

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2024.34098

气候变化背景下我国天麻种植适宜性和适宜区的评估

郝佳乐 赵炯超 赵明宇 王艺璇 逯杰 石晓宇 高真真 褚庆全*

中国农业大学农学院 / 农业农村部农作制度重点实验室, 北京 100193

摘要: 气候变化通过改变物种栖息地的适宜性来影响物种的生长区域。天麻作为中国珍稀濒危药用植物, 评估其种植适宜区分布以及气候变化对天麻种植适宜性的影响可以为天麻生产布局提供重要依据。本研究采用 MaxEnt 模型, 基于我国天麻地理分布数据和环境数据, 模拟天麻种植适宜性和适宜区的空间分布和变化。结果表明, 影响天麻分布的主要环境因子是 5 月至 7 月太阳辐射量、10 月至 11 月降水量、最冷月最低温和植被类型。我国天麻种植高适宜区主要分布在四川盆地周围的西南地区。1961—2020 年, 天麻种植适宜性呈波动增加趋势, 种植适宜性提高的面积占全国陆地面积的 9.10%, 主要分布在西南地区、华中、华东的部分地区以及陕西省。过去 60 年间 5 月至 7 月太阳辐射量总体上的下降是天麻种植适宜性提高的主要原因。本研究通过对天麻种植适宜性准确评估和种植适宜区变化因子解析, 为我国天麻生产与人工栽培选址提供科学依据, 对制定应对未来气候变化的对策具有借鉴意义。

关键词: 天麻; 种植适宜性; 环境因子; MaxEnt; ArcGIS

Assessment of the cultivation suitability and suitable regions of *Gastrodia elata* under climate change in China

HAO Jia-Le, ZHAO Jiong-Chao, ZHAO Ming-Yu, WANG Yi-Xuan, LU Jie, SHI Xiao-Yu, GAO Zhen-Zhen, and CHU Qing-Quan*

College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University / Key Laboratory of Farming System, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China

Abstract: Climate change affects species growth areas by altering the suitability of their habitats. As a rare and endangered medical plant in China, the evaluation of the suitable distribution area and the impact of climate change on the suitability of *Gastrodia elata* can provide important information for the production layout of *Gastrodia elata*. In this study, the MaxEnt model was used to simulate the spatial distribution and changes of the suitability and suitable area for *Gastrodia elata* cultivation from 1961 to 2020, based on geographic distribution and environmental data. Results showed that the main environmental factors affecting the distribution of *Gastrodia elata* were solar radiation from May to July, precipitation in October and November, the minimum temperature in the coldest month, and vegetation type. The high suitable areas for *Gastrodia elata* cultivation in China were mainly distributed in the southwestern region around the Sichuan Basin. 1961 to 2020, the suitability for *Gastrodia elata* cultivation had shown a fluctuating increasing trend, with the area of improved suitability accounting for 9.10% of the total land area of China, mainly concentrated in Southwest China, the parts of central and eastern China, and Shaanxi province. The overall decrease in solar radiation from May to July over the past 60 years was the main reason for the increased suitability of asparagus cultivation. This study provided a scientific basis for the production and artificial cultivation site selection of *Gastrodia elata* in China, which provided reference significance for formulating strategies to respond to future climate change.

Keywords: *Gastrodia elata*; planting suitability; environmental factors; MaxEnt model; ArcGIS

本研究由云南省重大科技项目(202202AE090029)资助。

This study was supported by the Major Science and Technology Projects in Yunnan Province (202202AE090029).

* 通信作者(Corresponding author): 褚庆全, E-mail: cauchu@cau.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: sy20223010148@cau.edu.cn

Received (收稿日期): 2023-06-10; Accepted (接受日期): 2023-10-23; Published online (网络出版日期): 2023-12-08.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20231207.1314.002>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次评估报告指出, 到21世纪末, 全球平均气温将会上升1.4~5.8℃^[1]。全球变暖加剧了气象灾害的发生频率和严重程度, 农业生态系统也在全球变化中发生着固有的变化^[2]。作物生长发育与实际气候条件的一致性决定了气候适宜性的高低, 高度适宜性是作物稳产高产的有利条件^[3]。探索气候变化背景下作物种植适宜性和适宜区分布的动态变化可以为作物生产应对气候变化提供理论依据和技术支撑。

作物种植适宜性评价与区划是利用生态学、地理学等方法, 依据研究区域内自然生态资源对作物生长所需气候、土壤、地形等因素的匹配程度, 科学地评价并划分作物种植环境的适宜性等级。对作物种植适宜性的研究, 本质上是通过统计或理论推导建立作物发生数据与相应环境变量之间的定量关系, 并将这种关系推广到研究区域, 从而预测目标作物的空间分布。这种方法与物种分布模型的原理相一致, 因此物种分布模型逐渐发展为研究作物种植适宜性的重要工具^[4]。随着数学建模方法和地理信息系统的发展, 已经建立了许多物种分布模型, 如最大熵(Maximum Entropy Model, MaxEnt)模型、生物气候模型(Bioclimatic Model, BIOCLIM)、规则集生成遗传算法(Genetic Algorithm for Rule-set Production, GARP)、广义可加性模型(Generalized Additive Model, GAM)等用于相关研究^[5]。与其他物种分布模型相比, MaxEnt模型具有支持多变量、样本需求小、灵活性高、结果解释简单等优点^[6]。目前该模型已被广泛用于主要粮食作物适宜区预测, 濒危物种的适宜栖息地预测, 以及气候变化对作物生产影响的研究^[7-9]。然而, 基于MaxEnt物种分布模型对中国天麻种植适宜性和适宜区的评估信息相对有限。通过MaxEnt模型结合GIS空间分析功能获取到天麻的种植适宜性和适宜区可以为未来我国天麻的种植布局规划提供重要理论依据。

天麻(*Gastrodia elata*)是一种名贵中药, 隶属兰科(Orchidaceae)天麻属植物, 其块茎具有较高的营养价值^[10]。野生天麻品质较好, 但多年来过度采挖导致其资源日渐枯竭, 现已成为国家二级保护植物。如今市场上的天麻多来源于人工栽培, 但栽培生产过程中品种退化、栽培密集、种群种类失衡等问题严重影响天麻产业发展^[11]。环境因子对植物生长分布具有重要影响, 辨识影响天麻生长的环境因

子, 在此基础上评估其种植适宜性和适宜区对指导天麻生产和布局具有重要意义。前人在研究天麻种植适宜性方面, 选取环境因子大多来源于公共数据^[12]或仅考虑气候因素的影响^[13], 这些气候因子和标准生物气候变量的收集和计算相对方便, 但欠缺针对天麻生物学特性环境因子的科学考量, 普适性的环境数据不足以模拟特定作物的空间分布。天麻作为地理分布和生态适应性较窄的作物, 其在生长发育的不同阶段对环境因子有着特殊的要求。天麻是2~3年生草本植物, 从种植到收获, 其关键生长周期为种子萌发、原球茎、米麻、白麻、箭麻5个阶段^[14]。其中, 5月至7月是天麻唯一的地面生长阶段, 强烈的直射光会危害花茎生长, 因此5月至7月的太阳辐射量对天麻的产量和品质有重要影响^[15]。10月至11月是全国天麻主产区的集中成熟期, 此间降雨量会影响天麻大小和内容物含量^[16]。因此在研究天麻适宜性或适宜区的分布要充分考虑这些关键环境因子。此外, 目前已有研究多限于小范围区域^[17]及单一年代^[18], 针对全国范围内天麻适宜性和适宜区年际间变化的研究较少。随着天麻的功效和药用价值逐渐被认可, 国内需求量大且价格昂贵。天麻人工栽培的种植面积迅速增加, 种植的区域也逐渐扩大, 导致一些不适宜天麻种植区域大量种植天麻, 从而使天麻的产量和品种受到影响^[19]。因此, 迫切需要对我国天麻的种植适宜区进行划分。鉴于此, 本研究基于MaxEnt模型评估1961年至2020年我国天麻种植适宜性和适宜区的变化, 分析影响天麻分布的主要环境因子及主导环境因子对天麻种植适宜性和适宜区的影响, 以期为我国天麻科学种植和引种栽培提供理论和技术支撑。

1 数据来源与研究方法

1.1 天麻地理分布数据

本研究使用的气象数据来自1961—2020年全国707个标准气象站点的逐日气象数据。天麻地理分布数据来源于全球生物多样性信息(GBIF, <https://www.gbif.org/>)、中国虚拟植物标本馆(Chinese Virtual Herbarium, CVH, <https://www.cvh.ac.cn/>)以及文献检索获取到的全国天麻地理分布点。其中, 检索文献必须符合在中国进行大田试验且试验地理坐标有详细记录, 或具体到行政区县地名而无经纬度的点, 再进一步根据“谷歌地球”进行经纬度定位反查坐标。得到378组分布点数据。使用ENMtools工具

包, 筛除重复点并在 1 km 距离内只保留 1 个分布点, 以减小分布点数据空间自相关引发的环境偏差过度拟合, 最终保留 334 个天麻种植分布站点(图 1)。

1.2 环境因子数据

根据天麻生长发育特征, 综合考虑气候、土壤、地形植被等环境因子, 研究了影响天麻分布的主导环境因子。本研究使用的气象数据来自 1961—2020 年全国 707 个标准气象站点的逐日气象数据。其中, 10 月至 11 月降水量、最冷月最低温等日基本气候数据在逐日气象数据的基础上计算多年平均值, 并应用 ANUSPLIN 方法进行插值。等温性、降水变异系数等生物气候变量和太阳辐射由 R 包 dismo 的 biovar 函数计算得出, 土壤有机碳、土壤含水量、土壤含黏量等土壤质地数据来源于世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database, HWSD, <http://westdc.westgis.ac.cn/data/>), 植被类型数据地形特征参考数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)以及资源与环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)获取。

由于环境因素之间复杂的空间自相关性, Max-Ent 模型存在过拟合风险^[20]。本研究根据分布点对

所有环境变量重采样, 利用 ArcGIS 和 Origin 先对连续变量进行 Pearson 相关性分析, 结合天麻的生理生态习性, 从强相关变量中仅选择一个变量保留($|r| < 0.8$), 再将保留的连续变量和最初选取的分类变量进行 Spearman 相关性分析, 当 2 个环境因子之间的相关性达到 0.8 以上时舍去其中一个环境因子用于模型运行, 去除共线变量, 避免预测过拟合^[21]。为进一步改进模型, 又使用折刀检验去除贡献率低的变量^[22]。最后, 本研究将 11 个环境因子确定为影响天麻种植分布的潜在环境因子, 将各环境因子插值到 1 km × 1 km 网格, 并将所有环境变量层都转换为 ASCII 格式, 以便在 MaxEnt 模型中使用(表 1)。

1.3 模型设置与评估

MaxEnt 模型是一种结合统计建模和机器学习的算法, 它根据最大熵原理, 从仅存在的数据和环境变量中模拟出一个物种存在的概率。本研究使用的 MaxEnt 模型版本为 3.4.1。随机选取 75% 的农业气象站记录作为训练数据, 获得模型的基本参数, 其余 25% 的记录作为测试数据评估模型的适用性^[29]。为了降低模型的不确定性, 对每种子样本类型进行

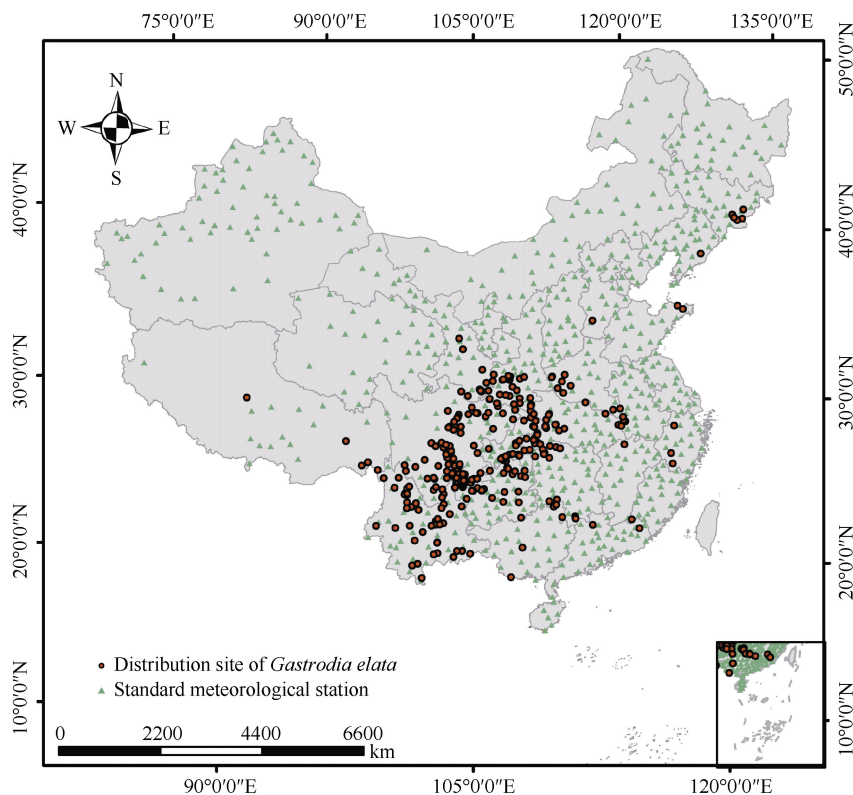


图 1 我国标准气象站点与天麻种植分布点地理分布图

Fig. 1 Distribution site of *Gastrodia elata* and meteorological observation stations in China

该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS (2019) 1822 号的标准地图制作, 底图边界无修改。

This map is based on the standard map downloaded from the standard map service website of the National Bureau of Surveying, Mapping and Geographic Information with the approval number GS (2019) 1822. The boundary of the base map is not modified.

表 1 影响天麻种植分布的潜在环境因子
Table 1 Potential environmental factor affecting the planting distribution of *Gastrodia elata* in China

潜在环境因子 Potential environmental factor	意义 Meaning	文献 References
5 月至 7 月太阳辐射量(Solar_5to7) Solar radiation from May to July	反映天麻地面生长阶段光照吸收状况 Reflecting the light absorption status of the ground growth stage of <i>Gastrodia elata</i>	[15]
10 月至 11 月降水量(Pre_10to11) Precipitation in October and November	反映天麻关键生育时期水分供应情况 Reflecting water availability during the critical reproductive period of <i>Gastrodia elata</i>	[23, 16]
植被类型(VEG) Vegetation	天麻自然分布多需要一定的落叶阔叶林 Natural distribution of <i>Gastrodia elata</i> mostly requires a certain amount of deciduous broadleaf forest	[24]
最冷月最低温(MINtem_CM) Min temperature of coldest month	天麻生长期内承受的最低温度 The minimum temperature to be tolerated during the growth period of <i>Gastrodia elata</i>	[23]
等温性(ISO) Isothermality	天麻生长期内热量平均水平 Average heat level during the growth period of <i>Gastrodia elata</i>	[23]
含粘量(SCS) Soil sediment concentration	反映天麻种植地土壤保水保肥能力 Reflects the soil water and fertility retention capacity of the <i>Gastrodia elata</i> cultivation sites	[25]
降水变异系数(CVpre) Precipitation variability	天麻生长期降水量的季节性差异 Seasonal differences in precipitation during the growing season of <i>Gastrodia elata</i>	[26]
坡度 Slope	影响天麻空间分布 Influence on the spatial distribution of <i>Gastrodia elata</i>	[24]
土壤有机碳(SOC) Soil organic carbon	反映天麻种植地土壤质量状况 Reflecting the soil quality of the <i>Gastrodia elata</i> cultivation sites	[27]
坡向(ASPECT) Slope	影响天麻营养吸收状况和产量 Influence nutrient uptake status and yield of absorption conditions of <i>Gastrodia elata</i>	[28]
土壤含水量(SWC) Soil water content	反映天麻种植地土壤水分状况 Reflecting the soil moisture status of the <i>Gastrodia elata</i> cultivation sites	[27]

了 10 次重复, 并对其结果取平均^[30]。对所有环境变量进行刀切试验, 确定影响天麻分布的主导环境因子。MaxEnt 模型采用受试者工作特征曲线 ROC 作为模型模拟精度的衡量方法, ROC 曲线与横坐标轴围成的面积称为 AUC 值(范围从 0.5 到 1.0), 该值是目前公认的最优模型精度检测指标。AUC 值越高, 模拟结果越好。根据 AUC 值, 模型性能可分为: 0.90~1.00 优秀; 0.80~0.90 良好; 0.70~0.80 平均值; 0.60~0.70 较差; 0.50~0.60 失败^[31]。

1.4 数据分析

为探究天麻种植适宜性的时空变化, 将研究时段分为 1961—1970 年、1971—1980 年、1981—1990 年、1991—2000 年、2001—2010 年、2011—2020 年 6 个时间段, 并采用 MaxEnt 模型模拟不同时段天麻的存在概率。最后, 将天麻的种植适宜性分为 4 类: 种植不适宜性($0 < P \leq 0.2$)、种植低适宜性($0.2 < P \leq 0.4$)、种植中适宜性($0.4 < P \leq 0.6$)、种植高适宜性($0.6 < P \leq 1.0$)^[32]。将不同年代种植适宜性进行对比, 探索天麻种植适宜性的时空变化。利用 ArcGIS10.6 的空间分析技术和 ANUSPLIN 插值方法将 MaxEnt

模型计算的结果进行叠加与地图制作。

2 结果与分析

2.1 影响天麻种植适宜区分布的主导环境因子

在利用 MaxEnt 模型进行模拟之前, 需要对 MaxEnt 模型进行模拟精度验证。以 60 年的平均气象数据进行预测时, 10 个重复训练数据的 AUC 平均值为 0.958, 试验数据 AUC 平均值为 0.921, 说明模型模拟结果优秀。在 6 个不同的时间段内, 试验数据的 AUC 值在 0.915~0.923 之间, 进一步证明模型是相对可靠的(图 2)。

仅使用单因素建立模型时, 5 月至 7 月太阳辐射量的正则化训练增益(深蓝色条带)最大(图 3-a), 说明该气候因子对天麻分布最为重要。当使用除植被类型外的所有因子时, 正则化训练增益(浅蓝色条带)最低(图 3-a), 说明植被类型包含了最多其他因子不包含的信息。5 月至 7 月太阳辐射量、植被类型、10 月至 11 月降水量和最冷月最低温的综合贡献率达到 87.00% (图 3-b)。这 4 个因子被确定为影响天麻种植分布的主导环境因子。

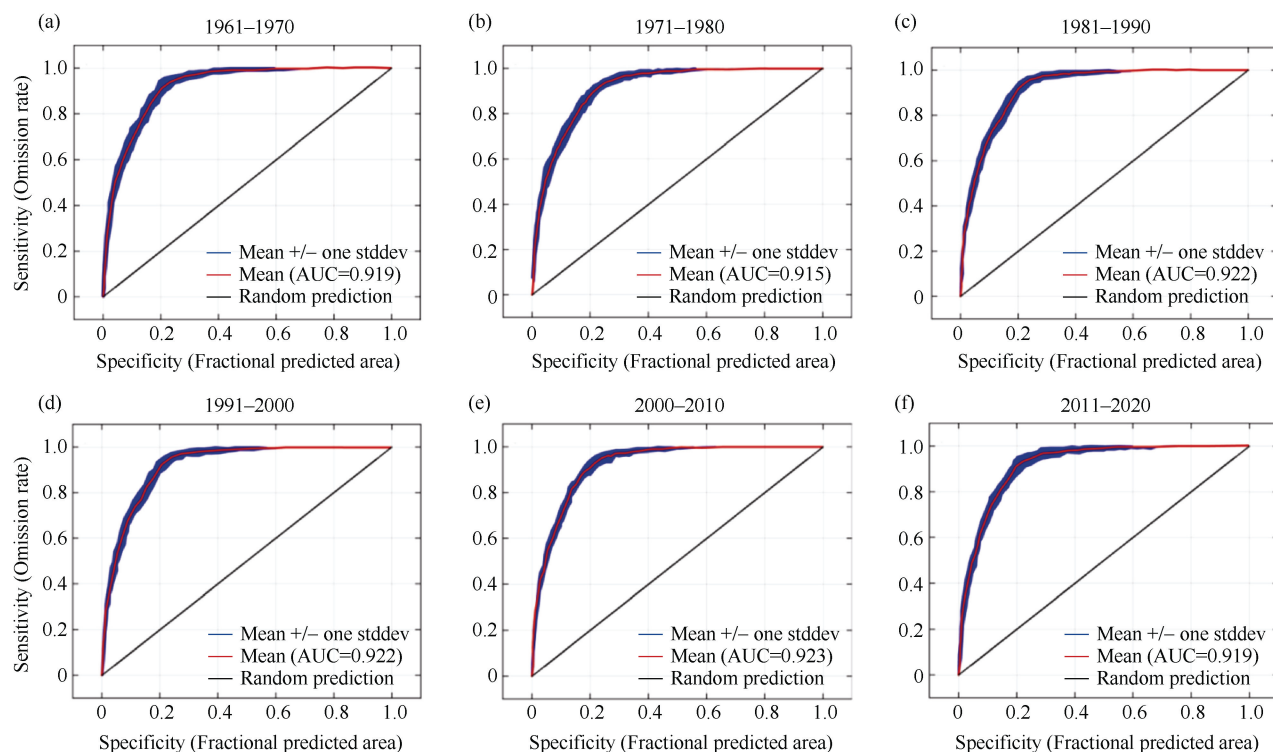


图 2 受试者操作特征曲线(ROC)

Fig. 2 Receiver operating characteristic (ROC) curve

红线是平均值, 蓝线为 MaxEnt 重复运行 10 次的响应曲线。

Red lines are the mean values and blue lines are response curves obtained from each of 10 MaxEnt runs.

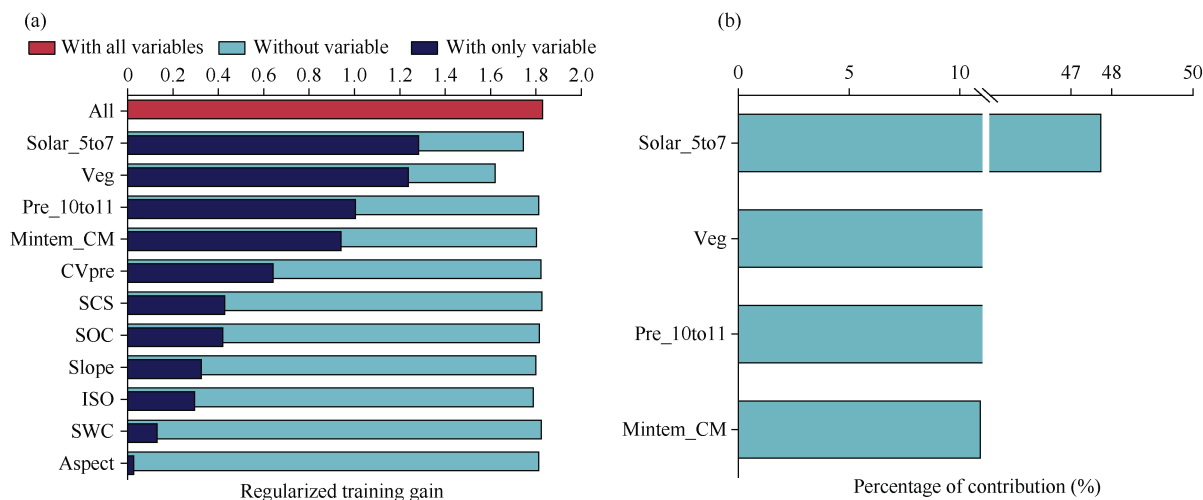


图 3 基于 jackknife 检验的 MaxEnt 模型的正则化训练增益(a)和贡献百分比(b)

Fig. 3 Regularized training gain (a) and percentage contribution (b) of the MaxEnt model based on the jackknife test

在(a)中, 红色柱状图显示了使用所有环境因子的模型的训练增益, 深蓝色柱状图显示了仅使用一种环境因子的模型的训练增益, 浅蓝色柱状图显示了除一种环境因子外使用所有环境因子的模型的训练增益。Veg: 植被类型; Solar_5to7: 5 月至 7 月太阳辐射量; Pre_10to11: 10 月至 11 月降水量; Mintem_CM: 最冷月最低温; CVpre: 降水变异系数; SCS: 土壤含沙量; SOC: 土壤有机碳; Slope: 坡度; ISO: 等温性; SWC: 含水量; Aspect: 坡向。

In (a), the red bar shows the training gain of the model using all Ecological factors, the dark blue bar shows the training gain of the model using only one Ecological factor, and the light blue bar shows the training gain of the model using all but one factor. Veg: vegetation; Solar_5to7: solar radiation from May to July; Pre_10to11: precipitation in October and November; Mintem_CM: minimum temperature of coldest month; CVpre: precipitation variability; SCS: soil sediment concentration; SOC: soil organic carbon; ISO: isothermality; SWC: soil water content.

根据 MaxEnt 模型绘制的单变量响应曲线, 以存在概率 $P \geq 0.6$ 为划分界限, 得到主导因子在不同适生等级的响应区间。当 5 月至 7 月太阳辐射量在 $1230.14 \sim 1598.53 \text{ MJ m}^{-2}$, 10 月至 11 月降水量在 $79.58 \sim 159.81 \text{ mm}$, 最冷月最低温在 $-11.17 \sim -0.68^\circ\text{C}$ 时天麻种植适宜性达到最大, 最适合天麻生长的植

被类型是针叶林、针阔叶混交林和阔叶林(表 2)。

2.2 天麻种植适宜区空间分布

天麻种植适宜区呈现出环绕高适宜区分布的特殊格局。在全国范围内, 天麻主产区主要集中在西南地区(图 4)。四川盆地附近的部分山区是高度适宜种植的地区, 包括四川、重庆、陕西以及云南东北

表 2 影响天麻种植适宜性主导环境因子阈值划分

Table 2 Threshold division of dominant environmental factors affecting the suitability for cultivation of *Gastrodia elata*

分类 Classification	5 月至 7 月太阳辐射量 Solar radiation from May to July (MJ m^{-2})	10 月至 11 月降水量 Precipitation in October and November (mm)	最冷月最低温 Minimum temperature of coldest month ($^\circ\text{C}$)	植被类型 Vegetation
高适宜区 High suitable area	1230.14–1598.53	79.58–159.81	–11.17 to –0.68	针叶林, 针阔叶混交林, 阔叶林 Coniferous forests, mixed coniferous, and broad-leaved forests, broad- leaved forests
中适宜区 Moderate suitable area	1598.53–1713.89	72.66–78.20	–13.83 to –11.46	灌丛, 栽培植被 Scrub and cultivated vegetation
低适宜区 Less suitable area	1713.89–1810.64	67.13–72.66	–14.72 to –13.98	其他 Others
不适宜区 Unsuitable area	<1230.14 or >1810.64	<67.13 or >238.65	<–14.72 or >1.98	荒漠, 草原, 草甸, 沼泽, 高山植被 Deserts, grasslands, meadows, swamps, and alpine vegetation

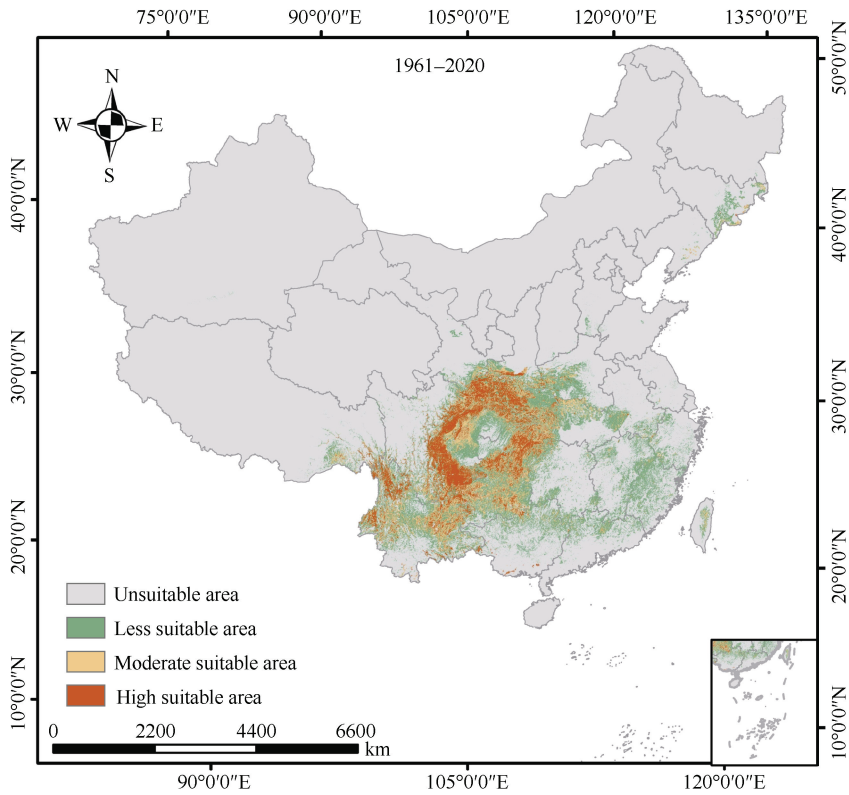


图 4 我国天麻种植适宜区空间分布

Fig. 4 Geographical distribution of suitable areas for *Gastrodia elata*

该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS (2019) 1822 号的标准地图制作, 底图边界无修改。
This map is based on the standard map downloaded from the standard map service website of the National Bureau of Surveying, Mapping and Geographic Information with the approval number GS (2019) 1822. The boundary of this base map is not modified.

部。其中,云南昭通市是天麻高适宜区分布面积最大且最集中的地区。除主产区外,贵州、湖北西南部以及云南西南部种植适宜性为中度适宜,这些地区也有一定的天麻种植面积。种植适宜性低的地区较为广泛,主要分布在中东部地区,包括河南、湖北、安徽、浙江、福建、江西等省份。同时,在吉林、台湾、西藏东南部、广东及广西北部等区域也有天麻的种植。全国的天麻种植适宜区总面积为 $135.48 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 其中低适宜区面积为 $70.02 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 中适宜区为 $36.86 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 高适宜区为 $28.60 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。

2.3 天麻种植适宜性时空变化

过去 60 年间,我国天麻种植适宜性在空间上发生了明显的变化。总体来看,1961—2020 年天麻种植适宜性提高的地区集中在华中和华东地区,种植适宜区呈现出向东扩张的趋势。华中和华东的部分地区,由 1961—1970 年的不适宜区转变为 2011—

2020 年的低适宜区(图 5)。1961—1970 年高适宜区面积为 $15.09 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 虽然在 2001—2020 年略有下降,但 1961—2020 年整体呈增加趋势,增加 76.69%。中适宜区面积从 1961—1970 年的 $25.71 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 增加到 2011—2020 年的 $40.51 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 低适宜区面积增加了 31.13%, 而不适宜区面积减少了 5.32% (表 3)。

总体来说,1961—2020 年 60 年间,我国天麻种植适宜区面积呈波动增加趋势,60 年间种植适宜区总面积增加 44.46% (表 3)。种植适宜性提高面积为 $87.40 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 种植适宜性提高的地区主要分布在我国西南、华中、华东的部分地区以及陕西南部地区。天麻种植适宜性不随时间变化的地区(即适宜性在所有时间段均为中等或高)的面积为 $53.40 \times 10^6 \text{ hm}^2$; 种植适宜性降低的地区零星分布在云南西北部、四川南部、重庆西南部,种植适宜性降低面积仅占全国陆地面积的 1.82% (图 5-c)。

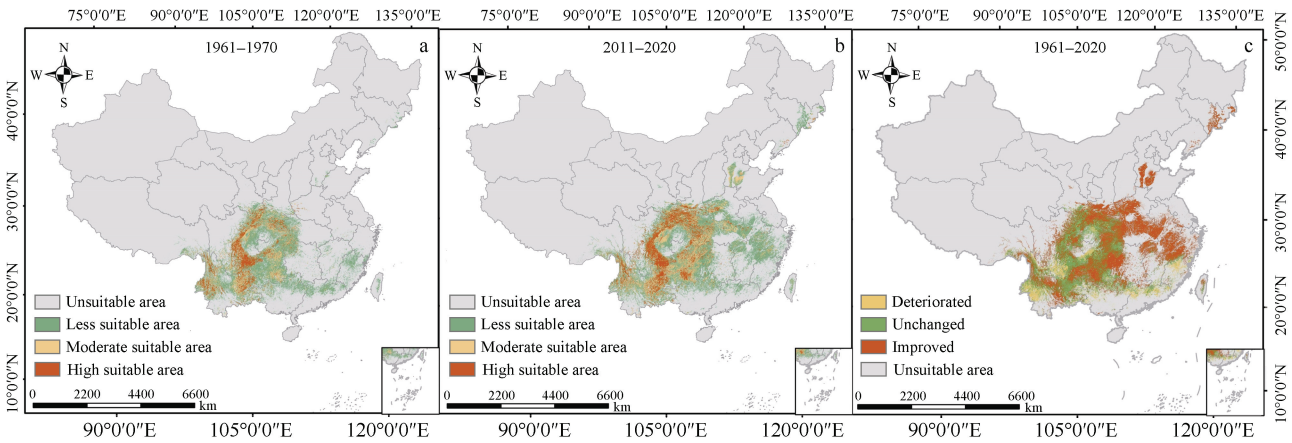


图 5 我国天麻种植适宜区空间分布(a, b)及种植适宜性变化(c)

Fig. 5 Geographical distribution of suitable areas (a, b) and suitability changed for *Gastrodia elata* (c)

该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS (2019) 1822 号的标准地图制作, 底图边界无修改。

This map is based on the standard map downloaded from the standard map service website of the National Bureau of Surveying, Mapping and Geographic Information with the approval number GS (2019) 1822. The boundary of this base map is not modified.

表 3 我国不同年代天麻种植适宜区分布面积

Table 3 Distribution area of suitable areas for *Gastrodia elata* in different years in China ($\times 10^6 \text{ hm}^2$)

适宜性划分 Suitability regionalization	年份 Years					
	1961—1970	1971—1980	1981—1990	1991—2000	2001—2010	2011—2020
低适宜区 Less suitable area	61.79	76.84	72.97	87.72	76.15	81.03
中适宜区 Moderate suitable area	25.71	33.68	35.81	47.46	41.93	40.51
高适宜区 High suitable area	15.09	21.83	24.60	40.63	32.49	26.66
总适宜区 Total suitable area	102.59	132.35	133.38	175.81	150.57	148.20
不适宜区 Unsuitable area	857.41	827.65	826.62	784.19	809.43	811.80

3 讨论

3.1 主导环境因子对天麻分布的影响

环境因子是物种分布模型的重要输入数据, 环境因子的选择直接影响预测结果的准确性。在以往的研究中, 通常从公共数据库中获取气候因子或常见生物气候变量用于预测气候变化对作物空间分布的影响。张琴等^[13]选取与温度和降水相关的 19 个气候变量作为影响天麻生长的环境数据研究天麻全球潜在适生区。王海峰等^[18]研究天麻全国产地适宜性区划, 所选用关键生态因子均来源于公共数据库。本研究更加关注天麻关键物候期的生理生态习性, 在选取初始环境变量时定义了影响天麻生长发育和产量形成的潜在因子: 关键生育期的 10 月至 11 月降水量和天麻唯一地面生长阶段的 5 月至 7 月太阳辐射量^[15-16]。随后逐步删除对模型贡献较小的潜在环境因子并构建最简约模型。基于 Jackknife 的逐步筛选法有效剔除潜在的无关变量, 减少模型模拟的过拟合并获得更加理想的预测结果。经筛选, 最终确定影响天麻种植分布的主导环境因子为 5 月至 7 月太阳辐射量, 10 月至 11 月降水量, 最冷月最低温和植被类型, 这些因素反映了天麻生长所需的光温条件、雨水条件和植被分布条件。

天麻是天麻属植物分布最北的类群, 具有一定的抗寒性, 能耐一定低温, 但不能忍耐气温骤降或持续低温^[24], 所以天麻在 -3°C 至 5°C 时可以安全过冬, 但当初冬和初春时温度骤降, 天麻常会受到冻害^[23]。土壤水分供给也是影响天麻生长和产量形成的重要因素, 它强烈依赖于降水量。天麻适合在阴雨连绵, 多雨潮湿的气候环境中生长, 不同季节天麻需水量不同, 9 月以后雨水过多会造成块茎腐烂^[33]。主产区天麻完全成熟集中在 11 月, 这期间最适宜采收, 此间降雨量会影响天麻个头大小和内容物含量^[16]。本研究结果显示, 当最冷月最低温在 $-11.17\sim-0.68^{\circ}\text{C}$, 10 月至 11 月降水量在 79.58~159.81 mm 时, 天麻种植适宜性达到最大。天麻花期的花茎虽具有明显的趋光性, 但强烈的直射光会危害花茎^[23]。本研究结果表明, 最适宜天麻生长的 5 月至 7 月太阳辐射量是 1230.14~1598.53 MJ m^{-2} 。植被类型是影响局部环境小气候的重要环境因子, 不同植被类型下, 地表光照条件、小环境温度、土壤温度、湿度和养分状况都有较大差异, 可以对天麻生长产生重要影响^[34]。本研究结果显示最适合天麻生长的植被类型

是针叶林、针阔叶混交林和阔叶林。相对于前人的研究, 本研究认为天麻对植被类型的适宜性更为宽泛, 而不是只局限于阔叶落叶林^[35]。

3.2 天麻种植适宜区空间分布

MaxEnt 模型预测结果显示, 1961—2020 年天麻种植高适宜区主要分布在云南东部、北部以及四川盆地附近的部分山区(图 4)。说明天麻分布带虽然较广, 但最适宜生长的区域相对集中。其中, 云南昭通市是天麻适宜区分布面积最大且最集中的地区。《中药志》在介绍优质药材天麻时候提到: “天麻主产于我国西南诸省, 而以云南昭通产者最为驰名^[36]。从分布区的地理环境来看, 天麻的适生区主要位于亚热带, 气候类型属于亚热带湿润性气候, 夏季高温多雨, 冬季温和湿润, 全年湿度大, 日照少, 适宜天麻生长。

前人有关天麻适宜性的研究也与本文得出相似结果。郭怡博等^[12]研究结果表明当代气候下陕西、四川、湖北、云南等地较适宜天麻种植产业发展。但前人研究时间范围较为久远且时间跨度较小, 本文研究 1961—2020 年天麻适宜区的分布及变化更符合今天麻种植适宜性的分布规律。张琴等^[13]基于多个生态位模型对天麻在全球范围内的潜在适生区进行预测, 结果显示, 中国天麻集中分布在四川盆地附近, 这与本文天麻种植高适宜性分布地区结果一致。本文在研究天麻种植适宜区的基础上又对天麻不同种植适宜性进行等级划分, 明确四川盆地附近山区属天麻种植高适宜区。此外, 受数据收集条件的限制, 天麻物种分布数据与环境数据采集时间之间可能尚存在偏差, 未来改善分布点与气候模型的准确性和精细程度, 将更有助于解释天麻适生区变化的原因。

3.3 天麻种植适宜性时空变化

任何生物都离不开其所处环境条件而生存, 影响天麻生长发育的主导环境因子的变化会影响其种植适宜性及适宜区的变化。根据本文研究结果, 过去 60 年间我国天麻种植适宜性呈波动增加趋势。1961—2000 年天麻适宜区总面积增加, 2001—2020 年适宜区总面积略有减少。高适宜区与适宜区总面积呈现出相同的变化规律(表 3)。5 月至 7 月太阳辐射量是决定天麻适宜性分布的最重要的主导因子, 因此, 太阳辐射量的变化必然会对天麻分布产生显著影响。对 5 月至 7 月太阳辐射量状态差进行验证发现, 以 2000 年为界, 位于天麻主产区的西南大部地

区 1961—2000 年太阳辐射量呈现下降趋势, 2001—2020 年的 5—7 月太阳辐射量呈上升趋势。太阳辐射量的变化与天麻高适宜区在时间上的变化呈现出相同的规律。天麻是一种喜阴作物, 除箭麻抽苔开花时需要部分的散射光外, 从种子播种至收获都生长在地下, 过高的太阳辐射量不利于天麻生长^[14], 罗夫来等^[37]研究天麻的产量影响因子及生长发育规律时也证明了这一点。由此, 5 月至 7 月太阳辐射量的增加会导致天麻种植适宜性的下降。在高适宜种植区集中分布的西南地区, 1961—2000 年太阳辐射量下降, 在一定程度上使天麻适宜性提高, 高适宜区面积增加; 2001—2020 年, 5 月至 7 月太阳辐射量增加, 天麻适宜性降低, 高适宜区面积减少。另有研究证实, 近年来中国的太阳辐射经历了“全球变暗”和“全球变亮”2 个阶段, 西南地区也出现了相同的变化模式, 且变化之后仍低于 20 世纪 60 年代之前的水平^[38]。因此, 在 1961—2020 年整体研究期间, 西南地区天麻高适宜区面积增大。

从天麻分布的空间变化看, 1961—2020 年间天麻种植适宜区呈现出向东扩张的趋势(图 5)。天麻适宜性提高的地区主要集中在华中和安徽、浙江、江西等华东部分地区, 这些地区由种植不适宜区转变为低适宜区。有关文献表明, 华中和华东地区太阳辐射量总体上也呈下降趋势^[39-40]。太阳辐射量下降在一定程度上使华中和华东部分地区的天麻种植适宜性提高。石子为等^[41]在对昭通天麻潜在分布区域的研究中, 也认为 5 月至 7 月太阳辐射量会对天麻生殖生长关键阶段产生重要影响。

4 结论

本研究利用 MaxEnt 模型构建了 1961—2020 年中国天麻种植适宜区分布与环境因子的关系, 确定了影响天麻分布的主导环境因子, 揭示了天麻种植适宜性的时空分布和变化规律。主要结论如下: (1) 影响天麻种植适宜性的主导环境因子是 5 月至 7 月太阳辐射量、植被类型、10 月至 11 月降水量、最冷月最低温, 这些因子决定了天麻种植适宜性的高低和种植适宜区的分布。(2) 我国天麻种植适宜区主要分布在四川盆地周围的西南地区, 四川盆地附近部分山区是高度适宜的地区, 包括四川、重庆、陕西以及云南东北部。(3) 过去的 60 年间, 天麻的种植适宜性呈波动上升趋势, 种植适宜性改善面积占全国陆地面积的 9.10%, 主要集中在西南地区、华中、

华东的部分地区以及陕西省。(4) 1961—2020 年 60 年间, 5 月至 7 月太阳辐射量总体上的下降是天麻种植适宜性提高的主要驱动因子。研究结果可为优化天麻种植分布及其产业发展提供理论依据和技术支撑。

References

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Working Group I: Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. pp 5–6.
- [2] 商蒙非, 石晓宇, 赵炯超, 李硕, 褚庆全. 气候变化背景下中国不同区域玉米生育期高温胁迫时空变化特征. 作物学报, 2023, 49: 167–176.
Shang M F, Shi X Y, Zhao J C, Li S, Chu Q Q. Spatial and temporal characteristics of high temperature stress during maize fertility in different regions of China in the context of climate change. *Acta Agron Sin*, 2023, 49: 167–176 (in Chinese with English abstract).
- [3] 韩湘玲. 作物生态学. 北京: 气象出版社, 1991. pp 15–18.
Han X L. Crop Ecology. Beijing: China Meteorological Press, 1991. pp 15–18 (in Chinese).
- [4] Guisan A, Thuiller W. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecol Lett*, 2005, 8: 993–1009.
- [5] Zhao J C, Wang C, Shi X Y, Bo X Z, Li S, Shang M F, Chen F, Chu Q Q. Modeling climatically suitable areas for soybean and their shifts across China. *Agric Syst*, 2021, 192: 1873–2267.
- [6] Yuan H S, Wei Y L, Wang X G. Maxent modeling for predicting the potential distribution of Sanghuang, an important group of medicinal fungi in China. *Fungal Ecol*, 2015, 2: 140–145.
- [7] He Q J, Zhou G S, Lu X M, Zhou M Z. Climatic suitability and spatial distribution for summer maize cultivation in China at 1.5 and 2.0°C global warming. *Sci Bull*, 2019, 64: 690–697.
- [8] Kumar S, Stohlgren T J. Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. *J Ecol Nat Environ*, 2009, 1: 94–98.
- [9] Fand B B, Kumar M, Kamble A L. Predicting the potential geographic distribution of cotton mealybug *Phenacoccus solenopsis* in India based on MAXENT ecological niche model. *J Environ Biol*, 2014, 35: 973.
- [10] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(一部). 北京: 中国医药科技出版社, 2020. pp 59–60.
National Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China (Part 1). Beijing: China Pharmaceutical Science and Technology Press, 2020. pp 59–60 (in Chinese).
- [11] 胡荣丽. 天麻栽培管理技术分析. 农业与技术, 2015, 35(4): 111.
Hu R L. Analysis of cultivation and management technical of *Gastrodia elata*. *Agric Technol*, 2015, 35(4): 111 (in Chinese with English abstract).
- [12] 郭怡博, 莫可, 王桂荣, 张悦, 张伟, 周建国, 孙志蓉. 未来气候条件下天麻适生区预测及时空变化分析. 中国中医药信息杂志, 2022, 29(7): 1–7.
Guo Y B, Mo K, Wang G R, Zhang Y, Zhang W, Zhou J G, Sun Z

- R. Prediction and spatial and temporal variation analysis of asparagus suitable areas under future climate conditions. *Chin J Trad Chin Med Inf*, 2022, 29(7): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- [13] 张琴, 张东方, 吴明丽, 郭杰, 孙成忠. 基于生态位模型预测天麻全球潜在适生区. *植物生态学报*, 2017, 41: 770–778.
Zhang Q, Zhang D F, Wu M L, Guo J, Sun C Z. Predicting the global potential fitness zones of asparagus based on ecological niche model. *J Plant Ecol*, 2017, 41: 770–778 (in Chinese with English abstract).
- [14] 胡青青, 王咏菠, 胥烜勋, 黎敏, 王涛. 天麻栽培技术与品种选育研究进展. *中国药理学杂志*, 2021, 56: 868–874.
Hu Q Q, Wang Y B, Xu X X, Li M, Wang T. Progress of cultivation technology and variety selection of Tianma. *Chin J Pharm*, 2021, 56: 868–874 (in Chinese with English abstract).
- [15] 余彬情, 杨玲, 张启鑫, 田佳昕, 万文勇. 天麻环境习性分析及栽培方法探究. *南方农业*, 2020, 14(32): 58–59.
Yu B Q, Yang L, Zhang Q X, Tian J X, Wan W Y. Analysis of environmental habit and cultivation method of *Gastrodia elata*. *Southern Agric*, 2020, 14(32): 58–59 (in Chinese with English abstract).
- [16] 刘金美, 田治蛟, 戴堃, 张昌飞, 余显伦, 郭有刚, 刘大会. 昭通乌天麻最佳采收期研究. *中国现代中药*, 2016, 18(2): 189–192.
Liu J M, Tian Z J, Dai K, Zhang C F, Yu X L, Guo Y G, Liu D H. Study on the optimal harvesting period of Zhaotong Wu Tianma. *Modern Chin Med*, 2016, 18(2): 189–192 (in Chinese with English abstract).
- [17] 陈顺芳, 黄先敏, 祁岑. 天麻的生长发育过程及其营养特性. *昭通师范高等专科学校学报*, 2011, 33(5): 19–21.
Chen S F, Huang X M, Qi C. Growth and development process of asparagus and its nutritional characteristics. *J Zhaotong Norm Coll High Educat*, 2011, 33(5): 19–21 (in Chinese with English abstract).
- [18] 王海峰, 王超群, 尉广飞, 黄钦, 张海珠, 董林林. 天麻全国产地适宜性区划及其种植技术. *中国现代中药*, 2021, 23: 1869–1875.
Wang H F, Wang C Q, Wei G F, Huang Q, Zhang H Z, Dong L L. The suitability zoning of national origin of asparagus and its cultivation technology. *Modern Chin Med*, 2021, 23: 1869–1875 (in Chinese with English abstract).
- [19] 江维克, 张进强, 郭兰萍, 杨野, 肖承鸿, 袁青松, 王晓, 周涛. 天麻种植产业生态化发展的思路与建议. *中国中药杂志*, 2022, 47: 2277–2280.
Jiang W K, Zhang J Q, Guo L P, Yang Y, Xiao C H, Yuan Q S, Wang X, Zhou T. Ideas and suggestions for ecological development of Tianma plantation industry. *Chin J Trad Chin Med*, 2022, 47: 2277–2280 (in Chinese with English abstract).
- [20] Sillero N. What does ecological modelling model A proposed classification of ecological niche models based on their underlying methods. *Ecol Modell*, 2011, 222: 1343–1346.
- [21] Peterson A T, Nakazawa Y. Environmental data sets matter in ecological niche modelling: an example with *Solenopsis invicta* and *Solenopsis richteri*. *Global Ecol Biogeogr*, 2008, 17: 135–144.
- [22] Worthington T A, Zhang T, Logue D R, Mittelstet A R, Brewer K. Landscape and flow metrics affecting the distribution of a federally-threatened fish: improving management, model fit, and model transferability. *Ecol Modell*, 2016, 342: 1–18.
- [23] 刘炳仁. 天麻高产栽培技术. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1992. pp 21–22.
Liu B R. Cultivation Technology of High Yield of Asparagus. Shanghai: Shanghai Science and Technology Literature Press, 1992. pp 21–22 (in Chinese).
- [24] 彭华胜, 王德群. 生态因子与古今天麻产区的关系. *现代中药研究与实践*, 2007, 22(2): 6–9.
Peng H S, Wang D Q. Affecting ecological factor on location of *Gastrodia elata*. *Res Pract Chin Med*, 2007, 22(2): 6–9 (in Chinese with English abstract).
- [25] 何海艳, 王玉川, 丁培超, 胡德分, 余显伦, 杨成巧. 天麻种植生态气候条件及增产技术. *南方农业*, 2018, 12(36): 5–7.
He H Y, Wang Y C, Ding P C, Hu D F, Yu X L, Yang C Q. Ecological and climatic conditions of asparagus cultivation and yield enhancement techniques. *Southern Agric*, 2018, 12(36): 5–7 (in Chinese with English abstract).
- [26] 曾玉洁, 王业红, 谭涛, 王传华. 北方蜜环菌菌索生长、发育对环境氧气及土壤湿度的响应. *菌物学报*, 2022, 41: 739–748.
Zeng Y J, Wang Y H, Tan T, Wang C H. Response of growth and development of northern honey ring fungus mycelium to environmental oxygen and soil moisture. *J Mycol*, 2022, 41: 739–748 (in Chinese with English abstract).
- [27] 袁崇文. 中国天麻. 贵阳: 贵州科技出版社, 2002. p 17.
Yuan C W. Chinese Tianma. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 2002. p 17 (in Chinese).
- [28] 刘威, 赵致, 王华磊, 罗夫来, 李金玲, 刘红昌, 罗春丽. 不同坡向与种植层数组合对仿野生栽培红天麻的影响. *中药材*, 2015, 38: 883–888.
Liu W, Zhao Z, Wang H L, Luo F L, Li J L, Liu H C, Luo C L. Effects of different combinations of slope orientation and planting layers on wild-cultivated red asparagus. *Chin Med Mater*, 2015, 38: 883–888 (in Chinese with English abstract).
- [29] Singh K, McClean C J, Buker P, Hartley S E, Hill J K. Mapping regional risks from climate change for rainfed rice cultivation in India. *Agric Syst*, 2017, 156: 76–84.
- [30] Papier C M, Poulos H M, Kusch A. Invasive species and carbon flux: the case of invasive beavers (*Castor canadensis*) in riparian Nothofagus forests of Tierra del Fuego Chile. *Clim Change*, 2019, 153: 219–234.
- [31] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 1988, 240: 1285–1293.
- [32] 马青江, 孙操稳, 张乐英, 胡梓恒, 张仕娇, 洪香香. 东亚四照花群体中国潜在适生区预测研究. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2019, 43(5): 135–140.
Ma Q J, Sun C W, Zhang L Y, Hu Z H, Zhang S J, Fu X X. Prediction of the potential habitat of East Asian Tetrahymena group in China. *J Nanjing For Univ (Nat Sci Edn)*, 2019, 43(5): 135–140 (in Chinese with English abstract).
- [33] 周元. 天麻生物学特性研究. 西北农林科技大学硕士学位论文, 陕西杨凌, 2005.
Zhou Y. Biological Characterization of Asparagus. MS Thesis of Northwest Agriculture and Forestry University of Science and Technology, Yangling, Shaanxi, China, 2005 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- [34] 罗夫来, 刘威, 张博华, 赵致, 王华磊, 李金玲. 地理与植被因子对云贵高原仿野生栽培天麻的影响. *北方园艺*, 2023, (9): 97–103.
Luo F L, Liu W, Zhang B H, Zhao Z, Wang H L, Li J L. Influence of geographic and vegetation factors on the wild cultivation of Tianma in the Yunnan-Guizhou Plateau. *Northern Horticulture*, 2023, (9): 97–103 (in Chinese with English abstract).
- [35] 中国植被编辑委员会. 中国植被. 北京: 科学出版社, 1995. pp 731–745.
Chinese Vegetation Editorial Committee. Vegetation of China. Beijing: Science Press, 1995. pp 731–745 (in Chinese).
- [36] 中国医学科学院药物研究所. 中药志. 北京: 人民卫生出版社, 1959. p 88.
Institute of Pharmaceutical Sciences, Chinese Academy of Medical Sciences. Chinese Medicine. Beijing: People's Health Publishing House, 1959. p 88 (in Chinese).
- [37] 罗夫来, 刘威, 张博华, 赵致, 王华磊, 李金玲, 罗春丽. 云贵高原仿野生栽培天麻的产量影响因子及生长发育规律研究. III: 生长发育规律与生境因子特征. *时珍国医国药*, 2021, 32: 1221–1225.
Luo F L, Liu W, Zhang B H, Zhao Z, Wang H L, Li J L, Luo C L. Study on yield influencing factors and growth and development patterns of wild cultivated asparagus on the Yunnan-Guizhou plateau. III: Growth and development patterns and habitat factor characteristics. *Lishizhen Med Mater Medica Res*, 2021, 32: 1221–1225 (in Chinese with English abstract).
- [38] Yang S, Wang X L, Wild M. Homogenization and trend analysis of the 1958–2016 in situ surface solar radiation records in China. *J Climate*, 2018, 31: 4529–4541.
- [39] 齐月, 房世波, 周文佐. 近 50 年来中国地面太阳辐射变化及其空间分布. *生态学报*, 2014, 34: 7444–7453.
Qi Y, Fang S B, Zhou W Z. Variation and spatial distribution of surface solar radiation in China over recent 50 years. *Acta Ecol Sin*, 2014, 34: 7444–7453 (in Chinese with English abstract).
- [40] 申彦波, 王标. 近 50 年中国东南地区地面太阳辐射变化对气温变化的影响. *地球物理学报*, 2011, 54: 1457–1465.
Shen Y B, Wang B. Effect of surface solar radiation variations on temperature in South-East China during recent 50 years. *Chin J Geophys*, 2011, 54: 1457–1465 (in Chinese with English abstract).
- [41] 石子为, 马聪吉, 康传志, 王丽, 张智慧, 陈骏飞, 张小波, 刘大会. 基于空间分析的昭通天麻生态适宜性区划研究. *中国中药杂志*, 2016, 41: 3155–3163.
Shi Z W, Ma C J, Kang C Z, Wang L, Zhang Z H, Chen J F, Zhang X B, Liu D H. Research on the ecological suitability zoning of Zhaotong Tianma based on spatial analysis. *Chin J Trad Chin Med*, 2016, 41: 3155–3163 (in Chinese with English abstract).