

DOI: 10.5846/stxb201605030837

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.
Zhang D F, Zhang Q, Guo J, Sun C Z, Wu J, Nie X, Xie C X. Research on the global ecological suitability and characteristics of regions with *Angelica sinensis* based on the MaxEnt model. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(15): 5111-5120.

基于 MaxEnt 模型的当归全球生态适宜区和生态特征研究

张东方^{1,2}, 张 琴¹, 郭 杰¹, 孙成忠³, 吴 杰⁴, 聂 祥⁵, 谢彩香^{1,*}

1 中国医学科学院, 北京协和医学院 药用植物研究所, 北京 100193

2 江苏师范大学, 徐州 221116

3 中国测绘科学研究院, 北京 100039

4 中国中医科学院中药研究所, 北京 100029

5 贵州省毕节市气象局, 毕节 551714

摘要: 研究药用植物当归在全球范围内的生态适宜区和生态特征, 根据 109 个当归样本点和 37 个生态因子, 利用最大信息熵模型(MaxEnt)和地理信息系统(Geographic information System, GIS)对其进行全球适宜性区划。结果表明, 当归生态适宜区主要集中在北纬 20—50°范围内的北美洲、欧洲、亚洲和南纬 15—35°范围内的南美洲和非洲, 共约 593.07 万 km²。其中生态相似度最高的区域主要分布在中国甘肃省南部、四川省、西藏自治区东部、云南省北部、贵州省、陕西省西南部等地区, 可见中国十分适合当归的种植, 是当归的主产区。影响当归地理分布的主要气候因子适宜值范围分别为: 最暖季降水量为 300—700 mm, 最冷季平均温为 -3—7℃, 降水的季节性数值为 70—98; 影响当归地理分布的主要土壤因子适宜值范围分别为: 碳酸钙含量为 50%—60%, 粘土比重为 17%—24%。研究结果为当归人工引种栽培及精细化种植管理提供参考。

关键词: 当归; 最大信息熵模型; 地理信息系统; 生态适宜性; 生态特征

Research on the global ecological suitability and characteristics of regions with *Angelica sinensis* based on the MaxEnt model

ZHANG Dongfang^{1,2}, ZHANG Qin¹, GUO Jie¹, SUN Chengzhong³, WU Jie⁴, NIE Xiang⁵, XIE Caixiang^{1,*}

1 Institute of Medicinal Plant Development, Peking Union Medical College, Chinese Academy of Medical Sciences, Beijing 100193, China

2 Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China

3 Chinese Academy of Surveying & Mapping, Beijing 100039, China

4 Institute of Chinese Materia Medica, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100029, China

5 Meteorological Bureau of Bijie of Guizhou Province, Bijie 551714, China

Abstract: In order to investigate the global ecological suitability and characteristics of regions for the medicinal plant *Angelica sinensis*, a maximum entropy model (MaxEnt) and geographic information system (GIS) technology were used to investigate global ecology suitability regions based on 109 sample points of *A. sinensis* and 37 ecological factors. The results showed that global ecological regions that are suitable for *A. sinensis* are located mainly in the range of 20—50°N and 15—35°S, which includes sections of North America, Europe, Asia, South America and Africa. The total area of suitable regions found was about 5930700 km². The regions with the most similarity were found to be mainly in the south of Gansu

基金项目: 国家自然科学基金项目(81473304, 81130069); 国家科技支撑计划课题(2015BAI05B01); 国家科技支撑计划(2011BAI07B08); 重大新药创制国家科技重大专项(2014ZX09304307001)

收稿日期: 2016-05-03; **网络出版日期:** 2017-03-22

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

province, Sichuan, the east of the Tibet Autonomous Region, the north of Yunnan province, Guizhou, the southwest of Shanxi province, and other nearby regions. These results signify that China is very suitable for the cultivation and production of *A. sinensis*. The climatic factors that were found to affect the distribution of *A. sinensis* were mainly precipitation during warmest quarter, mean temperature of the coldest quarter, and the coefficient of variation of precipitation seasonality, with the most suitable value ranges being 300—700 mm, $-3-7^{\circ}\text{C}$ and 70—98 respectively. The soil factors affecting the distribution of *A. sinensis* were found to be mainly the calcium carbonate (lime) content and percentage clay, the value ranges of which were found to be 60%—0% and 17%—24%, respectively, in the ecologically suitable regions. These results provide a scientific reference for the refinement of the artificial cultivation of *A. sinensis*.

Key Words: *Angelica sinensis*; maximum entropy model; geographic information system; ecological suitability; ecological characteristics

当归为伞形科(Umbelliferae)当归属(*Angelica*)植物当归(*Angelica sinensis* (Oliv.) Diels.)的干燥根,是临床常用中药,素有“十方九归”之称^[1],现代药理研究表明:当归在心脏保护、胃肠保护、抗辐射和抗肿瘤以及镇痛等方面均有较好疗效^[2-5]。当归作为传统出口大宗药材,不仅用于配方,而且在传统膳食及保健品中均有较多应用,全年销量达到 13000—15000 t^[6]。

当归属植物主要分布于北温带地区,北美和东亚为其世界分布中心,东亚则以中国种类最丰,在日本、朝鲜和越南也有当归栽培品^[7]。我国当归产地广泛分布于甘肃、云南、贵州、四川、陕西、青海、湖南、湖北等地^[8-9]。目前当归主要来源于栽培,虽然有着悠久的栽培历史及广泛的应用前景,但是当归存在种质资源退化、栽培技术落后、质量下降等问题,而且栽培过程中还存在着严重的连作障碍,导致当归可栽培土地逐渐减少,其产量远远跟不上市场需求,严重影响着当归的现代化发展。

气候和土壤是决定物种分布的最主要因素,近年来已经有很多国内外学者研究了环境因子对植物潜在分布的影响^[10-11],但对当归的研究目前主要集中在植物学、栽培学、药理药效、临床应用和化学成分提取等方面,当归在全球的资源分布及生态适宜性研究鲜有报道。为了避免盲目引种扩种和连作障碍等问题带来的经济损失,研究当归全球适宜性区划及其生态特征,对当归科学引种栽培及精细化种植管理具有重大意义。本文利用 GIS 技术和最大信息熵模型,通过数据库和文献检索,收集当归分布信息,结合气候、地形和土壤等相关生态因子,对当归地理分布进行区划,找出影响当归分布的主要生态因子以及最适合生长的区域,为当归人工引种栽培及选址提供参考,以提高当归质量和产量,实现中药产业可持续发展。

1 材料

1.1 最大信息熵模型

最大信息熵模型 MaxEnt 软件(版本为 3.3.3 k)来源于官网(<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent>),MaxEnt 模型是一种基于最大熵理论而提出的生态位模型^[12-13],是把研究区所有栅格单元作为最大熵的可能分布空间,将已知物种分布点的栅格单元作为样点,根据样点单元的环境变量得出约束条件,寻找此约束条件下的最大熵的可能分布^[14-15],具有操作简单、运算速度快、预测结果好等优点^[16-19]。

1.2 当归分布数据

根据全球生物多样性信息数据库网络(GBIF, <http://www.gbif.org/>)和中国数字植物标本馆(CVH, <http://www.cvh.org.cn/>)以及文献检索得到全球 109 个当归样本点,主要分布在亚洲、美洲等(如图 1)。

1.2 环境数据

气候数据和高程数据来源于世界气候网(<http://www.worldclim.org/>),坐标系为 WGS84,栅格大小约为 25km²。气候数据为 1950 年至 2000 年监测数据的平均值,共 19 个气候因子,图层中的温度数值($^{\circ}\text{C}$)为实际数值 $\times 10$ 。地形数据包括高程、坡度和坡向数据,其中坡度和坡向数据利用 ArcGIS 软件对高程数据进行表面

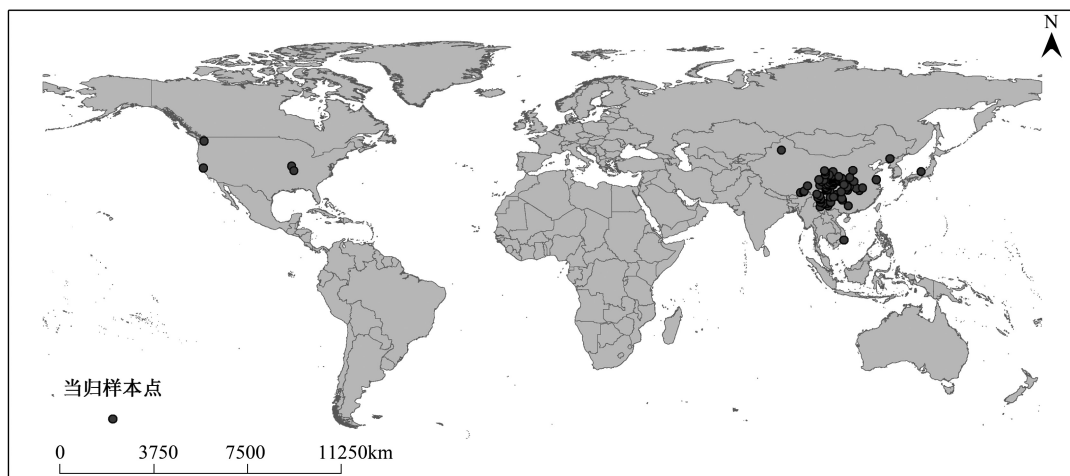


图 1 当归样本分布图

Fig.1 Sample distribution of *Angelica sinensis*

分析得到。土壤数据来自世界土壤数据库(<http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/>),坐标系为 WGS84,栅格大小约为 1km^2 ,共 15 个土壤因子,则全部生态因子共 37 个。地图资料来源于国家基础地理信息系统(<http://nfgis.nsd.gov.cn/>)。

2 方法

2.1 数据预处理

采用 ENVI4.8 和 ArcGIS 10.0 对土壤数据进行重采样,得到与气候数据相同的栅格大小,同时对土壤数据进行格式转换,得到与气候数据和海拔数据相同的数据格式(.asc),可直接加载于 MaxEnt 软件。当归样本点数据文件保存为 csv 格式。

2.2 MaxEnt 模型参数设置

将分布点数据(csv 格式)和生态因子数据集导入 MaxEnt 软件中,设置参数建模运行,具体参数设置为:设置刀切法检验权重,MaxEnt 自定义设置 ROC 评价曲线,其他参数设置为软件默认值。

2.3 区划结果可信度和准确度

本实验应用 ROC 曲线和 AUC 值对预测结果进行精度评价。ROC 曲线分析法在物种潜在分布预测模型评价中得到了广泛的应用,是目前认可度较高的诊断试验评价指标^[20-22]。通过计算 ROC 接受曲线下方的面积得到 AUC 值,AUC 的数值范围为 0.5—1,值越大表示预测越精确。

2.4 当归生态适宜区划

利用 ArcGIS 10.0 软件对 MaxEnt 模型计算的结果进行叠加分析和地图制作,绘制出基于主要生态因子的当归生态适宜区划全球图,采用人工分级方法基于生态相似度划分出不同等级分布区域,其生态相似度共划分为 <10%,10%—30%,30%—50%,50%—70% 和 >70% 5 个等级,并确定当归生态适宜分布区与行政归属范围。通过 MaxEnt 模型运行结果中的响应曲线得出生态因子适宜值范围。

3 结果与分析

3.1 区划结果可信度和准确度

AUC 指的是 ROC 曲线与横坐标围成的区域面积,其大小反映了模型模拟效果的准确性,数值越大,模型模拟的准确性越高。如图 2 所示,训练集 AUC 值达到 0.989,测试集 AUC 值达到了 0.967,表明模型模拟效果达到极高的水平,由模型运算得出的当归生态适宜区划具有较高的可信度和准确度。

3.2 生态因子贡献率

MaxEnt 模型自动输出各个生态因子贡献率,其中贡献率较大的几个生态因子从大到小依次是最暖季降水量、最冷季平均温、碳酸钙含量、降水的季节性、坡度、气温的季节性、粘土比重、海拔、土壤中粘粒组的阳离子交换能力、气温年范围等,其累计贡献率为 92%,见表 1。

3.3 当归分布区气候特征

基于各气候因子响应曲线(图 3)可知,当存在概率大于 0.5 时,其对应的生态因子值比较适合当归的生长^[23]。

(1)最暖季降水量(贡献率 26.5%) 在约 250mm 以下时,当归的存在概率极低,在 0.5 以下。随着最暖季降水量变大,当归存在概率迅速提高,约为 650mm 时达到最大。随后,随着最暖季降水量变大,当归存在概率降低,当最暖季降水量达到 700mm 时,当归存在概率降到 0.4 以下,随着降水量的增大,存在概率略有增加,但小于 0.5。以存在概率 0.5 以上为适宜范围,因此,当归最暖季降水量的适宜范围约为 300—700 mm。

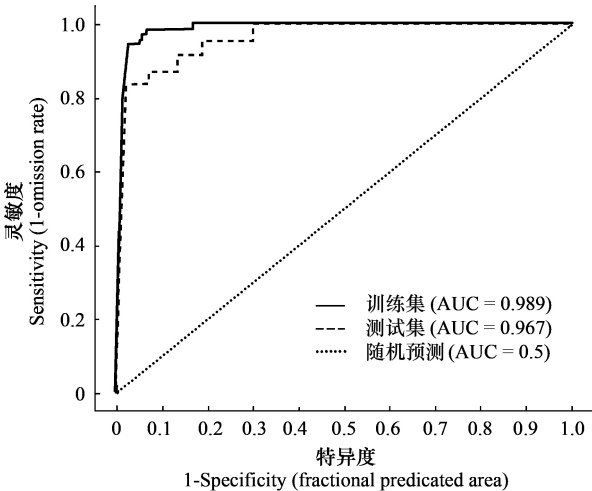


图 2 基于 MaxEnt 模型预测当归全球分布的 ROC 曲线
Fig.2 The ROC curve predicting the distribution of *Angelica sinensis* based on MaxEnt

表 1 生态因子贡献率
Table 1 Contribution rate of ecological factors

生态因子 Ecological factors	百分比贡献/% Contribution rate	生态因子 Ecological factors	百分比贡献/% Contribution rate
最暖季降水量	26.5	最冷季降水量	0.5
最冷季平均温	15.4	等温性	0.4
碳酸钙含量	9.5	最干季平均温	0.4
降水的季节性	8.6	年降水量	0.3
坡度	7.4	坡向	0.2
气温的季节性	7.3	最冷月最低温	0.1
粘土比重	6.3	土壤的容积(体积)密度	0.1
海拔	4.8	最湿季降水量	0.1
土壤中粘粒组的阳离子交换能力	3.7	泥沙比重	0.1
气温年范围	3.4	最暖月最高温	0.1
交换性钠的比例	2.1	硫酸钙含量	0.1
最干月降水量	1.7	最湿季平均温	0.1
年均温	0.6		

(2)最冷季平均温(贡献率 15.4%) 在约 -11℃ 以下时,当归存在概率很低,在 0.1 以下。随着温度升高,存在概率变大,约 7℃ 时达到最大,随后随着温度升高,当归存在概率降低,在 11℃ 时降到 0.1 以下。根据存在概率 0.5 以上为适宜范围,当归最冷季平均温的适宜范围约为 -3—7 ℃。

(3)降水的季节性(贡献率 8.6%) 在约 55 以下时,当归存在概率低于 0.3,随着其上升,存在概率不断变大,当存在概率为 0.5 时,降水的季节性为 70,降水的季节性为 80 时存在概率最大,然后不断下降。因此存在概率为 0.5 以上时,当归分布区降水的季节性范围约为 70—98。

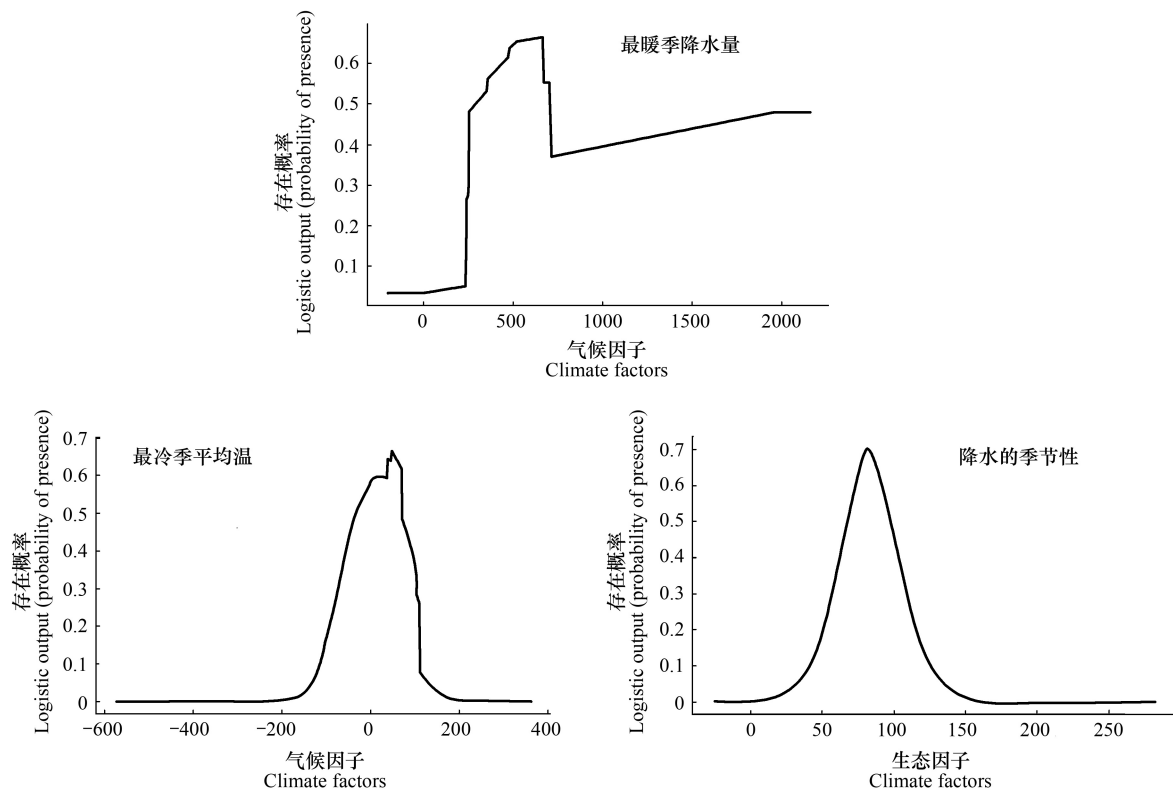


图 3 主要气候因子响应曲线:最暖季降水量、最冷季平均温和降水的季节性

Fig.3 Response curves of three main climate factors: Precipitation of warmest quarter, Mean temperature of coldest quarter and Coefficient of variation of precipitation seasonality

3.4 当归分布区土壤特征

基于各土壤因子响应曲线(图 4)可知适合当归种植的土壤因子范围。

(1) 碳酸钙含量(9.5%),当碳酸钙含量约为 55%时,当归的存在概率为 0.5,随着碳酸钙含量增加当归的存在概率也不断增加,当碳酸钙含量约为 60%时,存在概率达到最大,当碳酸钙含量继续增加时,存在概率反而先下降后上升然后下降,但是根据实际情况可知,碳酸钙的含量范围一般为 0—1,因此碳酸钙含量的适宜性范围值约为 55%—60%。

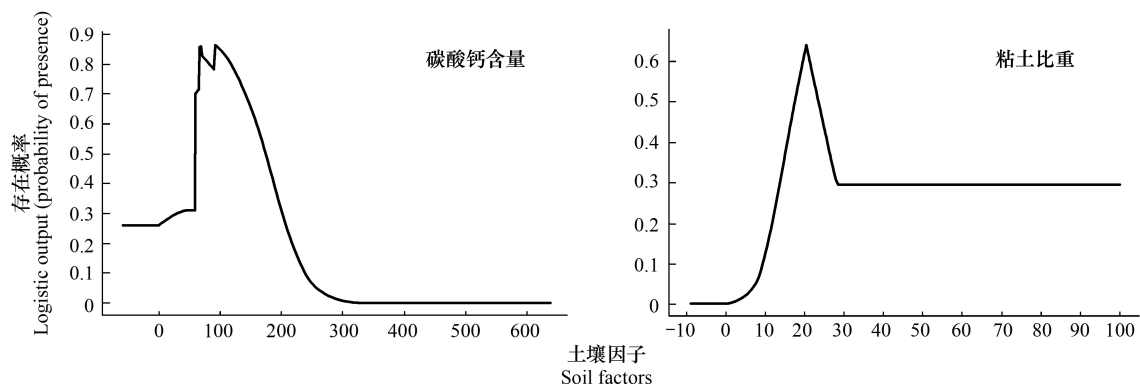


图 4 主要土壤因子响应曲线:碳酸钙含量和粘土比重

Fig.4 Response curves of two main soil factors:the calcium carbonate (lime) content in top- and subsoil and Percentage clay respectively in the top- and subsoil

(2)粘土比重(6.3%),当粘土比重约为14%时,存在概率为0.3,粘土比重约为17%时,存在概率为0.5,随着粘土比重加大,存在概率达到最大后变小,当粘土比重变为24%时,存在概率再次降至0.5,因此粘土比重的适宜范围值约为17%—24%。

3.5 当归生态区划

基于 MaxEnt 模型获得的当归生态区划结果,其存在概率取值在0到0.929之间,对其进行归一化处理,将存在概率值归一化到0到1之间,根据专家经验法确定70%以上为相似度最高等级,以20%间隔划分出小于10%,10%至30%,30%至50%,50%至70%和大于70%,共5个等级。

3.5.1 当归全球区划

当归潜在生态适宜区域主要分布在北半球北纬20—50°范围内的北美洲,欧洲,亚洲以及南半球南纬15—35°范围内的南美洲和非洲(图5),共约593.07万km²。北美洲的生态适宜区域主要位于美国中部的南达科他州、内布拉斯加州、奥克拉荷马州、堪萨斯州、德克萨斯州、新墨西哥州等地以及美国西海岸的加利福尼亚

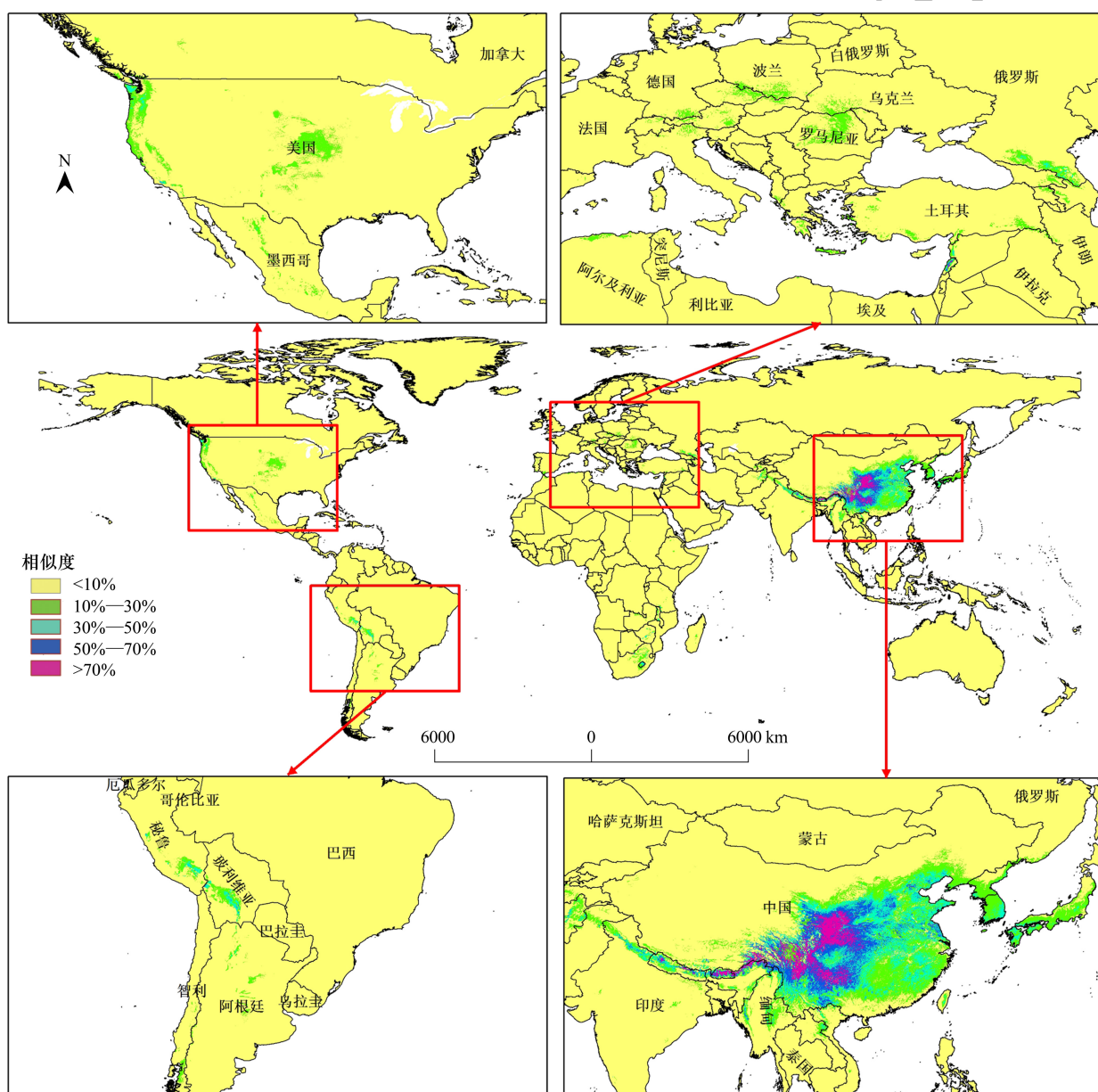


图5 当归全球生态区划图

Fig.5 Global ecological division of *Angelica sinensis*

亚洲、华盛顿州、俄勒冈州;另外,墨西哥的奇瓦瓦州等地区也有少量分布。北美洲区域中当归的生态相似度主要在 10%至 30%之间,共约 47.96 万 km²。欧洲的生态适宜区域主要包括罗马尼亚、乌克兰西部、波兰南部、俄罗斯西南部土耳其等地区,生态相似度主要在 10%至 30%之间,共约 27.22 万 km²。南美洲的生态适宜区域主要分布在秘鲁、智利、玻利维亚和阿根廷,生态相似度主要有 10%至 30%和 30%至 50%两个等级,面积分别为 9.01 万 km² 和 2.05 万 km²。非洲的生态适宜区域主要分布在赞比亚、津巴布韦、马拉维科摩罗、南非和莱托索,生态相似度主要在 10%到 30%之间,共约 28.23 万 km²。亚洲的生态适宜区域主要分布在印度南部、阿富汗东部、巴基斯坦东南部、尼泊尔、不丹、中国、韩国、朝鲜、日本,其生态相似度在 10%至 30%,30%至 50%,50%至 70%,大于 70% 4 个等级均有分布,面积分别为 207.58 万 km²、132.73 万 km²、82.45 万 km²、44.31 万 km²,共 467.07 万 km²,见表 2。

表 2 当归不同生态相似度区域分布

Table 2 Distribution area with different ecological similarities area of *Angelica sinensis* in various countries

地区 Area	相似度 10%— 30%区域 Ecological similarities/ (10 ⁴ km ²)	相似度 30%— 50%区域 Ecological similarities/ (10 ⁴ km ²)	相似度 50%— 70%区域 Ecological similarities/ (10 ⁴ km ²)	相似度 70% 以上区域 Ecological similarities/ (10 ⁴ km ²)	合计 Total/ (10 ⁴ km ²)
亚洲	207.58	132.73	82.45	44.31	467.07
欧洲	26	1.05	0.15	0.02	27.22
非洲	23.30	4.27	0.65	0.01	28.23
南美洲	18.06	4.23	0.3	0	22.59
北美洲	45.59	2.01	0.27	0.09	47.96
全球	320.53	144.29	83.82	44.43	593.07

3.5.2 当归中国区划

利用 ArcGIS 10.0 对 MaxEnt 模型计算的结果与中国行政分区矢量图进行叠加分析,得到当归在中国生态适宜区划图(图 6)。当归生态适宜区域在中国分布很广泛,其生态相似度在 10%—30%,30%—50%,50%—70%,>70% 4 个等级均有分布,面积分别为 138.2 万 km²、114.03 万 km²、77.56 万 km²、41.08 万 km²,共 370.87 万 km²(图 7)。其中生态相似度 70%以上的区域主要集中在甘肃省南部、四川省、西藏自治区东部、云南省北部、贵州省、陕西省西南部。可见,中国十分适合当归的种植,是当归的主产区。

4 讨论

中药材品质和药效与其生长的地域环境密切相关^[24-25],当归作为重要的中药材之一,其产业发展一直受到密切关注。由于连作障碍等问题存在,当归的生长面积不断缩减,迫切需要在世界范围内研究当归生态特征及其生态适宜区,实现当归精细化种植管理及科学引种栽培,本文首次基于最大信息熵模型研究当归在全球范围内的适宜区及其生态特征。

4.1 当归生态特征

影响当归地理分布的生态因子主要有最暖季降水量、最冷季平均温、碳酸钙含量、降水的季节性、坡度、气温的季节性、粘土比重、海拔、土壤中粘粒组的阳离子交换能力和气温年范围。最暖季降水量和最冷季平均温对当归的地理分布贡献率较大,最暖季是当归生长的旺盛期,表明当归生长期的降水量对当归的生长至关重要,最暖季降水量范围的适宜值范围为 300—700 mm,这个降水量条件保证了水分含量但却不会过分潮湿,这与目前对当归与道地产区环境适宜性的研究结果相一致,当归喜湿润地带,不耐旱不耐涝,水分含量过多易导致当归发生根腐病^[26]。最冷季平均温则是对当归的分布有着限制性影响,最冷季的极限温度决定了当归是否能够存活,本实验结果表明当归分布区最冷季平均温的适宜范围为-3—7℃,而据相关文献报道^[27],适宜当归生长地区的年均温约为 2—6℃,研究结果和之前报道基本一致。

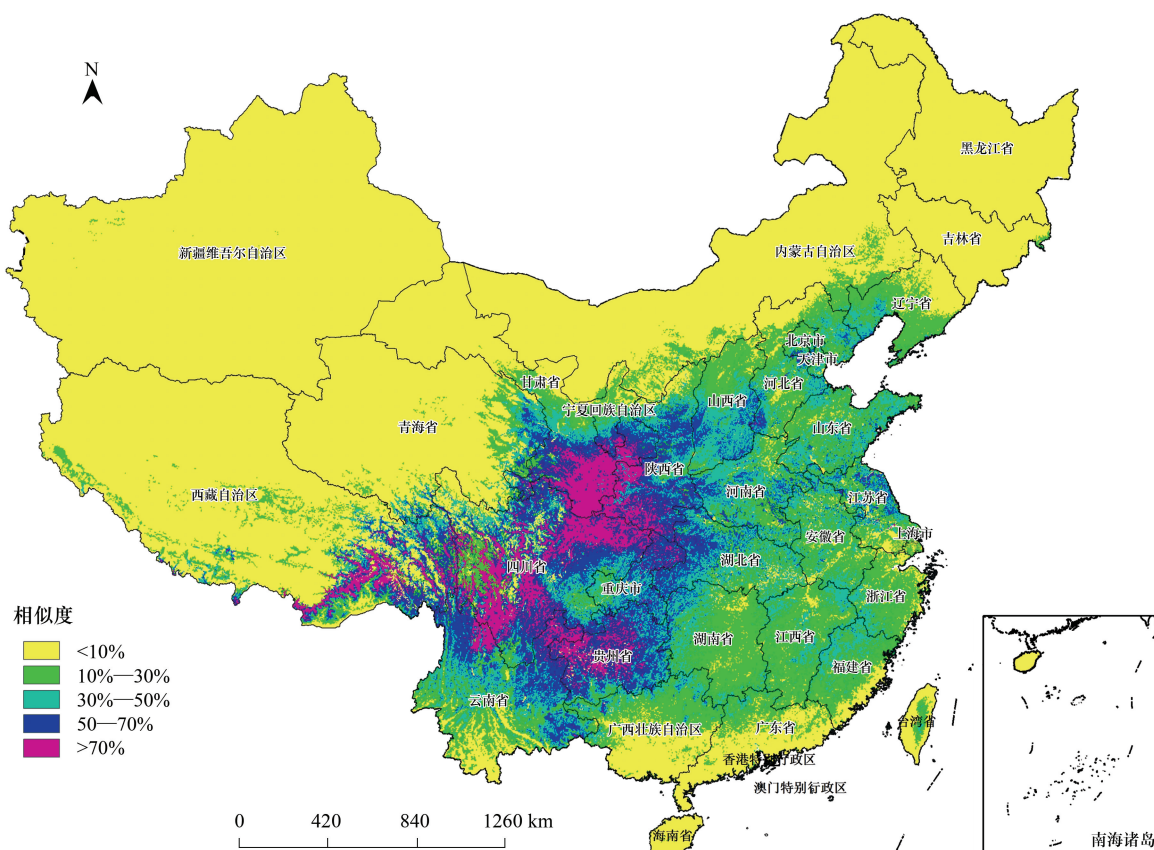


图6 当归中国生态区划图

Fig.6 Ecological division of *Angelica sinensis* in China

影响当归地理分布的土壤因子主要有碳酸钙含量、粘土比重。土壤碳酸钙含量对当归生长有重要影响,表明当归对土壤的无机元素含量要求较高,相关文献表明,当归原产区土壤中含有丰富的氮、磷、钾、镁等无机元素^[28],因此在栽培过程中要注意土壤中元素含量和组成。粘土比重反映了土壤的物理性质,粘土比重小,土壤疏松透气,排水性良好。由此可见,当归需要生活在无机元素含量丰富,疏松透气排水性好的土壤中,这与文献报道中对当归栽培区土壤研究结果相符合^[29],因此在生态相似度相对低的地区引种栽培过程时,可以通过改善土壤质地,合理施肥,以提高当归生长质量。

4.2 当归潜在分布区

当归潜在分布区主要集中在北纬 20—50° 之间,纬度可能是限制其分布的一个因素,但在相同纬度的美洲地区,当归分布极少,这可能是与不同地区海拔有关,因为亚洲地区的当归主要是分布在海拔相对较高的地区,这与当归喜低温、高寒气候的生物学特征相一致^[30]。当归在美洲和欧洲有部分相似度为 10%—30% 的潜在分布区域,但目前关于这些地区的当归分布状况很少有报导,因此,在其他条件允许的情况下,这些地区可以成为当归合适的引种栽培区。分析结果显示中国地区的四川省和甘肃省是当归的主产区,在甘肃省南部和四川省的大片地区其生态相似度都大于 70%,属于生态相似度最高等级;同时,西藏自治区东部、云南省北部、贵州省、陕西省西南部等地区也有部分相似度大于 70% 的区域,另外,湖南、重庆、湖北等地区有生态相似

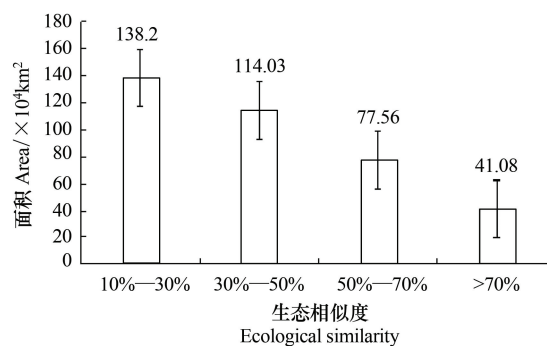


图7 当归不同生态相似度区域中国面积分布图

Fig.7 Ecological similarity area of *Angelica sinensis* in China

度 50%—70% 的区域,目前这些地区虽有当归分布,但是规模较小,可以考虑扩种。此外,青海、河南、安徽、江苏、浙江、江西、福建、湖南等地存在着大面积相似度为 10%—30% 的分布区,因此,将这些地区的局部条件加以控制,可以会成为当归的生产基地,这与相关文献中对当归适宜性分布研究结果^[11]较一致。本文当归适宜区分析结果与第三次中药资源普查结果相一致,当归资源生产区域均包含在本文生态相似度较高的潜在分布区域中,且潜在分布区域面积比第三次资源普查的当归真实分布区更大,因为模型预测物种的潜在分布,理论上大于物种的实际分布。同时,本文中不同地区的生态相似度与当归品质评价结果相一致,即生态相似度较高的地区当归品质较高^[31-32],因此,本文研究结果具有一定的科学指导意义。

本文基于 MaxEnt 软件和一定生态数据对全球当归地理分布进行预测,旨在为当归引种栽培提供科学参考依据。但由于影响药用植物分布的因素有很多,且每种模型有其优缺点,因此在扩种引种的具体操作中,为兼顾经济,种植地等因素,应先进行试验种植,方可大规模引种。

参考文献 (References):

- [1] 严辉,段金廛,宋秉生,王年鹤,何子清,孙成忠.我国当归药材生产现状与分析.中国现代中药,2009,11(4):12-17.
- [2] 宋秋月,付迎波,刘江,郑丹,韩力,黄学石.当归的化学成分研究.中草药,2011,42(10):1900-1904.
- [3] 李曦,张丽宏,王晓晓,杨雯,金玉青,吕光华.当归化学成分及药理作用研究进展.中药材,2013,36(6):1023-1028.
- [4] Huang C Y, Kuo W W, Kuo C H, Tsai F J, Liu P Y, Hsieh D J Y. Protective effect of *Danggui* (Radix Angelicae Sinensis) on angiotensin II-induced apoptosis in H9c2 cardiomyoblast cells. BMC Complementary and Alternative Medicine, 2014, 14: 358-358.
- [5] Liu S P, Dong W G, Wu D F, Luo H S, Yu J P. Protective effect of *angelica sinensis* polysaccharide on experimental immunological colon injury in rats. World Journal of Gastroenterology, 2003, 9(12): 2786-2790.
- [6] 孙红梅,张本刚,齐耀东,张昭,郭增祥.当归药材资源调查与分析.中国农学通报,2009,25(23):437-441.
- [7] 晋玲,吴迪,崔治家,朱田田,张弦飞,金尧,张裴斯.当归药材资源种类及分布研究.中兽医医药杂志,2013,32(1):74-77.
- [8] 张尚智,贺莉萍,韩黎明,杨文玺,刘玲玲.野生当归及其当归植物资源的研究.中国现代中药,2012,14(4):33-36.
- [9] 吴宝华,隋立军,钟心尧,酒连娣,张友民.当归属植物资源及开发利用.安徽农业科学,2014,42(3):702-703.
- [10] Engler R, Randin C F, Thuiller W, Dullinger S, Zimmermann N E, Araújo M B, Pearman P B, Le Lay G, Piedallu C, Albert C H, Choler P, Coldea G, De Lamo X, Dirnböck T, Gégout J C, Gómez-García D, Grytnes J A, Heegaard E, Høistad F, Nogués-Bravo D, Normand S, Puşcaş M, Sebastià M T, Stanisci A, Theurillat J P, Trivedi M R, Vittoz P, Guisan A. 21st century climate change threatens mountain flora unequally across Europe. Global Change Biology, 2011, 17(7): 2330-2341.
- [11] 邵璞,曾晓东.气候年际变率对全球植被平均分布的影响.生态学报,2011,31(6):1494-1505.
- [12] 马松梅,张明理,张宏祥,孟宏虎,陈曦.利用最大熵模型和规则集遗传算法模型预测子遗植物裸木的潜在地理分布及格局.植物生态学报,2010,34(11):1327-1335.
- [13] 刘恩斌,周国模,葛宏立.基于最大熵原理的浙江毛竹胸径分布及测量不确定度评定.生态学报,2009,29(1):86-91.
- [14] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [15] Phillips S J, Dudík M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. Ecography, 2008, 31(2): 161-175.
- [16] Phillips S J, Dudík M, Schapire R E. A maximum entropy approach to species distribution modeling//Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning. New York, NY, USA: ACM, 2004: 655-662.
- [17] 胡忠俊,张德铨,于海彬.基于 MaxEnt 模型和 GIS 的青藏高原紫花针茅分布格局模拟.应用生态学报,2015,26(2):505-511.
- [18] Merow C, Silander J A Jr. A comparison of Maxlike and Maxent for modelling species distributions. Methods in Ecology and Evolution, 2014, 5(3): 215-225.
- [19] 刘振生,高惠,滕丽微,苏云,王晓勤,孔芳毅.基于 MAXENT 模型的贺兰山岩羊生境适宜性评价.生态学报,2013,33(22):7243-7249.
- [20] 王运生,谢丙炎,万方浩,肖启明,戴良英.ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用.生物多样性,2007,15(4):365-372.
- [21] 李振华,王艳芳,伊勒泰,张艾华,任凯,张春红,毕雅琼,李旻辉.阿拉善地区荒漠肉苁蓉生态适宜性区划研究.中国中药杂志,2015,40(5):785-792.
- [22] Wang Y S, Xie B Y, Wan F H, Xiao Q M, Dai L Y. Application of ROC curve analysis in evaluating the performance of alien species' potential distribution models. Biodiversity Science, 2007, 15(4): 365-372. (本条文献为第 20 条文献英文信息,请核对)

- [23] 麻亚鸿. 基于最大熵模型(MaxEnt)和地理信息系统(ArcGIS)预测蕨类植物的地理分布范围——以广西花坪自然保护区为例[D]. 上海: 上海师范大学, 2013: 112-113.
- [24] 王欢, 李慧, 曾凡琳, 谢彩香. 黄花蒿空间分布及全球潜在气候适宜区. 中药材, 2015, 38(3): 460-466.
- [25] 邵玺文, 韩梅, 韩忠明, 孔伟伟, 杨利民. 不同生境条件下黄芩光合日变化与环境因子的关系. 生态学报, 2009, 29(3): 1470-1477.
- [26] 赵锐明, 陈垣, 郭凤霞, 汪洋, 张尚智, 王瑞琪. 甘肃岷县野生当归资源分布特点及其与栽培当归生长特性的比较研究. 草业学报, 2014, 23(2): 29-37.
- [27] 赵庆芳, 曾小英, 马瑞君. 当归栽培研究进展. 甘肃科技纵横, 2002, 31(6): 37-37.
- [28] 赵杨景, 陈四保, 高光耀, 冯毓秀, 杨世林, 徐丽珍, 杜力军, 胡世林, 冯雪峰. 道地与非道地当归栽培土壤的理化性质. 中国中药杂志, 2002, 27(1): 19-22.
- [29] 姚玉璧, 马鹏里, 张秀云. 道地与近道地当归栽培气候生态与土壤环境区划. 中国农学通报, 2011, 27(27): 156-160.
- [30] 许世峰. 地膜当归栽培技术要点. 甘肃科技, 2013, 29(7): 139-140.
- [31] 张宏意, 汤瑞平, 廖文波, 毕文钢. 不同产地当归多糖含量的比较//广东省植物学会学术研讨会(广东省植物学会 2009 年度青年学术研讨会暨第四届广东植物学研究生学术交流会)论文集. 广州: 中国植物学会, 广东省植物学会, 2009.
- [32] 杨树声. 中国当归药材的质量与安全性评价. 甘肃科技, 2015, 31(18): 74-76.