

朝鲜淫羊藿于中国东三省的潜在分布预测

徐翔 许瑶 谢婷 孙青青 田永兰 张化永*

(华北电力大学工程生态学与非线性科学研究中心, 北京 102206)

摘要 了解物种分布格局及其主要影响因子是进行科学合理保护和利用野生资源的重要基础和前提。朝鲜淫羊藿 (*Epimedium koreanum* Nakai) 作为东北地区重要的药用植物资源, 对其潜在分布格局进行预测, 探讨决定其分布格局的主要环境因子, 可为其种群保护和开发利用提供科学依据。本文基于朝鲜淫羊藿的 15 个地理分布点数据和 19 个气候以及 6 个土壤指标, 利用最大熵 (MaxEnt) 模型, 对朝鲜淫羊藿在东北三省的潜在分布区和适宜等级进行预测。结果表明: 朝鲜淫羊藿的潜在分布区主要位于辽宁省东部和吉林省南部, 面积达 170270 km²; 核心适生区位于辽宁省东部以及吉林省南部的温带落叶阔叶林区域, 面积达 80102 km²。最干月降水量和表层土壤有机碳含量分别是影响朝鲜淫羊藿分布的主要气候和土壤因子。本研究可为朝鲜淫羊藿药用植物资源的生境保护与人工栽培用地的合理布局提供科学依据。

关键词 最大熵模型; 朝鲜淫羊藿; 潜在分布区; 气候因子

Predicting the potential distribution of *Epimedium koreanum* Nakai in Northeast China. XU Xiang, XU Yao, XIE Ting, SUN Qing-qing, TIAN Yong-lan, ZHANG Hua-yong* (*Research Center for Engineering Ecology and Nonlinear Science, North China Electric Power University, Beijing 102206, China*).

Abstract: Understanding species distribution and its main influencing factors is important basis for the rational conservation and utilization of wild resources. *Epimedium koreanum* Nakai is an important medicinal plant resource in Northeast China. Predicting the potential distribution of *E. koreanum* and clarifying the driving factors can provide scientific basis for the conservation and exploitation of this species. In this study, we predicted the potential distribution and suitability grades of *E. koreanum* in Northeast China based on 15 occurrence records, 19 climatic factors and six soil factors using the Maximum Entropy (MaxEnt) model. We found that the potential distribution of *E. koreanum* were mainly located in eastern Liaoning and southern Jilin with an area of 170270 km². The core suitable habitats of *E. koreanum* were located in the temperate deciduous broad-leaved forests of eastern Liaoning and southern Jilin, with an area of 80102 km². The precipitation of the driest month and organic carbon content in topsoil were the major climatic and soil factors influencing its potential distribution, respectively. Our results will provide scientific basis for the habitat conservation and artificial cultivation of *E. koreanum*.

Key words: MaxEnt model; *Epimedium koreanum*; potential distribution; climatic factor.

物种的分布格局受到气候等环境因子的显著影响, 基于环境因子预测物种潜在分布格局是生态学和生物地理学的重要研究问题之一, 也是进行科学

保护和合理利用野生资源的重要基础和前提(杨志香等, 2014; 李家湘等, 2017; Qin *et al.*, 2017)。朝鲜淫羊藿 (*Epimedium koreanum* Nakai) 是小檗科 (Berberidaceae) 淫羊藿属 (*Epimedium*) 多年生草本植物, 具有较高的药用价值, 为重要的药用资源(杨利民等, 2007; 才燕等, 2016)。朝鲜淫羊藿大部分生长在海拔 500~1100 m 范围内的林下或者灌木丛中, 于

国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07101001-01、2015ZX07203-011、2015ZX07204-007 和 2009ZX07210-009) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (2017MS065) 资助。

收稿日期: 2017-10-12 接受日期: 2018-04-18

* 通讯作者 E-mail: bjecology@gmail.com

腐殖质含量较高、土质肥沃、土壤疏松的地方能达到成片分布(程岩等,2006;才燕等,2016)。然而,近些年由于采集过量且采集方法使用不当,朝鲜淫羊藿资源已遭到严重毁坏,野生资源数量急剧减少,亟需扩大人工栽培以便解决朝鲜淫羊藿供严重小于求的问题(何顺志,2014)。鉴于此,预测朝鲜淫羊藿在中国东北三省的潜在分布和适生等级,识别影响该物种分布和生长的主要环境因子,可为合理保护和利用朝鲜淫羊藿野生资源提供非常宝贵的理论依据,具有十分重要的科学和实践意义。

目前为止,已有多种生态位模型普遍应用于预测物种的潜在分布区,如:最大熵模型(maximum entropy, MaxEnt)、规则集遗传算法模型(genetic algorithm for rule-set production, GARP)和生态位因子分析(ecological niche factor analysis, ENFA)等(Phillips *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2010; 朱耿平等, 2013; 车乐等, 2014; 张颖等, 2015; 马松梅等, 2017; Shimizu-Kimura *et al.*, 2017)。大量研究表明,基于最大熵理论建立的 MaxEnt 模型对了解物种的分布规律十分有帮助,尤其是在物种分布数据不完整的情况下能够划分物种潜在分布区的适生等级,且普遍具有较高的可靠性,已在生物保护学、系统与进化学、生态学和药用植物学等学科中得到普及(Phillips *et al.*, 2006; 马松梅等, 2010; 高蓓等, 2015; 王雷宏等, 2015)。有研究表明,小的样本数能达到较高的预测精度是 MaxEnt 模型优于其模型的特点(陈新美等, 2012), Pearson 等(2007)通过对隐壁虎(*Cryptic geckos*)在马达加斯加的分布区进行预测,发现 Max-Ent 模型仅需很小的样本量(≥ 5)即可达到较高的预测精度。

本研究通过从中国数字植物标本馆等数据库获得的东北三省朝鲜淫羊藿的分布点数据,结合气候因子和与朝鲜淫羊藿生长相关的土壤因子的数据,利用 MaxEnt 模型预测朝鲜淫羊藿在中国东北三省的潜在分布区域,划分其适生等级,并识别与朝鲜淫羊藿潜在分布相关的主要环境因子。本研究可为深入了解朝鲜淫羊藿药用野生资源的整体分布概况奠定基础,同时为朝鲜淫羊藿的生境保护与人工栽培用地的合理布局提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 朝鲜淫羊藿分布点数据

朝鲜淫羊藿的地理分布数据来源于标本数据库

的检索,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.ac.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/>)等数据库得到标本采集地记录,总共统计得到的标本信息共 74 条。去除地理坐标不详和重复的分布点数据后,得到朝鲜淫羊藿在中国东北三省具有经纬度的分布点信息 15 条(图 1)。

1.2 环境因子数据

从空间分辨率为 $30''$ ($1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$) 的世界气候数据库 WorldClim (Hijmans *et al.*, 2005) 中提取 1950—2000 年全球平均气候的图层数据,共有 19 个生物气候因子(Bio1—Bio19)(表 1)。从空间分辨率为 $30''$ ($1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$) 的世界土壤数据库 HWSD (Harmonized World Soil Database) (FAO, 2012) 中提取与朝鲜淫羊藿生长密切相关的 6 个土壤因子,包括表层土壤容重、pH 值、含沙量、粘土含量、有机碳含量和碎石百分比(表 1)。朝鲜淫羊藿主要分布于我国吉林、辽宁和黑龙江省(中国科学院中国植物志编辑委员会, 2001; 程岩等, 2006)。利用 ArcGIS 10.3 软件的 Extract by mask 工具从世界气候和土壤图层数据中提取中国东北三省的气候和土壤图层数据用于后续研究。考虑到各环境因子之间可能存在多重共线性,本文分别对 19 个气候因子(附表 1)和 6 个土壤因子(附表 2)进行相关性分析,若相关系数 $|r| \geq 0.7$,则只保留对朝鲜淫羊藿有重要生态学

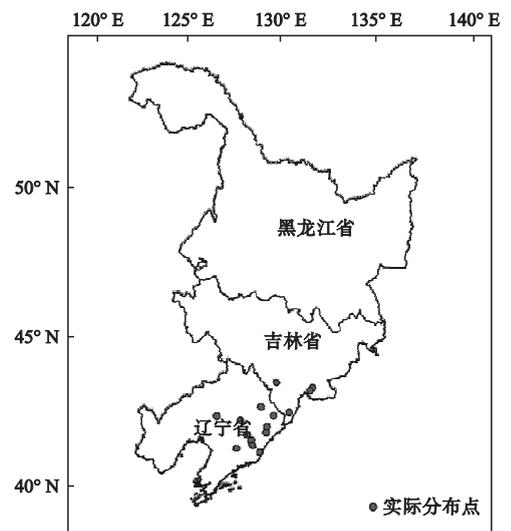


图 1 朝鲜淫羊藿在中国东北三省的分布点

Fig. 1 Distribution records of *Epimedium koreanum* in Northeast China

表 1 气候和土壤因子
Table 1 Climatic and soil variables

因子	描述
Bio1	年平均温度
Bio2	昼夜温差月均值 (Mean of monthly (max.temp.-min.temp.))
Bio3	昼夜温差与年温差比值 (Bio2/Bio7) (×100)
Bio4	温度季节变化 (Standard deviation×100)
Bio5	最热月份最高温
Bio6	最冷月份最低温
Bio7	年温度变化范围 (Bio5 - Bio6)
Bio8	最湿季平均温度
Bio9	最干季平均温度
Bio10	最暖季平均温度
Bio11	最冷季平均温度
Bio12	年均降水量
Bio13	最湿月降水量
Bio14	最干月降水量
Bio15	降水量季节性变异系数
Bio16	最湿季降水量
Bio17	最干季降水量
Bio18	最暖季降水量
Bio19	最冷季降水量
T_BD	表层土壤容重
T_PH	表层土壤 pH 值
T_SAND	表层土壤含沙量
T_CLAY	表层土壤黏土含量
T_OC	表层土壤有机碳含量
T_GRAVEL	表层土壤碎石百分比

意义的因子 (Aguirre-Gutiérrez *et al.*, 2013)。采用主成分分析 (principal component analysis, PCA) 方法挑选高权重因子视作对朝鲜淫羊藿有重要生态学意义的因子 (Xu *et al.*, 2017; 附表 3~5; 图 2~4)。最终选取 8 个环境因子 (Bio2、Bio5、Bio14、Bio15、T_PH、T_SAND、T_CLAY、T_OC) 用于模型预测。

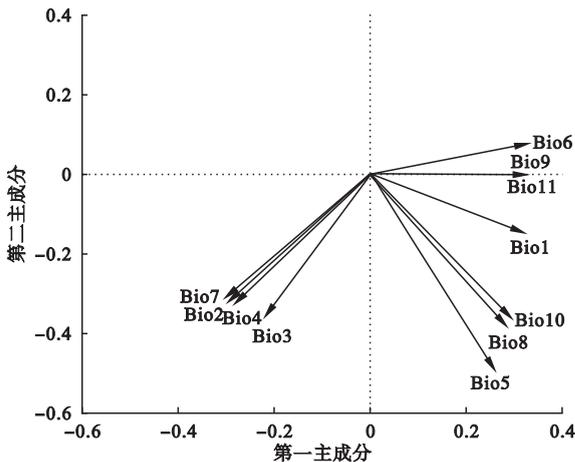


图 2 朝鲜淫羊藿 15 个分布点的气温空间
Fig.2 Temperature space for *Epimedium koreanum* across its 15 occurrence points

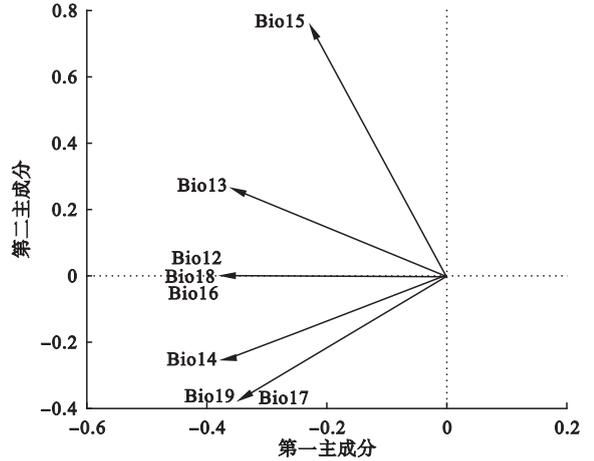


图 3 朝鲜淫羊藿 15 个分布点的降水空间
Fig.3 Precipitation space for *Epimedium koreanum* across its 15 occurrence points

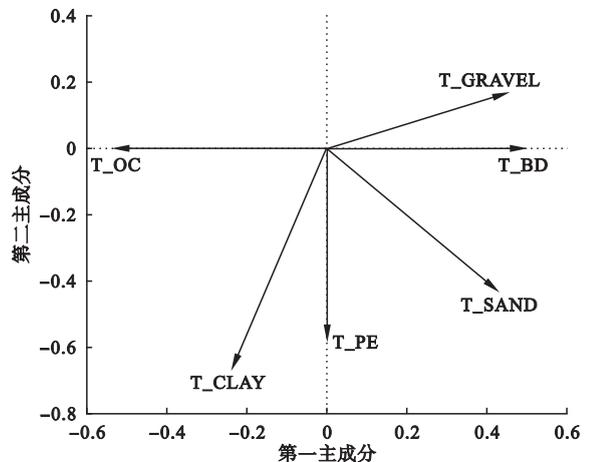


图 4 朝鲜淫羊藿 15 个分布点的土壤空间
Fig.4 Soil space for *Epimedium koreanum* across its 15 occurrence points

1.3 MaxEnt 模型分析

向 MaxEnt 模型软件 (Version 3.3.3) 中导入最终选取的 8 个环境因子数据和朝鲜淫羊藿的 15 个分布点数据, 设置最大迭代次数为 2000, 重复运算 10 次, 正则化乘数 (regularization multiplier, β) 为 1.8, 开启 Random seed, 选取 80% 朝鲜淫羊藿的真实分布点数据 (训练数据) 用于构建模型, 剩余的 20% 数据用来检验模型的准确性 (测试数据)。根据 MaxEnt 模型软件计算的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 (areas under the receiver operating characteristic curves) 来评价模型的拟合效果。AUC 取值在 0~1 范围内, 越趋近于 1 说明和随机分布差别越大, 预测物种的空间分布越受环境因子所

影响,即模型预测的结果越准确。AUC 值在 0.5~0.7 之间说明模型预测的准确程度较低,AUC 值在 0.7~0.9 之间说明模型预测的准确程度中等,AUC>0.9 表明模型预测的准确程度较高 (Swets, 1988; 车乐等, 2014; 徐军等, 2015)。使用刀切法 (jackknife) 分析各环境因子对朝鲜淫羊藿分布的贡献量。MaxEnt 模型输出存在概率 P 值表示朝鲜淫羊藿的适生程度,取值范围为 0~1, P 值越接近 1 表明朝鲜淫羊藿的分布概率越大,即适生程度越高。利用 ArcGIS 软件中的自然分割重分类 (Reclass by natural breaks) 工具将朝鲜淫羊藿的分布概率 P 值划分为 4 个适生等级不同的区域 (崔相艳等, 2016): $P<0.103$ 为不适生区, $0.103\leq P<0.281$ 为低适生区, $0.281\leq P<0.561$ 为中适生区, $P\geq 0.561$ 为高适生区。合并高和中适生区为核心适生区 (即 $P\geq 0.281$), 合并高、中和低适生区为潜在分布区 (即 $P\geq 0.103$)。

2 结果与分析

2.1 朝鲜淫羊藿潜在分布区预测

图 5 显示,朝鲜淫羊藿在中国东北三省的潜在分布区大部分位于中国辽宁省东部和吉林省南部,而黑龙江省鲜有分布。潜在分布区的面积为 170270 km²,约占全国陆地总面积的 1.77%。朝鲜淫羊藿的核心适生区主要落在温带落叶阔叶林区域,面积为 80102 km²。朝鲜淫羊藿的高适生区跨越 39.8° N—42.0° N, 123.6° E—128.6° E, 面积为 25675 km²。

表 2 MaxEnt 模型中各环境因子贡献率

Table 2 Contribution percentage of each environmental factor in MaxEnt modeling

环境因子	贡献率 (%)
Bio14	93.6
T_OC	4.8
Bio15	1.4
Bio5	0.1
T_PH	0
T_CLAY	0
T_SAND	0
Bio2	0

2.2 MaxEnt 模型预测精度

基于朝鲜淫羊藿在中国东北三省的 15 个分布点数据和 8 个环境因子数据建立的 MaxEnt 模型 AUC 值为 0.934±0.037,表明 MaxEnt 模型可以较好地拟合朝鲜淫羊藿的实际分布情况。

2.3 影响朝鲜淫羊藿分布的主要环境因子

各环境因子对中国东北三省朝鲜淫羊藿地理分布影响的贡献率排序为:最干月降水量 (93.6%)、表层土壤有机碳含量 (4.8%)、降水量季节性变异系数 (1.4%) 和最热月份最高温 (0.1%) (表 2)。气候因子的累积贡献率为 95.1%,而土壤因子的累积贡献率为 4.8%。

朝鲜淫羊藿的分布概率随着最干月降水量的增加而增大,随着表层土壤有机碳含量的增加而先增大后减少 (图 6)。朝鲜淫羊藿潜在分布区的环境特征为最干月降水量 > 5.9 mm 和表层土壤有机碳含量

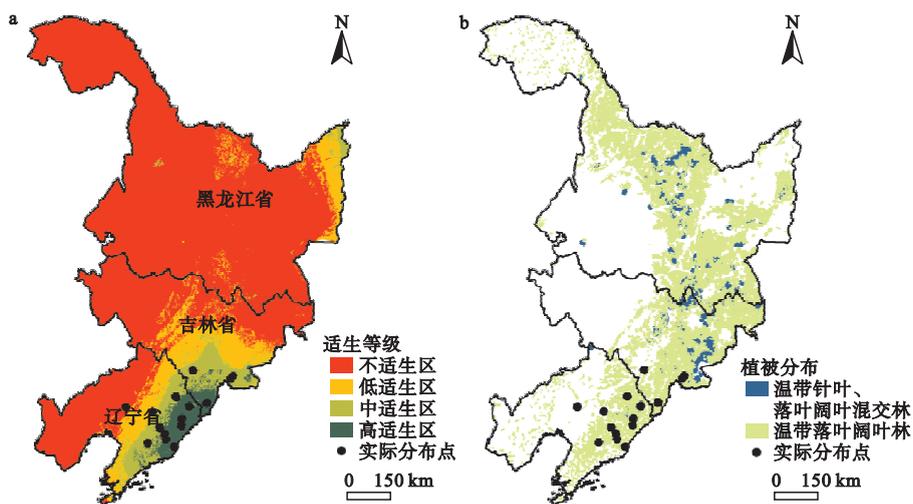


图 5 MaxEnt 模型预测的朝鲜淫羊藿分布图 (a) 和植被类型分布图 (b)

Fig.5 Distribution map of *Epimedium koreanum* predicted by the MaxEnt model (a) and vegetation type (b)

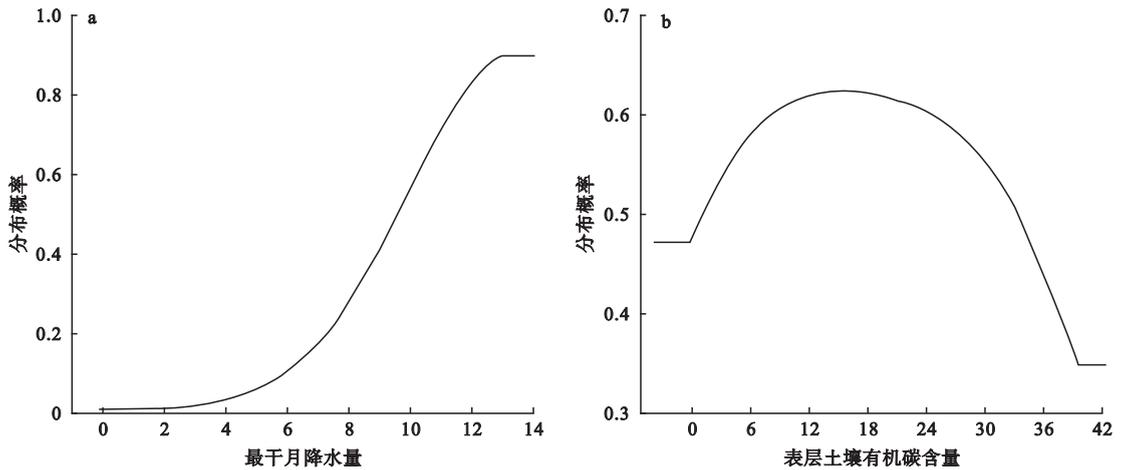


图 6 MaxEnt 模型分布概率值对最干月降水量和表层土壤有机碳含量的响应曲线

Fig.6 Response curves of the presence probability to precipitation of driest month and topsoil organic carbon content in MaxEnt model

<43.3%;核心适生区的环境特征为最干月降水量>8.0 mm 和表层土壤有机碳含量<43.3%;高适生区的环境特征为最干月降水量>9.9 mm 和表层土壤有机碳含量位于 4.6%~29.1%。

3 讨论

本研究基于中国数字植物标本馆和中国自然保护区资源平台中 15 份可靠的朝鲜淫羊藿分布点数据建立 MaxEnt 模型对朝鲜淫羊藿的潜在分布区进行了预测,结果表明,朝鲜淫羊藿的分布情况与 MaxEnt 模型的预测结果吻合度较高。以往的研究也发现,当样本量 ≥ 5 时,MaxEnt 模型的预测结果便具有很高的可靠性(Pearson *et al.*, 2007)。MaxEnt 模型所预测的朝鲜淫羊藿核心适生区大部分位于中国辽宁省的东部以及吉林省的南部。基于中国植被区划,由 MaxEnt 模型得到的朝鲜淫羊藿的核心适生区位于我国温带针叶阔叶混交林区域和暖温带落叶阔叶林的交错区。胡天印等(2008)指出,朝鲜淫羊藿作为典型的东亚成分生长在辽宁和吉林两省,具有中国-日本分布模式的特征。王哲等(2016)对朝鲜淫羊藿于吉林省内分布的研究得出该物种主要分布于吉林省南部。董然等(2003)研究表明,朝鲜淫羊藿于长白山区 500~1100 m 内的阔叶林或针阔混交林下生长最为密集。本文与前人的研究结果一致。

比较朝鲜淫羊藿的真实分布点和 MaxEnt 模型得到的朝鲜淫羊藿核心适生区可以看出,朝鲜淫羊藿的真实分布点几乎全部落在核心适生区内,表明

MaxEnt 模型的预测结果与朝鲜淫羊藿的真实分布具有相当高的吻合度。目前朝鲜淫羊藿的主产区为吉林省长白山区和敦化市,其中吉林省长白山区群居大小在 1000 株以上(刘玉等,2006;徐艳琴等,2008),大部分位于 MaxEnt 模型预测的核心适生区。这表明朝鲜淫羊藿的真实分布情况可以较精确地由不同的适生等级所反映。通过观察 MaxEnt 模型预测的朝鲜淫羊藿分布图,我们发现,朝鲜淫羊藿产量最大的产区吉林省长白山区并没有占据最大面积的高适生区,而辽宁省东部的高适生区面积更大。出现这一现象的可能原因是,本研究采用的样点数据主要针对野生朝鲜淫羊藿,栽培样本所占比例极小,本研究的结果主要反映了朝鲜淫羊藿的自然分布状况。而朝鲜淫羊藿作为吉林省长白山区农民重要的增收途径,吉林省更加注重朝鲜淫羊藿育种、栽培和生产技术等方面(徐艳琴等,2008)。这也充分说明辽宁省等其他适合朝鲜淫羊藿分布的地区在该产业方面还有巨大的发展空间。

本研究利用 MaxEnt 模型揭示了在较大尺度上影响朝鲜淫羊藿分布的主导环境因子为最干月降水量,而土壤因子对朝鲜淫羊藿分布的影响并不大。以往的研究也有类似发现,如朱耿平等(2013)发现,在大尺度范围内,气象因子对物种分布具有显著影响,土壤理化性质在小尺度下才会对物种分布产生较显著的影响。王哲等(2016)指出,降水是影响朝鲜淫羊藿生长的主要环境因子。另外,其他药用草本植物的分布也受气温和降水因子的主导影响,但影响不同物种分布的主要气候因子存在差异。例

如,主导我国忍冬 (*Lonicera japonica*)、射干 (*Belamcanda chinensis*) 和吴茱萸 (*Evodia rutaecarpa*) 分布的气候因子为最冷季度平均温度 (崔晋亮, 2015); 影响我国何首乌 (*Fallopia multiflora*) 分布的主要气候因子为最热月份平均最高温 (陈亚等, 2011); 影响三七 (*Panax pseudoginseng* var. *notoginseng*) 分布的主要气候因子为最暖季降水量 (张琴等, 2016)。

出于加强保护和合理利用朝鲜淫羊藿野生药用资源的考虑, 应将 MaxEnt 模型预测的朝鲜淫羊藿高适生区列入调查研究的重点区域, 优先研究与保护生长在此范围内的朝鲜淫羊藿, 将更有利于保护朝鲜淫羊藿的遗传多样性。本研究结果说明, 根据中国数字植物标本馆等数据库搜集的植物分布的经纬信息以及相应的环境因子数据, 使用 MaxEnt 模型构建朝鲜淫羊藿的生态位模型, 有利于了解药用植物的地理分布, 并为保护、发掘和利用药用植物资源提供科学依据。

参考文献

才燕, 董然, 赵春莉, 等. 2016. 朝鲜淫羊藿繁育栽培技术. 北方园艺, (6): 137-139.

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. 生态学杂志, **33**(6): 1623-1628.

陈亚, 江滨, 曾元儿. 2011. 基于地理信息系统的何首乌地理分布与气候关系研究. 中国现代中药, **13**(5): 10-13.

陈新美, 雷渊才, 张雄清, 等. 2012. 样本量对 MaxEnt 模型预测物种分布精度和稳定性的影响. 林业科学, **48**(1): 1-7.

程岩, 王乃利, 王新彦, 等. 2006. 朝鲜淫羊藿的化学成分. 沈阳药科大学学报, **23**(10): 644-647.

崔晋亮. 2015. 气候变化对三种常用药用植物分布的潜在影响 (硕士学位论文). 西安: 陕西师范大学.

崔相艳, 王文娟, 杨小强, 等. 2016. 基于生态位模型预测野生油菜的潜在分布. 生物多样性, **24**(10): 1117-1128.

董然, 冯玉才, 刘丽娟, 等. 2003. 朝鲜淫羊藿规范化育苗技术. 吉林农业大学学报, **25**(6): 637-638.

高蓓, 卫海燕, 郭彦龙, 等. 2015. 应用 GIS 和最大熵模型分析秦岭冷杉潜在地理分布. 生态学杂志, **34**(3): 843-852.

何顺志. 2014. 中国淫羊藿属植物彩色图鉴. 贵阳: 贵州科技出版社.

胡天印, 郭水良. 2008. 中国十大功劳属和淫羊藿属植物分布式样的统计分析. 浙江师范大学学报: 自然科学版, **31**(2): 208-213.

李家湘, 熊高明, 徐文婷, 等. 2017. 中国亚热带灌丛植物生活型组成及其与水热因子的相关性. 植物生态学报, **41**(1): 147-156.

刘玉, 李道红. 2006. 长白山区朝鲜淫羊藿林下仿生栽培技术. 农业与技术, **26**(5): 103-104.

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.

马松梅, 魏博, 李晓辰, 等. 2017. 气候变化对梭梭植物适宜分布的影响. 生态学杂志, **36**(5): 1243-1250.

王雷宏, 杨俊仙, 徐小牛. 2015. 基于 MaxEnt 分析金钱松适生的生物气候特征. 林业科学, **51**(1): 127-131.

王哲, 李波, 刘铭琪, 等. 2016. 基于 GIS 技术的吉林省朝鲜淫羊藿生态特征及适生区研究. 中国现代中药, **18**(7): 891-898.

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. 生态学杂志, **34**(12): 3354-3359.

徐艳琴, 李作洲, 张学军, 等. 2008. 三种药用淫羊藿的地理分布与资源调查. 植物科学学报, **26**(1): 91-98.

杨利民, 韩梅, 吴劲松, 等. 2007. 朝鲜淫羊藿 (*Epimedium koreanum* Nakai) 不同生境种群生物量与更新潜力. 生态学报, **27**(6): 2251-2258.

杨志香, 周广胜, 殷晓洁, 等. 2014. 中国兴安落叶松天然林地理分布及其气候适宜性. 生态学杂志, **33**(6): 1429-1436.

张琴, 曾凡琳, 张东方, 等. 2016. 基于最大熵模型的三七生态适宜区及生态特征. 药学报, **51**(10): 1629-1637.

张颖, 章超斌, 郝建华, 等. 2015. 入侵害虫葡萄根瘤蚜在中国的潜在适生区预测. 生态学杂志, **34**(7): 1986-1993.

中国科学院中国植物志编辑委员会. 2001. 中国植物志. 北京: 科学出版社.

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.

Aguirre-Gutiérrez J, Carvalheiro LG, Polce C, et al. 2013. Fit-for-Purpose: Species distribution model performance depends on evaluation criteria-Dutch Hoverflies as a case study. *PLoS ONE*, **8**: e63708.

FAO. 2012. Harmonized World Soil Database (version 1.2). FAO, Rome, Italy IASA, Laxenburg, Austria.

Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, et al. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, **25**: 1965-1978.

Pearson RG, Raxworthy CJ, Nakamura M, et al. 2007. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: A test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*, **34**: 102-117.

Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, **190**: 231-259.

Phillips SJ, Dudík M. 2008. Modeling of species distributions with maxent: New extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, **31**: 161-175.

Qin AL, Liu B, Guo QS, et al. 2017. Maxent modeling for predicting impacts of climate change on the potential distribution of *Thuja sutchuenensis* Franch., an extremely endangered conifer from southwestern China. *Global Ecology and Conservation*, **10**: 139-146.

Shimizu-Kimura Y, Accad A, Shapcott A. 2017. The relation-

ship between climate change and the endangered rainforest shrub *Triunia robusta* (Proteaceae) endemic to southeast Queensland, Australia. *Scientific Reports*, **7**: 46399.

Swets JA. 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, **240**: 1285.

Wang XY, Huang XL, Jiang LY, *et al.* 2010. Predicting potential distribution of chestnut phylloxerid (Hemiptera: Phylloxeridae) based on GARP and Maxent ecological niche models. *Journal of Applied Entomology*, **134**: 45-54.

Xu X, Zhang HY, Xie T, *et al.* 2017. Effects of climate change on the potentially suitable climatic geographical range of *Liriodendron chinense*. *Forests*, **8**: 399.

作者简介 徐翔,女,1987年生,博士研究生,研究方向为生物多样性与气候变化。E-mail: xuxiang229@163.com
责任编辑 张敏

附表1 气候因子的相关系数矩阵

Appendix Table 1 Pearson correlation coefficients (*r*) among the climatic variables

因子	Bio1	Bio2	Bio3	Bio4	Bio5	Bio6	Bio7	Bio8	Bio9	Bio10	Bio11	Bio12	Bio13	Bio14	Bio15	Bio16	Bio17	Bio18
Bio2	-0.78																	
Bio3	-0.52	0.85																
Bio4	-0.76	0.90	0.58															
Bio5	0.86	-0.43	-0.28	-0.33														
Bio6	0.95	-0.92	-0.66	-0.90	0.68													
Bio7	-0.81	0.96	0.70	0.98	-0.41	-0.95												
Bio8	0.94	-0.56	-0.36	-0.50	0.97	0.80	-0.57											
Bio9	0.98	-0.87	-0.58	-0.88	0.73	0.99	-0.91	0.84										
Bio10	0.95	-0.59	-0.40	-0.52	0.97	0.81	-0.59	1.00	0.86									
Bio11	0.98	-0.87	-0.58	-0.88	0.73	0.99	-0.91	0.84	1.00	0.86								
Bio12	-0.09	-0.08	0.13	-0.39	-0.44	0.01	-0.21	-0.34	0.05	-0.32	0.05							
Bio13	0.18	-0.34	-0.07	-0.61	-0.22	0.29	-0.46	-0.11	0.32	-0.08	0.32	0.95						
Bio14	-0.25	-0.03	0.06	-0.28	-0.59	-0.11	-0.12	-0.50	-0.10	-0.48	-0.10	0.94	0.84					
Bio15	0.65	-0.57	-0.21	-0.80	0.32	0.67	-0.70	0.45	0.73	0.47	0.73	0.61	0.79	0.38				
Bio16	-0.03	-0.12	0.12	-0.43	-0.38	0.07	-0.25	-0.28	0.11	-0.26	0.11	1.00	0.97	0.91	0.67			
Bio17	-0.45	0.17	0.21	-0.08	-0.72	-0.32	0.09	-0.66	-0.31	-0.64	-0.31	0.91	0.76	0.97	0.26	0.87		
Bio18	-0.04	-0.10	0.13	-0.42	-0.39	0.06	-0.24	-0.28	0.10	-0.26	0.10	1.00	0.97	0.91	0.67	1.00	0.88	
Bio19	-0.45	0.17	0.21	-0.08	-0.72	-0.32	0.09	-0.66	-0.31	-0.64	-0.31	0.91	0.76	0.97	0.26	0.87	1.00	0.88

附表2 土壤因子的相关系数矩阵

Appendix Table 2 Pearson correlation coefficients (*r*) among the soil variables

因子	T_BD	T_PH	T_SAND	T_CLAY	T_OC
T_PH	-0.08				
T_SAND	0.83	0.35			
T_CLAY	-0.18	0.46	0.23		
T_OC	-0.87	-0.08	-0.69	0.50	
T_GRAVEL	0.49	0.13	0.48	-0.62	-0.77

附表3 主成分分析中气温因子的载荷

Appendix Table 3 Loading factors of temperature variables used in the principal component analysis

因子	第一主成分	第二主成分
Bio1	0.33	-0.15
Bio2	-0.30	-0.33
Bio3	-0.22	-0.36
Bio4	-0.29	-0.33
Bio5	0.26	-0.49
Bio6	0.34	0.08
Bio7	-0.30	-0.31
Bio8	0.29	-0.39
Bio9	0.34	≈0
Bio10	0.30	-0.37
Bio11	0.34	≈0

附表4 主成分分析中降水因子的载荷

Appendix Table 4 Loading factors of precipitation variables used in the principal component analysis

因子	第一主成分	第二主成分
Bio12	-0.38	≈0
Bio13	-0.37	0.27
Bio14	-0.36	-0.25
Bio15	-0.23	0.76
Bio16	-0.38	≈0
Bio17	-0.35	-0.37
Bio18	-0.38	≈0
Bio19	-0.35	-0.37

附表5 主成分分析中土壤因子的载荷

Appendix Table 5 Loading factors of soil variables used in the principal component analysis

因子	第一主成分	第二主成分
T_BD	0.495	≈0
T_PH	≈0	-0.581
T_SAND	0.436	-0.432
T_CLAY	-0.236	-0.66
T_OC	-0.543	≈0
T_GRAVEL	0.46	0.171