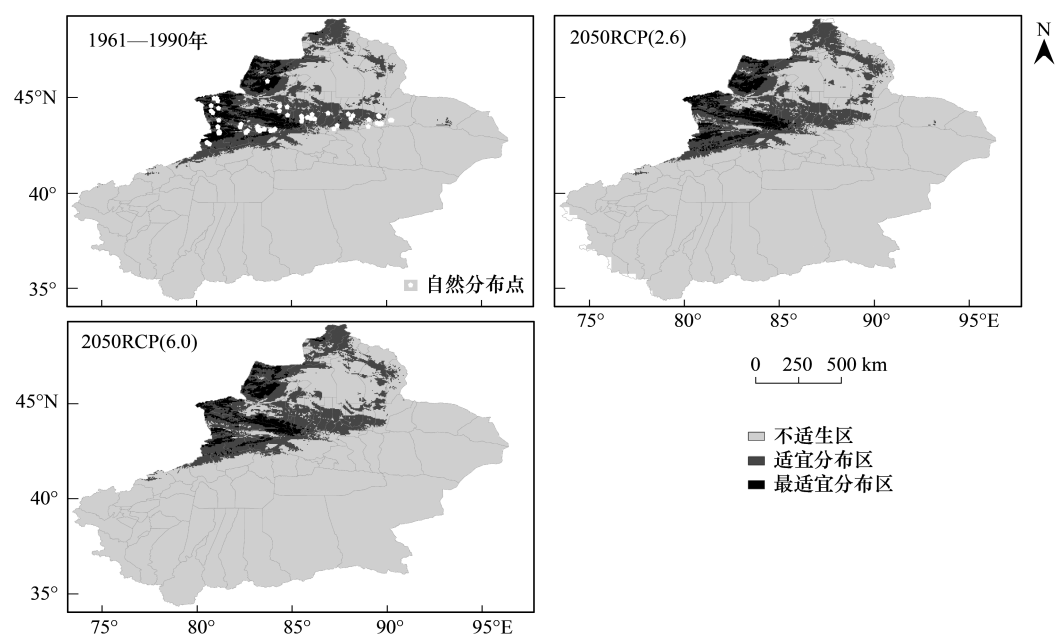


图 1 不同气候情境下新疆贝母的潜在分布

Fig.1 Potential distributions of *Fritillaria walujewii* under different climatic scenarios

趋势(表 5)。其中,在阿勒泰和富蕴的增加比例较明显,分别达 0.14%和 0.15%。而且,不同气候下,新疆贝母在布尔津的适宜分布面积最大,平均为 0.60%;其次为富蕴县,平均为 0.43%,再次是阿勒泰和奇台。

表 4 不同气候下新疆贝母最适宜分布的面积比例(%)

Table 4 The areas proportion in the most suitable distributions of <i>Fritillaria walujewii</i> under different climate conditions							
地区 Regions	1961—1990	2050RCP(2.6)	2050RCP(6.0)	地区 Regions	1961—1990	2050RCP(2.6)	2050RCP(6.0)
博乐市	0.17	0.13	0.08	托里县	0.46	0.40	0.39
额敏县	0.20	0.17	0.14	昭苏县	0.31	0.22	0.16

表 5 不同气候下新疆贝母的适宜分布区的面积比例(%)

Table 5 The areas proportion in the suitable distributions of <i>Fritillaria walujewii</i> under different climate conditions							
地区 Regions	1961—1990	2050RCP(2.6)	2050RCP(6.0)	地区 Regions	1961—1990	2050RCP(2.6)	2050RCP(6.0)
阿勒泰市	0.14	0.34	0.22	富蕴县	0.33	0.51	0.45
布尔津县	0.57	0.58	0.64	奇台县	0.17	0.18	0.20

3.2 影响潜在分布的驱动因子

不同气候情境下,控制新疆贝母潜在分布的关键因子及其贡献率都比较一致,主要包括:年平均降水量、最干月(一年中月降水量最小的月份)降水量、最干季(一年中连续三个月月平均降水量之和最小的季度)平均气温和海拔,累积贡献率之和达 88.58%(SD=±24.62%)。其中,不同气候下 4 个因子的平均贡献率分别为 39.03%(SD=±12.06%)、36.35%(SD=±13.26%)、9.16%(SD=±4.23%)和 4.03%(SD=±1.95%)。所以,降水因子,包括降水的平均条件、极端条件对新疆贝母的潜在分布起决定性作用,平均累积贡献率之和达 75.81%。另外,温度因子和海拔对新疆贝母的潜在分布也略有影响,累积贡献率为 2.47%。

3.3 影响潜在分布的生态位参数

新疆贝母的最适宜分布区和适宜分布区相比,各驱动因子的变化范围都表现出缩小的趋势,说明该植物对环境因子的变化具有较高的敏感性,这可能也是其自然分布区较窄和野生资源分布较少的原因之一(表 6)。

具体说,基准气候下,年平均降水量和最干月降水量在适宜分布区的均值略低于最适宜分布区,而二者的数值变化范围前者略大于后者。RCP(2.6)情境下,适宜分布区的年平均降水量和海拔的均值均显著低于最适宜分布区(269.73 mm 和 349.19 mm, 1809.02 m 和 1995.48 m),但二者的数值变化范围均大于最适宜分布区(表 6)。而最干季平均气温在适宜区的均值和范围都高于最适宜区(均值相差 3.5℃ 左右)。RCP(6.0)情境下,适宜和最适宜分布区相比,年平均降水量,最干月降水量和最干季平均气温的均值和范围都相差不大,而海拔的均值前者高于后者(相差 221.23 m)。综上,基准气候及 2050 时段的两个气候情景下,随着适宜性等级增加,新疆贝母的年平均降水量和海拔都表现出均值升高,数值变化范围收缩的趋势;最干月降水量的均值和范围均相差不大,而最干季平均气温的均值和范围都将减小。

未来气候与基准气候相比,在新疆贝母的潜在分布区,年平均降水量的均值将平均增加约 24.65 mm,最干季平均气温的均值将平均降低约 1.67℃,而海拔的均值将平均升高约 444.52 m(表 6)。可以看出,2050 时段,新疆贝母潜在分布区的生境将呈现出高湿、低温、高海拔的趋势。根据本研究,基准气候下,新疆贝母最适宜分布区主导因子的生态位参数为:年平均降水量 248—469 mm,最干月降水量 3—19 mm,最干季平均气温 -22.7—-2.0℃,海拔 1350—2100 m。

表 6 不同情境下新疆贝母适宜、最适宜分布区的生态位参数

Table 6 Ecological niche parameters of the suitable and the most suitable distribution areas of *Fritillaria walujewii* under different climate conditions

适生等级	气候情境	环境因子 Environmental factors				
Suitable grade	Climate scenarios		Bio12	Bio14	Bio9	Alt
适生区	1961—1990	变化范围	118—494	2—20	−27.5—24.9	720—2833
Suitable distribution		均值	290.92	11	−11.31	1732.76
areas	2050RCP(2.6)	变化范围	124—461	2—18	−28.6—19.2	765—2960
		均值	269.73	10	−11.11	1809.02
	2050RCP(6.0)	变化范围	276—486	3—20	−23.4—−13.3	860—3833
		均值	333.46	11.5	−13.58	2527.01
最适生区	1961—1990	变化范围	248—369	3—19	−22.7—−2.0	1350—2100
Most suitable		均值	299.73	11.5	−11.77	1696.86
distribution areas	2050RCP(2.6)	变化范围	267—494	3—18	−23.9—−2.1	1260—2822
		均值	349.19	10.5	−14.55	1995.48
	2050RCP(6.0)	变化范围	270—469	3—20	−23.4—−3.6	1568—3080
		均值	327.55	11.5	−13.61	2305.78

4 结论与讨论

(1) 本研究利用 MAXENT 模型准确地预测了不同气候下药用植物新疆贝母在新疆的潜在分布范围与生态适宜性,并量化了该植物的生态位要求(图 1,表 6)。基准气候下,新疆贝母的潜在分布主要集中在新疆天山、塔城及阿勒泰地区,以及在准噶尔盆地北部的少量破碎化的适生生境(图 1)。该植物最适宜的分布主要集中在塔城地区及伊犁河谷中部地区,这也与对新疆贝母已开展的资源调查结果一致^[5]。本研究模拟的该植物在新疆的分布范围主要集中在北疆地区,分布面积远高于南疆,这也与该植物的已知分布范围一致^[5]。具体说,新疆贝母的适宜分布区主要集中在阿勒泰市、布尔津县、富蕴县、伊犁、昌吉、木垒、阜康、和静、温宿、沙湾、玛纳斯县等地,最适宜分布区主要集中在塔城、托里、昭苏、裕民、额敏、温泉、博乐、霍城、伊宁、特克斯、尼勒克、巩留、克拉玛依等地(图 1,表 4,表 5)。目前,只在昌吉、木垒等地开始了对该药用植物的驯化种植^[7],但人工种植产量低,未能大范围推广种植。本研究基于模型结果划分的该植物的最适宜分布区,可以作为新疆贝母推广种植的最佳潜力区,也可以指导该植物自然保护区的建立。

(2) 在大的研究尺度上,气候是决定物种分布的基础性决定因子^[23]。本研究中,降水的平均条件和极端

条件,主要限制了新疆贝母的潜在地理分布。基准气候下,新疆贝母最适宜分布区的年平均降水量的均值为 299.73 mm,变化范围为 248—469 mm;最干月降水量的均值为 11.5 mm,变化范围为 3—19 mm(表 6)。而 2050 时段相对基准气候,新疆贝母适宜和最适宜分布区的年平均降水量的均值及变化范围总体都呈增加趋势。新疆贝母是一种喜湿润耐寒冷的植物^[24],2050 时段,该植物总的适宜分布范围相对基准气候也将略有增加(图 1)。而且,该植物的新增分布区将向东、向北迁移(图 1),新增分布区的生境特点将呈现出高湿、低温和高海拔(表 6)。未来气候下,其他物种的分布范围也将表现出向高纬度和高海拔地区迁移的趋势^[25]。具体说,在未来气候情景下,新疆贝母在阿勒泰东南部及准噶尔盆地东部的适宜分布区将略微增加(表 3,表 5)。已有研究也表明未来气候情景下新疆准噶尔盆地和阿勒泰地区的降水量将有显著增加的趋势^[26]。

(3)未来气候情景下,新疆贝母在博乐市、额敏县、托里县和昭苏县境内的最适宜分布面积将减少,尤其在昭苏县的最适宜分布面积将减少一半左右,而在布尔津县的适宜分布面积将显著增加(图 1,表 4,5)。尽管如此,相对新疆其它地区,阿勒泰市、布尔津县、富蕴县、额敏县、托里县、奇台县、博乐市和昭苏县仍是该濒危植物在不同气候下适宜分布面积较大的地区,可以作为异地栽培种植的重点潜力区。另外,本研究模拟得到的不同气候下新疆贝母的潜在分布区及其生态适宜性,还可以指导该植物自然保护区的建立,为该植物的保育实践提供理论依据。但在实际应用中,还应考虑研究区土地利用/覆被的变化,以及模型预测结果中的不确定性。

参考文献(References):

- [1] Parmesan C. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2006, 37: 637-669.
- [2] Aratijo M B, Alagador D, Cabeza M, Nogués-bravo D, Thuiller W. Climate change threatens European conservation areas. *Ecology Letters*, 2011, 14(5): 484-492.
- [3] 崔晋亮. 气候变化对三种常用药用植物分布的潜在影响. 西安: 陕西师范大学, 2015.
- [4] 段咸珍, 郑秀菊. 新疆贝母属植物研究五报——野生贝母资源及其开发利用. *中国野生植物*, 1990, (1): 2-5.
- [5] 王果平, 李晓瑾, 贾新岳. 北疆部分地区新疆贝母 *Fritillaria walujewii* 资源调查 // 全国第 9 届天然药物资源学术研讨会论文集. 广州: 中国自然资源学会, 2010.
- [6] 苏志豪, 潘伯荣, 卓立, 周晓兵, 刘会良, 康晓珊. 中国天山山区新疆贝母居群遗传多样性及其环境适应性. *干旱区研究*, 2017, 34(1): 119-125.
- [7] 黄璐琦, 肖培根, 王永炎. 中国珍稀濒危药用植物资源调查. 上海: 上海科学技术出版社, 2012.
- [8] Staton H, Ashley Sr J, Ashley Jr J, Mooney P. Method and system to monitor and control devices utilizing wireless media: US, US8290515. 2012-10-16.
- [9] Hernandez P A, Franke I, Herzog S K, Pacheco V, Paniagua L, Quintana H L, Soto A, Swenson J J, Tovar C, Valqui T H, Vargas J, Young B E. Predicting species distributions in poorly-studied landscapes. *Biodiversity and Conservation*, 2008, 17(6): 1353-1366.
- [10] 马松梅, 魏博, 李晓辰, 罗冲, 孙芳芳. 气候变化对梭梭植物适宜分布的影响. *生态学杂志*, 2017, 36(5): 1243-1250.
- [11] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [12] 张熙鹭, 隋晓云, 吕植, 陈毅峰. 基于 Maxent 的两种入侵性鱼类(麦穗鱼和鲫)的全球适生区预测. *生物多样性*, 2014, 22(2): 182-188.
- [13] 马松梅, 聂迎彬, 耿庆龙, 王荣学. 气候变化对蒙古扁桃适宜分布范围和空间格局的影响. *植物生态学报*, 2014, 38(3): 262-269.
- [14] 马松梅, 聂迎彬, 段霞, 余存生, 王荣学. 蒙古扁桃植物的潜在地理分布及居群保护优先性. *生态学报*, 2015, 35(9): 2960-2966.
- [15] 常志隆, 周益林, 赵遵田, 段霞瑜. 基于 MaxEnt 模型的小麦印度腥黑穗病在中国的适生性分析. *植物保护*, 2010, 36(3): 110-112, 129-129.
- [16] 张微, 姜哲, 巩虎忠, 梁晓峰. 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.
- [17] 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.
- [18] 王娟娟, 曹博, 白成科, 张琳琳, 车乐. 基于 Maxent 和 ArcGIS 预测川贝母潜在分布及适宜性评价. *植物研究*, 2014, 34(5): 642-649.
- [19] 张东方, 张琴, 郭杰, 孙成忠, 吴杰, 聂祥, 谢彩香. 基于 MaxEnt 模型的当归全球生态适宜区和生态特征研究. *生态学报*, 2017, 37(15): 5111-5120.

-
- [20] 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.
- [21] Cohen J. A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, 1960, 20(1): 37-46.
- [22] 柳鑫, 杨艳芳, 宋红萍, 张小波, 黄璐琦, 吴和珍. 基于 MaxEnt 和 ArcGIS 的黄连生长适宜性区划研究. *中国中药杂志*, 2016, 41(17): 3186-3193.
- [23] 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.
- [24] 新疆兴农网. 新疆贝母. (2016-06-03) [2017-12-08]. <http://www.xjxmw.gov.cn/c/2016-06-03/501257.shtml#>.
- [25] Bertrand R, Lenoir J, Piedallu C, Riofrío-Dillon G, de Ruffray P, Vidal C, Pierrat J C, Gégout J C. Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests. *Nature*, 2011, 479(7374): 517-520.
- [26] 李兰海, 白磊, 姚亚楠, 杨青. 基于 IPCC 情景下新疆地区未来气候变化的预估. *资源科学*, 2012, 34(4): 602-612.