

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201704001

引文格式: 刘艳梅, 周颂东, 谢登峰, 等. 基于最大熵模型(MaxEnt)预测暗紫贝母的潜在分布[J]. 广西植物, 2018, 38(3):352–360
LIU YM, ZHOU SD, XIE DF, et al. Potential distribution of *Fritillaria unibracteata* predicted by the MaxEnt model [J]. *Guihaia*, 2018, 38(3): 352–360

基于最大熵模型(MaxEnt)预测暗紫贝母的潜在分布

刘艳梅, 周颂东*, 谢登峰, 黄 娇, 何兴金

(四川大学 生命科学学院 生物资源与生态环境教育部重点实验室, 成都 610064)

摘 要: 暗紫贝母(*Fritillaria unibracteata*)干燥的鳞茎是市场名贵药材“川贝”的主要来源,目前由于人们的过度挖采及环境的恶化,使得其野生资源已近枯竭,被列为国家三级濒危保护药材物种。该研究通过收集暗紫贝母的地理分布点经纬度,结合 26 项生态因子,运用最大熵模型(MaxEnt)并结合地理信息系统(ArcGIS),对在中国的潜在分布区域进行了预测。结果表明:暗紫贝母的潜在适生区主要分布在四川西部和北部、青海南部、甘肃南部,其中四川阿坝藏族羌族自治州的理县、茂县、松潘县、红原县、黑水县等地区,青海省果洛藏族自治州久治县、玛沁县、同德县、兴海县、河南县地区以及甘肃省甘南藏族自治州地区是暗紫贝母最佳适生区。此外,在西藏和云南也有零星的分布。对暗紫贝母的分布贡献率较大的主要生态因子有 5 个,分别是海拔(40.8%),年均降水量(28%),1 月最高温度(7.1%),最干季平均温度(6.6%)和昼夜温差日均值(6.6%)。其中,海拔为 2 700~4 500 m、年均降水量为 400~1 400 mm,是暗紫贝母最适宜生长的生态位参数。该研究结果为暗紫贝母的野生抚育和人工栽培提供了重要的科学依据。

关键词: 暗紫贝母, 最大熵模型, 生态因子, 潜在分布, 野生抚育

中图分类号: Q949 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2018)03-0352-09

Potential distribution of *Fritillaria unibracteata* predicted by the MaxEnt model

LIU Yanmei, ZHOU Songdong*, XIE Dengfeng, HUANG Jiao, HE Xingjin

(Key Laboratory of Bio-resources and Eco-environment of Ministry of Education, College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: *Fritillaria unibracteata* is an important medicinal plant due to its dried bulbs. However, it was massively collected by the natives in recent years, so that its wild resources had been seriously damaged, and been listed as national the third-class protective medicinal plants. In this study, its potential distribution was predicted by collecting geographic coordinates, combining with 26 environmental variables based on the MaxEnt model and ArcGIS platform. The results showed that its potential distribution areas were mainly located in western and northern Sichuan, southern Qinghai,

收稿日期: 2017-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(31570198,31270241); 国家标本平台教学标本子平台项目(2005DKA21403)[Supported by the National Natural Science Foundation of China (31570198,31270241); National Specimen Information Infrastructure(2005DKA21403)]。

作者简介: 刘艳梅(1994-),女,四川泸州市人,硕士研究生,主要从事植物分类和系统进化生物学研究,(E-mail)763431699@qq.com。

*通信作者: 周颂东,副教授,硕士生导师,主要从事植物分类与系统进化相关研究,(E-mail) songdongzhou@aliyun.com。

southern Gansu. Within these areas, Aba Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture of Sichuan(Lixian, Maoxian, Songpan County, Hongyuan County and Heishui County), Kolo Tibetan Autonomous Prefecture of Qinghai(Jiuzhi County, Maqin County, Tongde County, Xinghai County and Henan County) and Gannan Tibetan Autonomous Prefecture of Gansu were determined as the best potential distribution areas. And the populations of *F. unibracteata* also fragmentally distributed in Tibet and Yunnan. In addition, there were another five major environmental factors which exerted obvious influence on its distributions, including altitude(40.8%), annual average precipitation(28%), maxmum temperature of January(7.1%), mean temperature of the driest quarter(6.6%) and the precipitation variation coefficient(6.6%). Its suitable ecological niche parameters were altitude around 2 700–4 500 m and annual average precipitation around 400–1 400 mm. This study can provide a scientific guidance for conservation and cultivation of *Fritillaria unibracteata*.

Key words: *Fritillaria unibracteata*, MaxEnt, ecological factors, potential distribution, wild medicinal materials tending

暗紫贝母(*Fritillaria unibracteata*)隶属于百合科(Liliaceae)贝母属(*Fritillaria* L.),是多年生的草本植物,其鳞茎由两枚大小不一的鳞片组成,大瓣鳞片紧抱小瓣鳞片,未环抱的部分呈现出新月形,因此称其为“怀中抱月”(谭焕萍等,1998)。在2005年版《中国药典》中,将川贝母(*Fritillaria cirrhosa*)、暗紫贝母(*F. unibracteata*)、甘肃贝母(*F. przewalskii*)或梭砂贝母(*F. Delavayi*)的干燥鳞茎收载为市场药材“川贝”(聂小忠,2008)。暗紫贝母的干燥鳞茎具有重要的药用价值,广泛的用于治疗肺热燥咳,干咳少痰,阴虚劳咳,咳痰带血等疾病,并且能有效的改善患者中医证候(痰热咳嗽证)。此外,还能降低血管的通透性,有效的达到抗炎的效果。暗紫贝母鳞茎中具有总皂甙部分与总生物碱部分等有效活性成分对心血管系统有一定的降压作用(顾健等,2012;丁红等,2010;高山林和夏艳,2000)。相比其他几种“川贝”基源物种,暗紫贝母具有最好的药效(周宜等,2010),因此市场的需求量越来越大。

作为一种药用植物,前人对暗紫贝母的研究除了鳞茎化学成分的分析以及真伪鉴定方面,还涉及到暗紫贝母的群落生态学研究。研究发现暗紫贝母的分布区正处于中国—日本森林植物亚区向中国—喜马拉雅植物亚区过渡的地段,此地段的植被为鲜明的垂直分布,是世界高山植物区系中最为丰富的地区(陈士林等,1993)。其中,在海拔2 800~4 400 m范围内的绣线菊—金露梅—珠芽蓼群落和窄叶鲜卑花—环线柳—毛蕊杜鹃群落中,暗紫贝母品质最佳,且海拔越低其地下鳞茎越

大(陈士林和肖小河,1997;徐波等,2013)。但暗紫贝母生长区域狭窄且生长周期长,当前,暗紫贝母的生境严重恶化,加上人们过度的挖采,造成其野生资源大大减少,已经被列为国家三级濒危保护药材物种(韩鸿萍和陈志,2016;黄璐琦等,2012)。王瑀等(2006)以暗紫贝母道地产地若尔盖的生态因子为依据,利用《中药材产地适宜性分析地理信息系统》(TCMGIS-I)分析了它在中国的适生区,结果表明暗紫贝母的生物学特征与其自身的分布区特征呈现明显的一致性。本研究在此基础上,丰富了暗紫贝母的地理分布数据和生态因子数据,在更大范围内准确的分析其潜在分布区以及生长适宜性,对于掌握暗紫贝母资源的整体概况、开展野生资源的保护工作以及在适生区实施人工栽培都具有非常重要的作用。

最大熵模型(MaxEnt)是Jaynes在1957年首次提出的,该模型能够对不完整的信息进行推断,于2004年被应用在物种的潜在分布预测方面。如今,在生态学、进化、资源保护等多种领域都有最大熵模型的广泛应用(Steven et al, 2004;蔡静芸等,2014)。相较于其他常见的生态位模型,如GARP(the genetic algorithm for rule-set prediction),Bioclim(the bioclimatic prediction system),Domain(the domain model)和ENFA(ecological niche factor analysis)(王运生等,2007),最大熵模型MaxEnt(the maximum entropy model)预测的结果最为准确,即使物种分布数据信息及分布区的环境变量不完整,也能对物种的潜在分布区进行精准的预测(车乐等,2014)。该模型的稳定性好且预测的

结果与物种的实际分布基本吻合(平均 AUC 值最大)。因此,在动植物保护,尤其是对濒危物种的潜在分布区预测和入侵物种的潜在扩散区域预测方面得到广泛的应用(王娟娟等,2014;孙洪兵等,2015;文检等,2016)。本研究通过前期对暗紫贝母进行实地野外调查和文献资料查询,及后期整理网上标本馆的标本信息,利用 MaxEnt 模型分析整理所得的数据信息,预测暗紫贝母的潜在分布区并划分出不同的适生等级,进一步分析了影响其分布的关键环境因子和最佳生态位参数,旨在为更好地开展暗紫贝母野生资源的保护和人工引种栽培等工作提供重要参考和理论依据。

1 材料与方法

1.1 暗紫贝母分布数据

暗紫贝母的分布数据信息来源于三个部分:一是实验室野外实地调查所得到的经纬度;二是通过整理文献中涉及的相关分布数据;三是统计中国数字植物标本馆(CVH)(<http://www.cvh.org.cn/>)中暗紫贝母的标本记录信息。对于文献及标本中仅具有物种名和详细的分布地点而没有具体经纬度信息的记录,运用谷歌地图定位到具体的分布点,从而获得准确的经纬度信息,野外调查信息包括采样点的经纬度以及植株生境照(图1)等,最终整理获得86份包括物种名和经纬度等准确信息的分布数据(表1)。

1.2 地理数据和环境变量数据

选用中国基础地理信息系统(<http://nfgis.nsdi.gov.cn/>)中1:400万的中国行政区划图作为底图,涉及26个环境变量,由世界气象数据(WPRLDCLIM)提供下载。其中,包括19个生物气候变量(bio1~bio19),1月及7月的最高温(tmax1、tmax7)、最低温(tmin1、tmin7)、平均温(tmean1、tmean7)、降水量(prec1、prec7)和海拔(alt.)(徐军等,2015)。

1.3 MaxEnt 模型运行

将统计所得暗紫贝母的分布数据按照物种名、经度和纬度格式输入 EXCEL 中并保存为(.csv)文件。在 MaxEnt 软件中的样本栏(samples)添加上述

csv.文件,在环境图层栏(environmental layers)添加所下载的环境变量数据。通过采用刀切法(Do jack-knife)来评估不同生态因子在影响暗紫贝母生长中所占的不同权重,再选中制作响应曲线(create response curves)选项得到各生态因子不同的响应曲线,利用 ROC 曲线(受试者工作特征曲线)下面积(AUC 值)的大小来评价模型预测的准确性。本研究将25%的分布点设定为测试集,剩余的75%的分布点为训练集,将模型的运算次数设定为500次,重复运算设定为10次,其余选项均默认模型的自动设置(Robert et al,2011)。

1.4 生态因子的选取

对生态因子的选取分为两步:首先,将26个生态因子及分布数据导入 MaxEnt 软件中按照上述设置运行3次,每次将贡献率为0的生态因子舍去;然后,对于贡献率大于0的生态因子,运用 Spearman 相关系数进行相关性分析来检验环境变量图层之间的相关性。当两个生态因子之间的相关性大于等于0.8,只选择其中任意一个因子运行模型。

1.5 适应性分布区划分

先将 MaxEnt 生成的 asc 格式文件通过在 ArcGIS 中转化成 Raster 文件,然后进行重分类程序,得到暗紫贝母的潜在分布适生区。根据暗紫贝母的适宜指数,采用人工(manual)分级方法划分出暗紫贝母适生性的分布等级。

2 结果与分析

2.1 预测精度

ROC 曲线分析法是通过计算曲线下方的面积即 AUC 值的大小来判断模型模拟的精确度。由于 AUC 值不受阈值的影响,因此被公认为诊断试验的最佳评价指标(徐军等,2015)。AUC 值的大小范围为0.5~1,数值越大表示预测的越准确,当 AUC 值>0.9 时,表明模拟的精准度很高,MaxEnt 适用于对该物种进行潜在分布的预测。本研究的预测结果显示训练集的 AUC 值为0.991,测试集的 AUC 值为0.988,表明 MaxEnt 模型对暗紫贝母中国潜在分布区的预测效果非常好。

表 1 暗紫贝母分布数据

Table 1 Distributed data of *Fritillaria unibracteata*

数据来源 Data source	数据数目 Number	分布地 Distribution
野外调查 Field survey	10	四川省(理县、茂县、大邑县等), 云南省(贡山) Sichuan(Lixian County, Maoxian County, Dayi County et al), Yunnan(Gongshan)
人工栽培 Artificial cultivation	10	四川省(理县、茂县、红原县), 青海省(玛沁县、久治县等) Sichuan(Lixian County, Maoxian County, Hongyuan County et al), Qinghai (Maqin County, Jiuzhi County et al)
文献及标本 Literature and samples	66	四川省(马尔康、康定县等), 西藏(巴塘等), 甘肃省(临潭县、玛曲县等), 青海省(玛沁县、河南县等) Sichuan(Barkam County, Kangding County et al), TiBet (Batang et al), Gansu (Lintan County, Maqu County et al), Qinghai (Maqin County, Henan County et al)

2.2 生态因子的选择

在 MaxEnt 模型运算中开启刀切法, 运算结果显示出不同生态因子在影响暗紫贝母生长适宜度中所占的不同权重(图 2)。

表 2 结果显示, 经过筛选对暗紫贝母分布贡献率大于 0 的生态因子有 13 个。影响暗紫贝母生长的主要的生态因子有 5 个, 分别是: 海拔(40.8%)、年均降水量(28%)、1 月最高气温(7.1%)、最干季平均温度(6.6%)和昼夜温差日均值(6.6%)。总贡献率达到 89.1%。其中, 海拔的贡献率高达 40.8%, 说明海拔是暗紫贝母生长中的限制性因子。此外, 降雨量因子的总贡献率为 35.8%, 温度因子的总贡献率为 23.5%。所以海拔和降雨量是影响暗紫贝母分布的最主要的环境因子。

2.3 主要生态因子分析

MaxEnt 模型可根据各种环境因子的响应曲线来分析它们的适宜区间值, 进而绘制出不同环境因子对物种生长影响的单变量响应曲线。对暗紫贝母适应生长最主要的两个生态因子是海拔(Alt 1)和年均降水量(Bio_12)(图 3)。选择存在概率大于 0.15 的区间作为其适生值范围。当海拔在 2 700 m 左右, 暗紫贝母存在的概率为 0.15, 随着海拔升高暗紫贝母的生长概率先增大后减小, 到 3 500 m 左右, 达到了暗紫贝母的最适应值。当海拔升高大于 4 500 m, 暗紫贝母存在的概率小于 0.15, 则不适宜暗紫贝母的生长。所以海拔的适宜范围是 2 700 ~ 4 500 m。当年平均降水量在 400 mm 左右时, 达到暗紫贝母生长的适应值, 随着年

表 2 13 个生态因子的贡献

Table 2 Contribution rates of thirteen environmental factors

环境因子 Environ- mental factor	含义 Description	贡献率 Contribution rate (%)
Alt_1	海拔 Altitude	40.8
Bio_12	年均降水量 Annual average precipitation	28.0
Tmax_1	1 月最高气温 Maxmum temperature of January	7.1
Bio_9	最干季度平均温度 Mean temperature of the driest quarter	6.6
Bio_15	降水量变异系数 Precipitation variation coefficient	6.6
Bio_2	昼夜温差日均值 Mean temperature difference between day and night	5.0
Bio_4	温度季节性变化的标准差 Seasonal temperature change of standard deviation	1.9
Tmin_7	7 月最低气温 Minimum temperature of July	1.2
Tmean_1	1 月平均气温 Average temperature of January	1.0
Bio_11	最冷季度降水量 Precipitation of the coldest quarter	0.8
Bio_11	最冷季度平均温度 Mean temperature of the coldest quarter	0.5
Bio_18	最暖季度降水量 Precipitation of the most warm quarter	0.4
Bio_3	等温性 Isothermality	0.2

平均降水量的增加暗紫贝母的存在概率先增加后减小, 当年平均降水量在 800 mm 时, 达到了最适应值。当年平均降水量大于 1 400 mm 后则不适宜暗紫贝母的生长。因此, 年平均降水量的适宜范围

表 3 潜在分布区域面积分省(区)统计

Table 3 Statistic alanalysis of areas according to province/autonomous region in potential distribution area

省份/区 Province/Autonomous region	四川 Sichuan	甘肃 Gansu	青海 Qinghai	陕西 Shaanxi	西藏 Tibet	云南 Yunnan
最佳适生区 (km ²) The most suitable areas	52 289	3 240	390	256	0	0
高适生区 (km ²) High suitable areas	41 259	18 457	21 306	554	1 343	172
适生区 (km ²) Suitable areas	51 514	15 849	39 739	828	20 740	4 706
适生区总面积 (km ²) Total areas of suitable areas	145 062	37 546	61 435	1 638	22 083	4 878
省份总面积 (km ²) Total areas of provinces	486 000	453 700	721 000	205 800	1 228 400	394 000
占全国面积比例 (%) Proportion of all over the country	1.54	0.38	0.63	0.01	0.22	0.05
占省份面积比例 (%) Proportion of provinces	29.81	8.23	8.52	0.79	1.79	1.23

为 400~1 400 mm。

2.4 暗紫贝母适应性划分

运用 ArcGIS 加载分析 MaxEnt 模型的预测结果,得出暗紫贝母在我国的适宜区域分布图,见图 4。从图 4 可以看出,适宜指数 0~0.15 为暗紫贝母的非适生区,暗紫贝母的适生区分为 5 个区间:适宜指数 0.15~0.33 为低适生区,主要分布在青海省南部,甘肃和西藏东南部,以及在云南北部和陕西省有零星的分布;适宜指数 0.33~0.57 为适生区,主要分布在青海及甘肃省南部,四川甘孜州;适宜指数 0.57~0.64 为高适生区,主要分布在青海省果洛藏族自治州,甘肃省南部甘南藏族自治州地区以及四川北部阿坝藏族羌族自治州地区;适宜指数 0.64~0.96 为最佳适生区,主要分布区和高适生区一致;潜在分布区在各省(区)的分布面积统计见表 3。适生区面积大小依次是四川(145 062 km²)、青海(61 435 km²)、甘肃(37 546 km²)、西藏(22 083 km²)。预测结果显示,四川阿坝藏族羌族自治州(理县、茂县、红原县、松潘县、黑水县等地区)、青海省果洛藏族自治州(久治县、玛沁县、同德县、兴海县、河南县等地区)以及甘肃省甘南藏族自治州地区是暗紫贝母最适的潜在种植区。

3 讨论与结论

MaxEnt 模型是根据物种的分布点数据和多种环境变量,找出物种分布规律的最大熵,然后对物种的适生区分布进行预测。本研究采用最大熵模型结合地理信息系统,所用的分布点数据来源于国家植物标本馆和野外实地调查,基本覆盖了暗紫贝母的主要分布区四川、青海、甘肃、西藏及云南,并结合 26 项环境因子,对暗紫贝母的潜在分布区进行预测和适宜性等级划分。相较于使用《中药材产地适宜性分析地理信息系统》(TCMGIS-1)对暗紫贝母适宜性的分析,本研究采用的地理数据及生态因子更全面,得到的结果更精确,具有更好的代表性。本研究预测结果显示暗紫贝母适宜区主要分布在四川西北部、青海南部、甘肃南部,其中四川阿坝藏族羌族自治州(理县、茂县、红原县、松潘县、黑水县等地区)、青海省果洛藏族自治州(久治县、玛沁县、同德县、兴海县、河南县地区)以及甘肃省甘南藏族自治州地区是暗紫贝母最佳适应区。野外调查显示,在四川省理县、茂县和青海省南部等地区已有暗紫贝母的栽培基地,其人工栽培已获成功,而这些人



注：a. 暗紫贝母花；b. 暗紫贝母果实。
Note: a. Flower of *Fritillaria unibracteata*; b. Fruit of *F. unibracteata*.

图 1 暗紫贝母的野外生境
Fig. 1 Growth environment of *Fritillaria unibracteata*

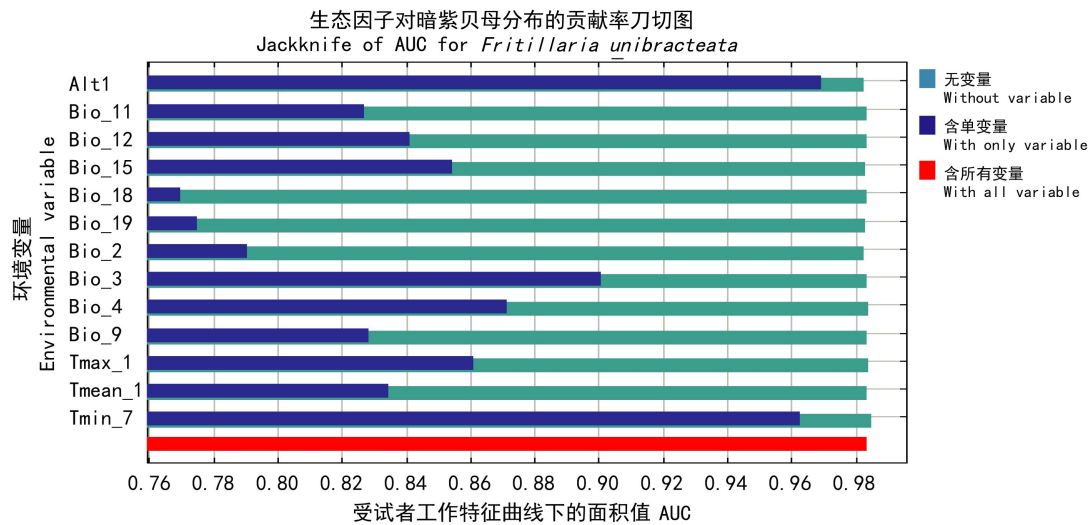


图 2 生态因子在 MaxEnt 模型中预测暗紫贝母在分布的贡献率
Fig. 2 Contribution rate of environment factors in MaxEnt modeling for predicting the potential distribution of *Fritillaria unibracteata*

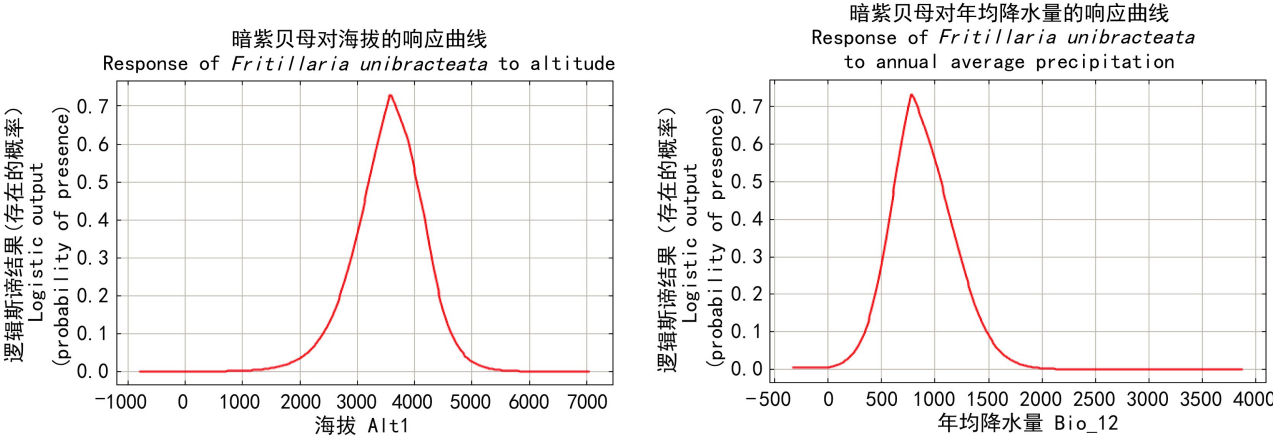


图 3 海拔以及年均降水量的响应曲线
Fig. 3 Response curves of altitude and annual average precipitation

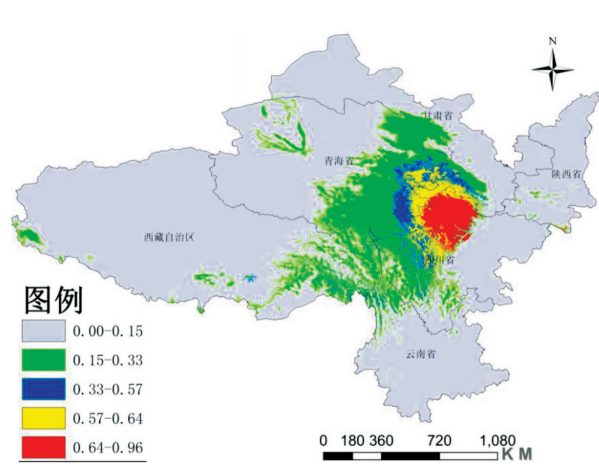


图 4 暗紫贝母的潜在分布核心区域示意图
Fig. 4 Core potential distribution area of *Fritillaria unibracteata* in China

适生长区内。除此之外,暗紫贝母在西藏东南部,以及在云南北部和陕西有零星分布。这与王瑀等(2006)的研究结果有所差异,其显示四川阿坝藏族自治州、甘孜县和西藏西南部是暗紫贝母的最佳适应区,在青海省和甘肃省少有分布,而该文研究结果显示西藏地区没有高适宜区和最佳适宜区,这与西藏几乎没有暗紫贝母的标本记录相符合。同时,青海省南部及甘肃省南部是暗紫贝母的最适应区及较适应区,这与青海省及甘肃省有较多暗紫贝母的标本记录及文献记载是一致的。MaxEnt 模

型预测结果显示 AUC 值为 0.988,表明本研究 MaxEnt 模型下对于暗紫贝母的潜在分布预测的准确度高。

暗紫贝母是一种高山植物,海拔对暗紫贝母生长有很大的限制作用。在低海拔地区,暗紫贝母无法正常生长及繁殖;在高海拔地区,随着海拔的升高,暗紫贝母鳞茎的生物量和植株总生物量都在逐渐降低,因此,海拔过高也不利于暗紫贝母的生长。暗紫贝母主要生长在青藏高原东缘的2 800~4 400 m 的高海拔地区,空气稀薄干燥,日照强烈,青藏高原地形复杂多变,受到西南季风的影响,昼夜温差大,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,造就了暗紫贝母特殊的生长环境(吴征镒等,2011)。在四川西部,甘肃南部及青海南部的高海拔地区,年均降水量为400~1 400 mm,昼夜的温差大,有利于营养物质的积累和促进暗紫贝母鳞茎的生长。1月(最冷月)的最低温度为-16℃,平均气温在-2℃左右,能保证暗紫贝母安全越冬,所以,这些地区是暗紫贝母最佳适生区。对于降雨量相对较少的新疆,内蒙和我国北方地区,以及降雨量较多的南方沿海地区,都不利于暗紫贝母营养物质的积累,因此限制了暗紫贝母的分布。此次最大熵模型预测的暗紫贝母的适生的生态环境与其野外分布的生态环境基本一致,即生长在高海拔,低温,空气稀薄,日照强烈,干湿季分明且昼夜温差大的地区(徐波等,2014;陈士

林等,1989;陈文年等,2015)。

由于暗紫贝母对生长环境要求十分苛刻,所以人工引种栽培暗紫贝母的关键就是正确的选择栽培地址。本研究基于 MaxEnt 和 ArcGIS 技术分析暗紫贝母的潜在分布区,并对其进行适生性等级划分,以及分析了影响其生长的主要生态因子,能够为暗紫贝母的野生保护和人工引种栽培提供科学依据。同时,暗紫贝母主要在春季和初夏生长,一般在 7 月下旬左右收取果实。在栽培暗紫贝母时,可以在同一适生区将暗紫贝母与其他不同生长时期的药材套种,从而提高种植效益。但是,在不同地区栽培的暗紫贝母以及不同的生态因子对暗紫贝母的药效成分是否有影响都有待进一步的研究。

参考文献:

CAI JY, ZHANG MM, LI HJ, et al, 2014. Application of ecological niche models for selection of species habitat [J]. J Econ Anim, 18(1):47. [蔡静芸, 张明明, 粟海军, 等, 2014. 生态位模型在物种生境选择中的应用研究[J]. 经济动物学报, 18(1):47.]

CHEN SL, XIAO XH, CHEN SY, 1989. The ecological research of *Fritillaria unibracteata* [J]. J Chin Med Mat, (11):5-8. [陈士林, 肖小河, 陈善墉, 1989. 暗紫贝母的群落生态研究[J]. 中药材, (11):5-8.]

CHEN SL, XIAO XH, CHEN SY, 1993. Unmerical studies on spatial distribution pattern of *Fritillaria unibracteata* community [J]. Resourc Dev Market, 9(3):198-201. [陈士林, 肖小河, 陈善墉, 1993. 川贝植被分布格局的数值分析[J]. 资源开发与市场, 9(3):198-201.]

CHEN SL, XIAO XH, 1997. Unmerical studies on spatial distribution pattern of *Fritillaria unibracteata* community [J]. J SW Chin Norm Univ(Nat Sci Ed), (4):416-420. [陈士林, 肖小河, 1997. 暗紫贝母植被分布格局的数值分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), (4):416-420.]

CHEN WN, XIAO XJ, CHEN FJ, et al, 2015. Reproductive organ variation in *Fritillaria unibracteata* along an altitudinal gradient [J]. Acta Pratac Sin, 24(12):155-163. [陈文年, 肖小君, 陈发军, 等, 2015. 暗紫贝母的繁殖器官在海拔梯度上的变异[J]. 草业学报, 24(12):155-163.]

DING H, YAN BH, LIU SS, et al, 2010. A mutli-center randomized double-blindcontrolled trial on the functional difference between *Fritillaria unibracteata* Hsiao et K. C. Hsia and *Fritillaria delavayi* Flanch in relieving acute bronchitis(heat phlegm cough) [J]. Chin J Clin Pharm Therap, 15(5):524-529. [丁

红, 阎博华, 刘松山, 等, 2010. 暗紫贝母和梭砂贝母治疗急性支气管炎(痰热咳嗽)的多中心、随机、双盲、对照试验[J]. 中国临床药理学与治疗学, 15(5):524-529.]

GAO SL, XIA Y, 2000. The pharmacological action of cultured bulb of *Fritillaria unibracteata* Hsiao et K. C. Hsia [J]. J Plant Resourc Environ, 9(1):4-8. [高山林, 夏艳, 2000. 组织培养暗紫贝母的药理作用[J]. 植物资源与环境学报, 9(1):4-8.]

GU J, LI J, TAN R, et al, 2002. Total saponins contents and anti-inflammatory effect of *Fritillariae cirrhosae* bulbus of different species [J]. J SW Univ Nat (Nat Sci Ed), 38(2):252-255. [顾健, 李婧, 谭睿, 等, 2012. 不同基源川贝母的总皂甙含量以及抗炎作用比较研究[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 38(2):252-255.]

HAN HP, CHEN Z, 2016. Research progress of *Fritillaria unibracteata* Hsiao et K. C. Hsia [J]. J Qinghai Norm Univ(Nat Sci Ed), 32(1):29-33. [韩鸿萍, 陈志, 2016. 暗紫贝母研究现状[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 32(1):29-33.]

HUANG LQ, XIAO PG, WANG YY, 2012. Endangered medicinal plant resources investigation of China [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press:283-288. [黄璐琦, 肖培根, 王永炎, 2012. 中国珍稀濒危药用植物资源调查[M]. 上海:上海科学技术出版社:283-288.]

JU L, CAO B, BAI CK, et al, 2014. Predictive distribution and habitat suitability assessment of *Notholirion bulbuliferum* based on MaxEnt and ArcGIS [J]. Chin J Ecol, 33(6):1623-1628. [车乐, 曹博, 白成科, 等, 2014. 基于 MaxEnt 和 ArcGIS 对太白米的潜在分布预测及适宜性评价[J]. 生态学杂志, 33(6):1623-1628.]

NIE XZ, 2008. Analysis of species of bulbus *Fritillariae cirrhosae* indexed in different version of Chinese Pharmacopoeia [J]. Chin Pharm, 19(9):717-719. [聂小忠, 2008. 对历版《中国药典》所载川贝品种的探讨[J]. 中国药房, 19(9):717-719.]

ROBERTO M, ZAMORA R, MOLINA JR, et al, 2011. Predictive modeling of microhabitats for endemic birds in South Chilean temperate forests using maximum entropy (Maxent) [J]. Ecol Inform, 6:364-370.

STEVEN JP, MIROSLAV D, ROBERT ES, 2004. A maximum entropy approach to species distribution modeling [C]// Proceedings of 21st International Conference on Machine Learning: 655-662.

SUN HB, SUN H, JIANG SY, et al, 2015. Cultural regionalization for *Notopteryg iumincisum* based on 3S technology platform I. Evaluation for growth suitability for *N. incisum* based on ecological factors analysis by Maxent and ArcGIS model [J]. Chin J Chin Mat Med, 40(5):853-862. [孙洪兵, 孙辉, 蒋舜媛, 等, 2015. 基于 3S 技术的羌活区划

- MaxEnt 研究 I. 基于 Max 和 ArcGIS 的羌活生长适宜性分析及评价 [J]. 中国中药杂志, 40(5):853-862.]
- TAN HP, MA BS, WANG YS, 1998. Product specifications and falsify identification of *Fritillaria* [J]. Lishizhen Med Mat Med Res, (5):400-400. [谭焕萍, 马宝生, 王玉生, 1998. 贝母的商品规格及伪品鉴定 [J]. 时珍国医国药, (5):400-400.]
- WANG YS, XIE BY, WAN FH, et al, 2007. Application of ROC curve analysis in evaluating the performance of alien species potential distribution models [J]. Biodivers Sci, 15(4):365-372. [王运生, 谢丙炎, 万方浩, 等, 2007. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用 [J]. 生物多样性, 15(4):365-372.]
- WANG JJ, CAO B, BAI CK, et al, 2014. Potential distribution prediction and suitability evaluation of *Fritillaria cirrhosa* D. Don based on MaxEnt modeling and GIS [J]. Bull Bot Res, 34(5):642. [王娟娟, 曹博, 白成科, 等, 2014. 基于 MaxEnt 和 ArcGIS 预测川贝母潜在分布及适宜性评价 [J]. 植物研究, 34(5):642.]
- WANG Y, WEI JH, CHEN SL, et al, 2006. Ecological evaluation of suitable producing areas of *Fritillaria unibracteata* based on TCMGIS-I [J]. World Sci Technol Modern Trad Chin Med Mat, 8(3):122-124. [王瑀, 魏建和, 陈士林, 等, 2006. 基于 TCMGIS-I 的暗紫贝母生态气候产地适宜性分析 [J]. 世界科学技术:中医药现代化, 8(3):122-124.]
- WEN J, LÜ XM, HONG DX, et al, 2016. Potential distribution of *Rhodiola crenulata* in Tibetan Plateau based on MaxEnt model [J]. Chin J Chin Mat Med, 41(21):3931-3936. [文检, 吕秀梅, 洪道鑫, 等, 2016. 基于 MaxEnt 模型的青藏高原大花红景天生态适宜性分析 [J]. 中国中药杂志, 41(21):3931-3936.]
- WU ZY, SUN H, ZHOU ZK, et al, 2011. Floristics of seed plants from China [M]. Beijing: Science Press: 21-22. [吴征镒, 孙航, 周浙昆, 等, 2011. 中国种子植物区系地理 [M]. 北京:科学出版社: 21-22.]
- XU B, WANG JN, SHI FS, et al, 2013. Adaptation of biomassal location patterns of wild *Fritillaria unibracteata* to alpine environment in the eastern Qinghai-Xizang Plateau [J]. Chin J Plant Ecol, 37(3):187-196. [徐波, 王金牛, 石福孙, 等, 2013. 青藏高原东缘野生暗紫贝母生物量分配格局对高山生态环境的适应 [J]. 植物生态学报, 37(3):187-196.]
- XU B, WANG JN, GUO HX, et al, 2014. Morphological adaptation of wild *Fritillaria unibracteata* to alpine conditions in the eastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. Chin J Appl Environ Biol, 20(6):955-961. [徐波, 王金牛, 郭海霞, 等, 2014. 青藏高原东缘野生暗紫贝母形态特征对高山环境的适应 [J]. 应用与环境生物学报, 20(6):955-961.]
- XU J, CAO B, BAI CK, 2015. Prediction of potential suitable distribution of endangered plant *Kingdonia uniflora* in China with MaxEnt [J]. Chin J Ecol, 34(12):3354-3359. [徐军, 曹博, 白成科, 2015. 基于 MaxEnt 濒危植物独叶草的中国潜在适生分布区预测 [J]. 生态学杂志, 34(12):3354-3359.]
- ZHOU Y, DING H, YAN BH, et al, 2010. Research on the functional difference among different species of Chuan *Fritillaria* in relieving cough and resolving phlegm [J]. Chin J Clin Pharmacol Ther, 15(6):612-616. [周宜, 丁红, 阎博华, 等, 2010. 不同基源川贝母镇咳、祛痰功效差异性实验研究 [J]. 中国临床药理学与治疗学, 15(6):612-616.]