

基于 MaxEnt 和 ArcGIS 对太白米的潜在分布预测及适宜性评价*

车 乐 曹 博 白成科** 王娟娟 张琳琳

(陕西师范大学生命科学学院, 西安 710062)

摘 要 利用最大熵生态位模型(MaxEnt)与地理信息系统(ArcGIS), 结合 89 个太白米地理分布数据、28 个气候因子以及 6 个与太白米生长相关的土壤因子, 对太白米在我国的潜在分布和适宜等级进行了预测。结果表明: 太白米的最适生区(适宜系数 >0.5)主要集中在四川(阿坝、甘孜和凉山, 51813 km^2)、云南(迪庆和丽江, 15889 km^2)、陕西(太白, 16131 km^2)、西藏(林芝、山南和日喀则, 17748 km^2)和甘肃(陇南, 12184 km^2)等地区。ROC 曲线的 $AUC=0.979$, 表明预测结果可信度高。影响太白米分布的主要环境因素有年均降水量(贡献率 38%)、海拔(32.1%)、1 月最低温(7.6%)、1 月降水量(6.8%)、土壤 pH 值(3.9%)等, 太白米最适宜区环境参数为: 年均降水量 870 mm, 海拔 2550 m, 1 月最低温 $-6.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 月降水量 5.3 mm, 土壤 $\text{pH}=6.77$ 。

关键词 太白米; 最大熵模型; 潜在分布; 适宜性评价

中图分类号 Q948.12 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2014)6-1623-06

Predictive distribution and habitat suitability assessment of *Notholirion bulbuliferum* based on MaxEnt and ArcGIS. CHE Le, CAO Bo, BAI Cheng-ke**, WANG Juan-juan, ZHANG Lin-lin (College of Life Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(6): 1623–1628.

Abstract: In this study, 89 occurrence records, 28 climatic and 6 soil factors were used to predict the potential distribution and habitat suitability of *Notholirion bulbuliferum* in China based on the MaxEnt modeling and geographic information system. The results showed that the highly potential distribution (suitability index >0.5) mainly located in Sichuan (Aba, Ganzi and Liangshan, with an area of 51813 km^2), Yunnan (Diqing and Lijiang, 15889 km^2), Shaanxi (Taibai, 16131 km^2), Tibet (Nyingchi, Lhoka and Shigatse, 17748 km^2) and Gansu (Longnan, 12184 km^2) provinces. The AUC of ROC curve was 0.979, indicating that the predictive results with the MaxEnt model were highly precise. The main environmental factors determining the potential distribution were annual average precipitation (the contribution rate, 38%), altitude (32.1%), average monthly minimum temperature of January (7.6%), average monthly precipitation of January (6.8%) and topsoil pH (H_2O) (3.9%). The environmental variables in the highly potential areas were determined as annual average precipitation around 870 mm, altitude around 2550 m, average monthly minimum temperature of January around $-6.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, average monthly precipitation of January around 5.3 mm and topsoil pH (H_2O) around 6.77. The results will provide valuable references for wild resource conservation, plantation regionalization and standard cultivation of *N. bulbuliferum* in highly suitable areas.

Key words: *Notholirion bulbuliferum* (Lingelsh) Stearn; MaxEnt model; potential distribution; habitat suitability assessment.

* 国家自然科学基金项目(31100241)、陕西省科技攻关项目(2011K16-02-05)和中央高校基本科研业务费专项(GK2014022025)资助。

** 通讯作者 E-mail: baichengke@snnu.edu.cn

收稿日期: 2013-11-05 接受日期: 2014-01-22

中药材太白米为百合科假百合属假百合(*Notholirion bulbiferum* (Lingelsh) Stearn)的干燥小鳞茎,具有宽胸利气、止呕止咳和健胃镇痛等功效,可用于治疗气滞胸痛、胃痛腹胀、呕吐反胃和风寒咳嗽等疾病,其主要活性成分为多种甾体碱及酚类成分(屠鹏飞等,1999;吴卫中等,2000)。据文献记载,太白米主要分布在我国秦巴山区和西南高山地区,喜阴、多在冷杉、松树林下或杂草中生长,一般依靠小鳞茎无性繁殖(胡本祥,2004)。近年来,随着市场用药量的激增和市场价格居高不下,经济利益驱使药农无限制采挖,加之太白米自身繁殖缓慢,导致其野生资源濒临枯竭,已被列为珍稀濒危保护植物(胡本祥,2007)。太白米药材来源供应不足,急需扩大人工栽培来满足日益增长的市场需求。因此,预测太白米的潜在分布区并进行适宜性评价,确定影响其分布和最适宜生长的主导环境因子,对于了解太白米资源的整体概况、实施太白米野生资源保护和在适生区推广人工栽培具有十分重要的意义。

目前广泛应用于物种潜在适生分布区预测研究的生态位模型主要有环境包络(environmental envelope)、生态位因子分析(ecological niche factor analysis, ENFA)、最大熵模型(maximum entropy, MaxEnt)和基于遗传算法的规则组合预测模型(genetic algorithm for rule-set production, GARP)等(Ward, 2007; Larson *et al.*, 2010; Nabout *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2010; Rubio & Acosta, 2011; 朱耿平等, 2013)。1957年, Jaynes 提出了最大熵(MaxEnt)理论, 该理论认为, 在已知条件下, 熵最大的事物最接近它的真实状态(Phillips *et al.*, 2006)。研究表明, 应用 MaxEnt 模型预测物种的潜在分布区, 其结果要优于同类的其他预测模型, 特别是在物种分布数据不全的情况下, 应用 MaxEnt 模型预测能得到满意的结果(马松梅等, 2010; 郝朝运等, 2011; Roberto *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2013)。本文通过前期实地调查和检索相关数字标本馆获得太白米现存分布数据, 结合分布点的气候因子和土壤环境数据, 利用 MaxEnt 和 ArcGIS 软件, 预测太白米在中国的潜在适生区分布并划分适生区等级, 综合分析影响太白米潜在分布的主导环境因子, 旨在为太白米的野生资源保护及在适生区开展人工栽培和推广提供一定理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据采集与整理

1.1.1 样品数据 太白米地理分布信息来源于3个方面:一是来源于实验室前期中药资源普查和种质资源调查,经过GPS实地定位获得分布点信息;二是通过太白米相关文献阅读获得采集地信息;三是标本数据库检索,通过检索全球生物多样性信息平台(GBIF)、中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.org.cn/>)、教学标本标准化整理整合与资源共享平台(<http://mnh.scu.edu.cn/>)、中国自然保护区资源平台(<http://www.papc.cn/bhqzy.aspx>)等数据库获得标本采集地信息。最终统计共搜集到260条标本信息。对具有准确经纬度的标本信息直接使用,对已知详细具体分布地点的标本信息,借助GPS确定其经纬度坐标,然后去除经纬度重复和地理坐标不详的标本信息,最终整理获得89份包括物种名、经度和纬度等准确信息的标本信息,保存为.csv格式备用。

1.1.2 环境数据 在WorldClim (<http://www.worldclim.org/>)中下载气候变量数据。基于GIS技术(ArcGIS 10.0)提取中国的28个气候变量,包括19个生物气候变量(bio1-bio19)、海拔及1、7月份的最高温(tmax)、最低温(tmin)、平均温度(tmean)和平均降水(prec)(变量全称见表2)。数据年份为1950—2000年,空间分辨率为1 km×1 km。

土壤因子来自世界土壤数据库(HWSD, Harmonized World Soil Database <http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/index.html?sb=1>)。HWSD有超过16000个不同的土壤制图单位,并且可以链接到统一的属性数据,基于GIS使用特定属性字段,可以将土壤属性数据和图层链接起来,从而展现和查询特定土壤参数,提取相应不同属性的土壤图层。本研究选择与太白米生长密切相关的6个土壤因子,包括表层土壤容重(t-bden), pH值(t-ph), 含沙量(t-sand), 粘土含量(t-clay), 有机碳含量(t-oc)和碎石百分比(t-gravel)(变量全称见表2), 图层分辨率为30弧秒。

1.1.3 地图数据 地图数据为从国家基础地理信息系统网站(<http://nfgis.nsdi.gov.cn/>)下载的1:400万中国地图和中国行政区划图。

1.2 数据处理

1.2.1 气候变量相关性检验 由于各环境变量之间有一定的相关性,对环境变量进行相关性分析后才可应用于生态位模型(Neftalí,2011)。参照 Yang 等(2013)将获得的 28 个气候变量图层进行多重共线性分析(SPSS 16.0)来检验图层之间的相关性,若 2 个气候变量间的相关性 $\geq \pm 0.8$,那么只选择 1 个变量选入模型,最终得到气候因子 10 个环境变量(alt、bio1、bio3、bio4、bio12、bio15、prec1、prec7、tmax7、tmin1)(全称见表 2)。

1.2.2 最大熵模型预测 应用 MaxEnt 软件(3.3.3),参照 Roberto 等(2011)研究方法,采取测试集为分布点的 25%,训练集为分布点的 75%,在环境参数设置中开启刀切法(Jackknife)来评价各环境因子的权重。

1.2.3 模型精度验证 采用受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve,ROC)与横坐标围成的面积即 AUC 值来评价模型预测结果的精准度,AUC 值 0.50~0.60 为失败,0.60~0.70 为较差,0.70~0.80 为一般,0.80~0.90 为好,0.90~1.0 为非常好,越接近 1 说明与随机分布相距越远,环境变量与预测的物种地理分布之间的相关性越大,即模型预测的结果越准确(Hanley & Mcneil,1982)。

2 结果与分析

2.1 太白米潜在分布区预测及其生境适宜等级的划分

按上述方法在 ArcGIS 10.0 中加载 MaxEnt 的运算结果,将生成的栅格数据文件进行重分类,按照适生指数 P 值从低到高将太白米潜在分布区依次分为 4 个等级: $P < 0.1$ 为不适生区; $0.1 \leq P < 0.3$ 为低适生区; $0.3 \leq P \leq 0.5$ 为较适生区; $P > 0.5$ 为最适生区。经空间分析模块计算各生境分布面积,得出我国太白米潜在分布结果,对核心适宜分布区(包括较适生区和最适生区)进行提取并计算面积(表 1)。结果表明,太白米在中国的潜在分布区面积较小,其中最适生区面积为 114915 km^2 ,较适生区面积为 207584 km^2 ,核心适宜分布区面积占全国陆地总面积的 3.44%。比较太白米实际记录点分布图(图 1)和 MaxEnt 预测出的太白米核心适宜分布图(图 2),可以看出,太白米标本记录的实际分布均位于潜在核心适宜分布区,说明预测的潜在分布区与

表 1 太白米核心适宜潜在分布区面积
Table 1 Statistical result of areas by province in core potential distribution area of *Notholirion bulbuliferum*

省份	最适生区 (km^2)	较适生区 (km^2)	适生区 总面积 (km^2)	占该省 面积比例 (%)	占全国 面积比例 (%)
四川	51813	59325	111138	24.54	1.18
云南	15889	56879	72768	21.31	0.78
陕西	16131	26323	42453	20.87	0.45
西藏	17748	22370	40118	3.67	0.43
甘肃	12184	26758	38942	9.40	0.42
全国	114915	207584	322499	-	3.44

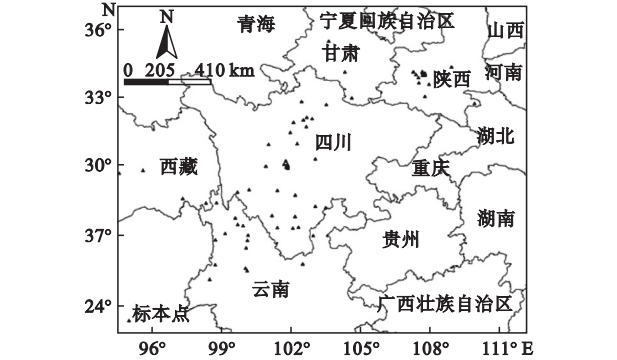


图 1 太白米在中国实际记录点分布示意图
Fig.1 Specimen occurrence records of *Notholirion bulbuliferum*

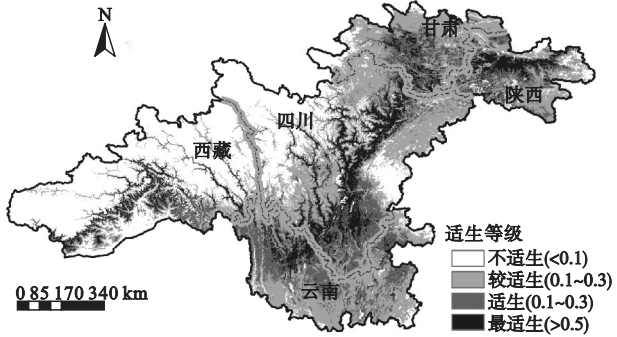


图 2 太白米在中国的核心适宜潜在分布区示意图
Fig.2 Core potential distribution areas of *Notholirion bulbuliferum* in China

实际分布高度一致。

由图 2 可以看出,太白米的潜在分布区主要在我国西北(陕西中南部和甘肃南部)和西南(四川、云南和西藏)的部分地区。其中,最适宜区(适生指数 >0.5)集中分布在陕西的秦岭太白山地区和甘肃南部的陇南地区,四川北部的阿坝藏族羌族自治州、中部的甘孜藏族自治州和南部的凉山彝族自治州地区,云南西北部的迪庆藏族自治州、丽江地区和西藏东南部的林芝地区。由此可见,太白米在我国适宜

生长区域狭窄,大多都在海拔较高的山区,对生长环境要求苛刻。

2.2 预测精度测评

近年来,ROC 曲线分析法在物种潜在分布预测模型评价中应用越来越广泛 (Vanagas, 2004; 张颖等, 2011)。一般认为, AUC 值为 0.5 ~ 0.7 时诊断价值较低, 0.7 ~ 0.9 时诊断价值中等, >0.9 时诊断价值较高 (Swets, 1988)。按上述方法, 建模并重复运行 100 次后, 得到的平均训练集 AUC 值为 0.979, 表明 MaxEnt 模型对太白米潜在分布区的预测结果非常好, 可信度很高。

2.3 太白米适生区环境参数的综合分析

刀切法常被用来分析各个环境因子对预测结果的影响程度, 或用来确定影响物种分布的关键性环境因素 (Peterson & Cohoon, 1999)。根据刀切法分析得到的结果 (图 4), 计算参与模型建立的环境因子对最大熵模型的贡献率 (表 2), 可以判断影响物种分布的主要环境因子。

表 2 最大熵模型中各环境变量贡献率 (%)
Table 2 Contribution percent of each environmental factor in MaxEnt modeling

环境变量	解释	贡献率
bio12	年均降水量	38.0
alt	海拔	32.1
tmin1	1 月最低温	7.6
prec1	1 月降水量	6.8
t_ph	土壤 pH	3.9
bio3	等温性	2.5
t_gravel	碎石百分比	2.2
bio4	温度季节性变化标准差	1.6
t_oc	有机碳含量	1.4
t_clay	粘土含量	1.2
bio15	降水量变异系数	0.9
tmax7	7 月最高温	0.6
prec7	7 月降水量	0.4
bio1	年均温	0.4
t_sand	含沙量	0.3
t_bden	土壤容重	0.1

表 2 表明, 影响太白米适生等级的主要环境因子依次为: 年均降水量 (38%)、海拔 (32.1%)、1 月最低温 (7.6%)、1 月降水量 (6.8%)、土壤 pH (3.9%)。以上 5 个环境因子的累计贡献率达 88.4%。综合分析表明, 年均降水量和海拔是影响太白米分布的最主要的环境因子, 其次是 1 月的气候因子最低温和平均降雨量, 土壤 pH 值对太白米的分布亦有重要影响, 但较海拔和气候因素小。

从 ArcGIS 模块 Spatial Analyst Tools 中提取各适宜等级生态位参数, 分别统计 16 个环境因子在 4 个不同适宜等级分布区的参数范围 (最小值-最大值) 和平均数及标准差。结果表明 (表 3), 在潜在分布区的不同适宜等级中, 影响太白米分布的 5 个主导环境因子 (bio12、alt、tmin1、prec1、t-ph) 变化范围呈现较为一致的变化趋势: 从不适宜区到最适宜区, 变化范围逐渐缩小, 标准差显著降低 ($P<0.05$), 说明太白米对最适生区环境因子要求较高, 各最适分布区影响太白米潜在分布的环境因子趋于一致。综合分析表明, 太白米最适宜生长在海拔 2550 m, 年平均降水量在 870 mm, 1 月份降水量在 5.3 mm, 1 月份最低温在 -6.3 ℃, 土壤 pH 为 6.77 的地区生长。这一结果可为太白米野生资源保护和人工种植区选择及标准化栽培提供理论依据。

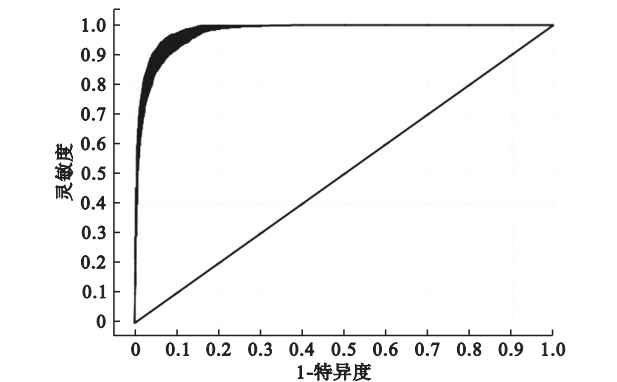


图 3 太白米预测结果 AUC 图
Fig.3 AUC result of the prediction process of *Notholirion bulbuliferum*

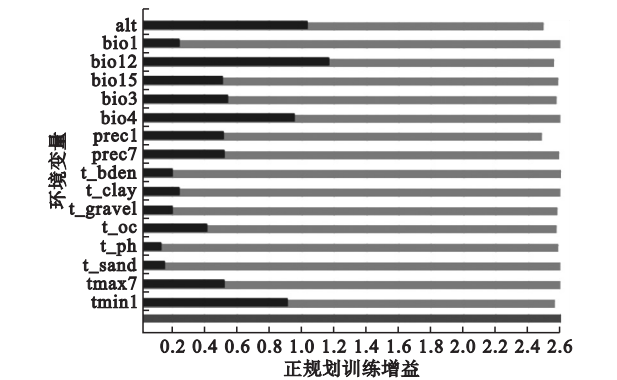


图 4 太白米预测结果 Jackknife 图
Fig.4 Jackknife result of prediction process of *Notholirion bulbuliferum*

3 讨论

近年来, 随着社会物质文化生活水平的提高, 绿

表 3 太白米各适生区环境变量的统计分析
Table 3 Statistical analysis of environmental variables in different suitable classes of *Notholirion bulbiferum*

环境变量	不适生区		低适生区		较适生区		最适生区		单位
	范围	平均值±标准差	范围	平均值±标准差	范围	平均值±标准差	范围	平均值±标准差	
bio12	12 ~ 5054	544. 7±513. 9	311 ~ 3078	908. 4±299. 3	457 ~ 2062	907. 6±209. 1	476 ~ 1870	870. 5±139. 4	mm
alt	-225 ~ 8233	1725. 4±1742. 1	-2 ~ 5353	2066. 0±1216. 0	255 ~ 4360	2326. 8±843. 4	466 ~ 3827	2551. 2±594. 9	m
tmin1	-402 ~ 178	-154. 5±112. 3	-235 ~ 119	-51. 7±79. 3	-192 ~ 87	-49. 2±51. 3	-177 ~ 78	-62. 7±36. 9	℃ * 10
prec1	0 ~ 402	10. 8±16. 8	0 ~ 35	8. 9±5. 5	0 ~ 28	6. 9±3. 1	0 ~ 18	5. 3±2. 1	mm
t-ph	4. 3 ~ 8. 9	6. 6±1. 1	4. 5 ~ 8. 3	6. 6±1. 1	4. 6 ~ 8. 4	6. 5±0. 9	4. 6 ~ 8. 3	6. 8±0. 8	-log(H ⁺)
bio3	17 ~ 55	30. 3±6. 4	17 ~ 55	36. 7±8. 8	22 ~ 52	39. 3±8. 0	21 ~ 50	39. 8±7. 8	-
t-gravel	0 ~ 35	9. 2±5. 9	1 ~ 28	8. 9±5. 4	1 ~ 28	7. 7±5. 4	1 ~ 26	6. 7±4. 0	% vol.
bio4	2403 ~ 17145	10216. 9±2964. 1	2856 ~ 11004	6459. 5±1578. 7	3279 ~ 9504	5948. 5±1374. 8	4115 ~ 9071	5966. 3±1137. 9	C of V
t-oc	0. 17 ~ 39. 4	1. 1±1. 0	0. 3 ~ 39. 4	1. 3±1. 8	0. 36 ~ 39. 4	1. 1±0. 7	0. 41 ~ 3. 02	0. 9±0. 5	% weight
tclay	2 ~ 67	19. 8±11. 4	4 ~ 56	22. 4±8. 3	5 ~ 55	22. 0±5. 1	6 ~ 48	20. 7±3. 5	% wt.
bio15	11 ~ 156	89. 9±23. 5	54 ~ 152	83. 4±11. 8	57 ~ 118	85. 7±9. 0	64 ~ 108	85. 7±9. 7	C of V
tmax7	-80 ~ 414	254. 0±73. 1	65 ~ 348	238. 9±55. 6	122 ~ 333	228. 6±38. 9	123 ~ 313	221. 1±25. 1	℃ * 10
prec7	2 ~ 1097	104. 5±77. 9	68 ~ 706	179. 8±61. 6	92 ~ 462	186. 9±50. 6	99 ~ 414	176. 1±39. 8	mm
tsand	4 ~ 97	46. 6±18. 4	14 ~ 90	40. 1±10. 1	21 ~ 89	41. 1±8. 2	23 ~ 82	42. 0±10. 5	% wt.
tbden	1. 18 ~ 1. 85	1. 45±0. 1	1. 21 ~ 1. 74	1. 40±0. 1	1. 22 ~ 1. 7	1. 40±0. 1	1. 25 ~ 1. 66	1. 41±0. 1	kg · dm ⁻³

色健康和回归自然的价值观开始深入人心,具有重要医用价值的药用植物资源日益引起关注。但是,中药生产产业的兴起使得药用植物的需求量急剧增加,这给本已脆弱的自然环境和野生资源造成了巨大压力,尤其是药用植物的生存环境急剧恶化。据文献记载并结合实地调查发现,太白米自然分布狭窄、生长缓慢而且繁殖系数低,导致太白米自然种群自我更新困难,加之乱采和过度采挖等人为破坏更是加剧了太白米野生资源的短缺,太白米远远不能满足市场需求(胡本祥,2007)。因此,通过规划太白米最适宜的野生资源保护区和人工栽培区来满足太白米的市场需求,从根本上缓解对野生资源的压力,是最行之有效的方法之一。

应用生态位模型预测珍稀濒危物种的潜在分布区,从而建立保护区或规划人工栽培是目前常用的方法。MaxEnt 模型以其简单易行,预测准确性高和可信度强等优点,自创建以来,已被大量用于许多物种的潜在分布预测和适宜性评价(郝朝运等,2011;张颖等,2011;Yang *et al.*, 2013)。本研究利用 Max-Ent 生态位模型和地理信息系统(ArcGIS)相结合,对珍稀濒危和药用价值高的药用植物太白米进行了潜在分布预测和适宜性评价。结果表明,太白米适宜生长区在我国的总面积为 322499 km²,其中最适生区(适生指数>0.5)主要集中分布在四川中北部的阿坝藏族羌族自治州和甘孜藏族自治州地区,四川南部的凉山彝族自治州地区,云南西北部的迪庆藏族自治州、丽江地区和西藏东南部的林芝地区,陕

西的秦岭太白山地区和甘肃南部的陇南地区。可见,太白米对气候与土壤等环境条件要求较为严格,最适生区和较适生区都主要集中在西北和西南的高海拔地区,主要以东西走向横跨陕西与甘肃的秦岭山脉、南北走向穿越四川、云南和西藏的横断山脉以及东西走向的西藏喜马拉雅山脉等地区为主。刀切法分析结果表明,海拔、年降水量、1 月降水量、1 月最低温和土壤 pH 是影响太白米分布的主要环境因子。这与太白米为后熟种子植物,种子细小,发芽率低,主要依靠小鳞茎进行无性繁殖密切相关。小鳞茎经冬眠后,在地温 5 ~ 10 ℃ 和湿度适宜的条件下开始萌发(胡本祥,2004)。因此,最冷月的最低温(即 1 月最低温)直接影响太白米的小鳞茎能否安全过冬,极寒冷地区不适宜其生存。降水量主要通过影响土壤的湿度来影响太白米的萌发和生长。太白米生长过程中喜阴湿、怕干旱,所以海拔和年降水量成为影响太白米生长最主要的环境因子。土壤是植物固定生活的必备场所,在自然状态下,既使气温、降水等气候要素可以满足太白米生长需求,土壤要素对其生长分布也具有一定的限制作用。预测结果表明,土壤 pH 对太白米适生等级的贡献率达 3.9%,最适生区土壤 pH 值为 6.77。这与前期胡本祥等(2008)对太白山实地土壤特性测定时发现太白米适合在偏酸性的土壤中生长的结果相一致。

综合分析表明,太白米最适宜在海拔平均 2550 m 左右,年均降水量在 870 mm,1 月份降水量在 5.3 mm,1 月份最低温在-6.3 ℃,土壤 pH=6.77(土壤

偏酸性)的地区生长。依据这一研究结果,可在预测的最适生区成立太白米的野生资源保护区,参考影响分布的关键环境因子,合理规划太白米仿野生栽培区。这既可以避免盲目引种造成的人力、物力和财力等资源的浪费,又可以提高太白米的产量和品质,是解决目前太白米野生资源不足和市场需求旺盛之间矛盾的最佳途径。

参考文献

- 郝朝运,谭乐和,范睿,等. 2011. 利用最大熵模型预测药用植物海南茜的潜在地理布局. 热带作物学报, **32**(8): 1561–1566.
- 胡本祥,张琳,王继涛,等. 2008. 太白米濒危因素研究(续)——太白米原产地的土壤成分分析研究. 陕西中医学院学报, **31**(2): 43–45.
- 胡本祥. 2004. 太白米栽培技术研究. 中草药, **35**(1): 96–97.
- 胡本祥. 2007. 太白米濒危因素研究之一——太白米植物的生活习性及其资源分布调查研究. 陕西中医学院学报, **30**(6): 49–52.
- 马松梅,张明理,张宏祥,等. 2010. 利用最大熵模型和规则集遗传算法模型预测孑遗植物裸果木的潜在地理分布及格局. 植物生态学报, **34**(11): 1327–1335.
- 屠鹏飞,吴卫中,郑俊华. 1999. 太白米的酚酸类成分研究. 药学学报, **34**(1B): 39–42.
- 吴卫中,田晶,屠鹏飞,等. 2000. 太白米的甾体生物碱类成分研究. 中草药, **31**(3): 167–169.
- 张颖,李君,林蔚,等. 2011. 基于最大熵生态位元模型的入侵杂草春飞蓬在中国潜在分布区的预测. 应用生态学报, **22**(11): 2970–2976.
- 朱耿平,刘国卿,卜文俊,等. 2013. 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, **21**(1): 90–98.
- Hanley JA, McNeil BJ. 1982. The meaning and use of the area under a Receiver Operating Characteristic (ROC) curve. *Radiology*, **143**: 29–36.
- Larson SR, DeGroote JP, Bartholomay LC, et al. 2010. Ecological niche modeling of potential west Nile virus vector mosquito species in Iowa. *Journal of Insect Science*, **110**: 1–17.
- Nabout JC, Soares TN, Diniz-Filho JA, et al. 2010. Combining

- multiple models to predict the geographical distribution of the Baru tree (*Dipteryx alata* Vogel) in the Brazilian Cerrado. *Ecology*, **30**: 911–919.
- Neftalí S. 2011. What does ecological modelling model? A proposed classification of ecological niche models based on their underlying methods. *Ecological Modelling*, **222**: 1343–1346.
- Peterson AT, Cohoon KP. 1999. Sensitivity of distributional prediction algorithms to geographic data completeness. *Ecological Modelling*, **117**: 159–164.
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, **190**: 231–259.
- Roberto M, Zamora R, Ramón J, et al. 2011. Predictive modeling of microhabitats for endemic birds in South Chilean temperate forests using Maximum entropy (Maxent). *Ecological Informatics*, **6**: 364–370.
- Rubio DG, Acosta EL. 2011. Geographical distribution of the space-weaving spider, *Chibchea salta*, from northwestern Argentina; New records and bioclimatic Modeling. *Journal of Insect Science*, **11**: 1–14.
- Swets JA. 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, **240**: 1285–1293.
- Vanagas G. 2004. Receiver operating characteristic curves and comparison of cardiac surgery risk stratification systems. *Interactive Cardio Vascular and Thoracic Surgery*, **3**: 319–322.
- Wang XY, Huang XL, Jiang LY, et al. 2010. Predicting potential distribution of chestnut phyllorid (Hemiptera: Phylloxeridae) based on GARP and Maxent ecological niche models. *Journal of Applied Entomology*, **134**: 45–54.
- Ward DF. 2007. Modeling the potential geographic distribution of invasive ant species in New Zealand. *Biological Invasions*, **9**: 723–735.
- Yang XQ, Kushwaha SPS, Saran S, et al. 2013. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. *Ecological Engineering*, **51**: 83–87.

作者简介 车乐,女,1989年生,硕士研究生,从事植物遗传学研究。E-mail: chelecheer@163.com

责任编辑 王伟