

中药山慈菇基原物种生态适宜性关键生态因子及区划研究^{*}

池玉洁, 朱明玉, 刘义飞, 刘 迪, 森 林, 胡志刚, 张景景^{**}

(湖北中医药大学药学院 武汉 430065)

摘 要:目的 为山慈菇基原物种科学引种和选址扩种提供理论基础。方法 通过查询多个数据库和实地调查,收集山慈菇基原物种在全国范围内的257个有效分布数据。综合海拔、温度、太阳辐射、降雨量和水汽压5个类别共68个生态因子,利用Maxent和ArcGIS对山慈菇基原物种的生态适宜性进行分析。结果 分析得到影响山慈菇生态适宜性的关键生态因子主要是降雨量、太阳辐射以及海拔,不同基原物种间关键生态因子有显著差异。最适宜杜鹃兰、独蒜兰以及云南独蒜兰生长的潜在区域分别集中在台湾、华南地区以及云南四川相接一带。结论 本研究进一步对其潜在分布区分别进行了生态适宜性等级划分,为山慈菇合理引种栽培及人工规范化扩种提供科学依据。

关键词:山慈菇 Maxent模型及ArcGIS 生态因子 生态适宜性

doi: 10.11842/wst.20230808005 中图分类号: S567 文献标识码: A

山慈菇系兰科植物杜鹃兰 *Cremastra appendiculata* (D. Don) Makino、独蒜兰 *Pleione bulbocodioides* (Franch.) Rolfe 或云南独蒜兰 *P. yunnanensis* Rolfe 的干燥假鳞茎^[1],含有萜类、联苄类、糖苷类、黄烷酮类、生物碱类、萜类等成分^[2-4],具有清热解毒、消痈散结之功效^[5],临床常用于肝癌、肺癌和乳腺癌等多种疾病的治疗^[6-8]。近年来,随着中药材市场需求量的不断上升导致越来越多野生药用资源濒临灭绝^[9-12],急需在科学数据的指导下对其生产格局进行合理规划^[13-14]。

随着中药材产地适宜性分析方法的不断发展,物种分布模型(Species distribution models, SDMs)逐渐成为了研究物种与生态因子之间的关系及物种适应性的重要工具^[15]。最大熵(The maximum entropy, MaxEnt)模型是其中应用最广泛、预测精度较高的模型^[16-19],已被用于人参^[20]、山茱萸^[21]、多花黄精^[22]等多种药材基原植物的适宜性分析评价中。Li等^[23]基于108个分布点数据和19个生态因子研究发现杜鹃兰潜在

生态适宜区主要分布在四川、甘肃、陕西、重庆、贵州、湖北、安徽等省市,且在未来其适生区面积可能会减少。山慈菇3个基原物种中,杜鹃兰和独蒜兰在我国分布虽较广泛,但缺乏因地制宜的种植区划指导。云南独蒜兰分布范围较为狭窄,需开发其他生态相似性高的区域进行扩种。另外,长期以来市场上对山慈菇药材的供不应求、人为大量采挖等原因致其野生资源濒临灭绝^[24],迫切需要科学指导扩大种植面积。综合3个基原物种的生态适宜性进行关键生态因子以及潜在适宜性分布的研究,可以有效避免当前出现的盲目引种、有效种植面积小、药材道地性差的多种共性问题,为山慈菇进一步扩种提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 样点信息搜集及处理

基于中药野生分布区、种植区和道地产区3个方面进行选点的原则^[25],通过参考中国数字植物标本馆

收稿日期:2023-08-08

修回日期:2024-02-02

^{*} 湖北省教育厅重点项目(D20212006):濒危药用兰科植物杜鹃兰种质资源评价与生态种植研究,负责人:张景景。

^{**} 通讯作者:张景景,副教授,主要研究方向:中药资源评价与组学研究。

(<http://www.cvh.org.cn/>), 全球生物多样性信息平台 (<http://www.gbif.org/>), 以及查阅文献、野外自采等方式收集山慈菇3个基原物种的相关样点信息。在去除早于1970年、具体经纬度位置不明确以及重复的样点信息后, 为避免因空间关联性较大造成实验数据过度拟合, 在距离<5 km的分布点中只选取一个分布点^[16]。共收集到相关有效分布数据257个, 其中杜鹃兰118个样点、独蒜兰113个样点、云南独蒜兰26个样点。

1.2 生态因子数据来源及处理

山慈菇基原植物性喜凉爽、湿润、半遮阴的自然环境^[13-14]。基于这一特性, 本研究围绕海拔、温度、光照、降雨、水汽压5个方面的生态因子展开研究。使用WorldClim全球气候数据库(<https://www.worldclim.org>)的共68个生态因子数据(1970—2000年): 海拔; 年平均气温; 昼夜温差月均值; 等温性; 温度季节性变化的标准差; 最暖月最高温; 最冷月最低温; 年均温变化范围; 最湿季平均温; 最干季平均温; 最暖季平均温; 最冷季平均温; 年均降水量; 最湿月降水量; 最干月降水量; 季节降水量变异系数; 最湿季降水量; 最干季降水量; 最暖季降水量; 最冷季降水量; 1-12月月平均气温; 1-12月月太阳辐射; 1-12月月降雨量; 1-12月月水汽压。68个生态因子数据的精度均为2.5 arc-minutes, 通过ArcGIS裁剪为研究区范围后转换为ACS II文件格式备用。

1.3 生态适宜性分析流程

1.3.1 生态因子分析

通过ArcGIS进一步提取出3个物种257个样点的68个生态因子数据, 利用SPSS数据统计软件对生态因子进行Pearson相关性检验, 当两个因子之间的 $|r| > 0.8$, 表明二者存在共线性关系。将获得的不同山慈菇基原物种分布点坐标及68个生态因子数据分别导入MaxEnt模型^[26](Version 3.4.1, <https://github.com/mrmaxent/Maxent>)中, 75%的数据用于模型训练, 而其余数据用于模型测试, 选择利用刀切法(Jackknife)来检测变量的重要性。为了降低模型误差, 将最大背景点数设置为10000, 重复10次, 其他参数都设置为默认值^[27]。通过MaxEnt模型对68个生态因子进行运算, 获得不同物种各生态因子对其生态适宜性的贡献率, 进一步找到关键生态因子。MaxEnt模型预测的准确性以受试者工作特征曲线(Receiver operating characteristic curve, ROC曲线)的曲线下面积(Area under curve,

AUC)表示。AUC值为0.5-1, 越接近1, 预测精度越高^[21]。

1.3.2 生态适宜性区划

去除掉对分布贡献率为0的生态因子后, 为避免各因子间产生多重共线性(过拟合)问题而对物种潜在适宜性区域预测结果造成影响^[28], 一组高度交叉相关的因子($|r| > 0.8$)将保留其中贡献率较大的一个纳入MaxEnt模型生态适宜性区划分析中。最终杜鹃兰、独蒜兰和云南独蒜兰分别筛选了12、13和12个生态因子用于其对应潜在生态适宜性区域预测, 如表1所示。将每个物种10次运算的平均预测结果导入ArcGIS中, 利用重分类功能将其潜在适宜分布区分别依次平均划分为4个等级: 非适生区、低适生区、中适生区和高适生区。为进一步计算不同省份潜在生态适宜性分布面积, 在ArcGIS中从全国地图中提取出不同省份的地图数据, 提取出不同物种对应省份的预测结果, 依据划分等级进行重分类并计算不同适生区面积(面积=像元个数×像元面积)。

2 结果与分析

2.1 模型预测精度

受试者工作特征(ROC)曲线如图1所示, 3个物种分别基于MaxEnt模型进行生态因子分析(图1A)和生态适宜性区划预测(图1B), 对应每10次运行的平均AUC值均高于0.96, 表明本研究MaxEnt模型对杜鹃兰、独蒜兰、云南独蒜兰的生态适宜性分析精度均较高。

表1 用于生态适宜性区划的生态因子

序号	杜鹃兰	独蒜兰	云南独蒜兰
1	10月降雨量	10月降雨量	7月太阳辐射
2	4月降雨量	5月太阳辐射	6月太阳辐射
3	年均降雨量	海拔	海拔
4	海拔	1月水汽压	最冷月最低温
5	4月太阳辐射	4月降雨量	1月太阳辐射
6	6月太阳辐射	最湿季平均温	9月太阳辐射
7	11月水汽压	6月太阳辐射	最干月降水量
8	年均温变化范围	2月平均温度	3月降雨量
9	10月太阳辐射	11月太阳辐射	等温性
10	8月太阳辐射	年均温变化范围	6月降雨量
11	季节降水量变异系数	昼夜温差月均值	昼夜温差月均值
12	昼夜温差月均值	9月降雨量	9月降雨量
13	-	等温性	-

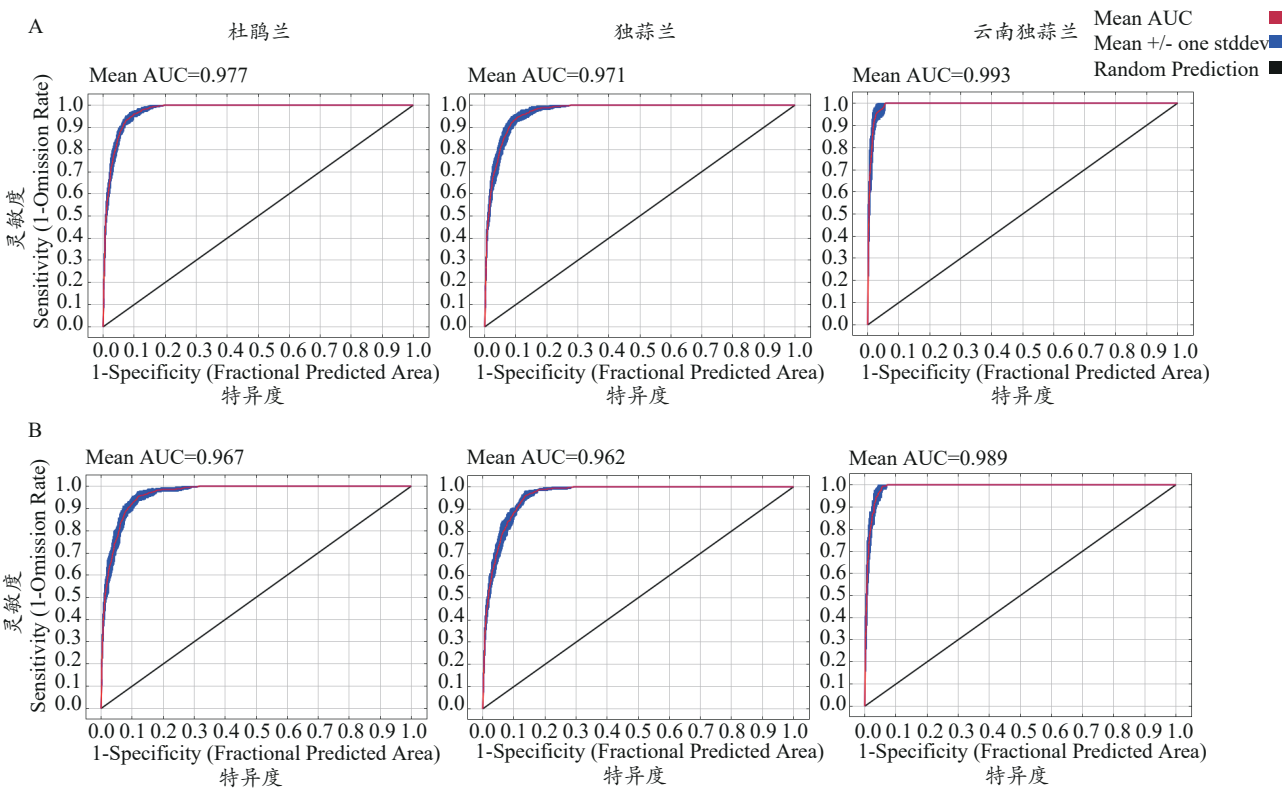


图1 MaxEnt模型受试者工作特征曲线

注:A:基于68个生态因子;B:基于生态适宜性区划的生态因子。

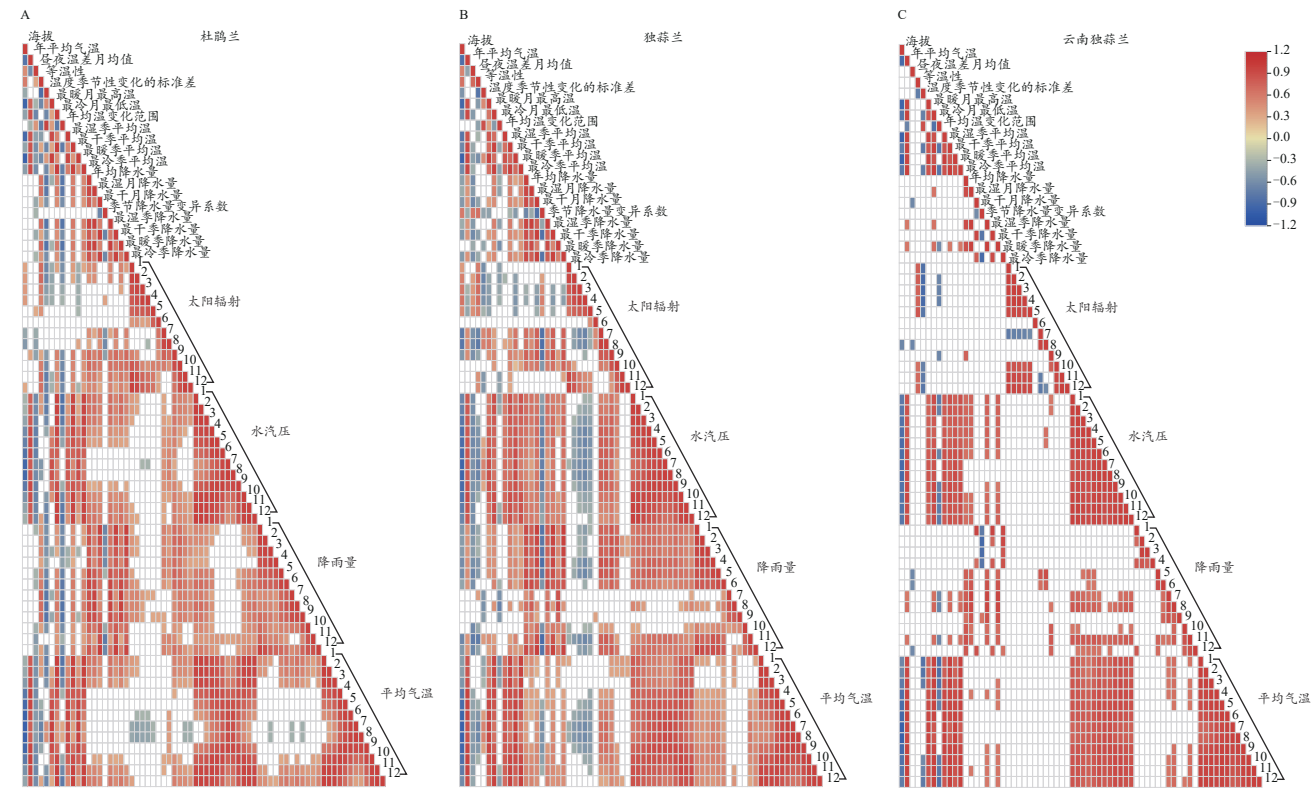


图2 不同物种生态因子间相关性热图

注:A:杜鹃兰;B:独蒜兰;C:云南独蒜兰。

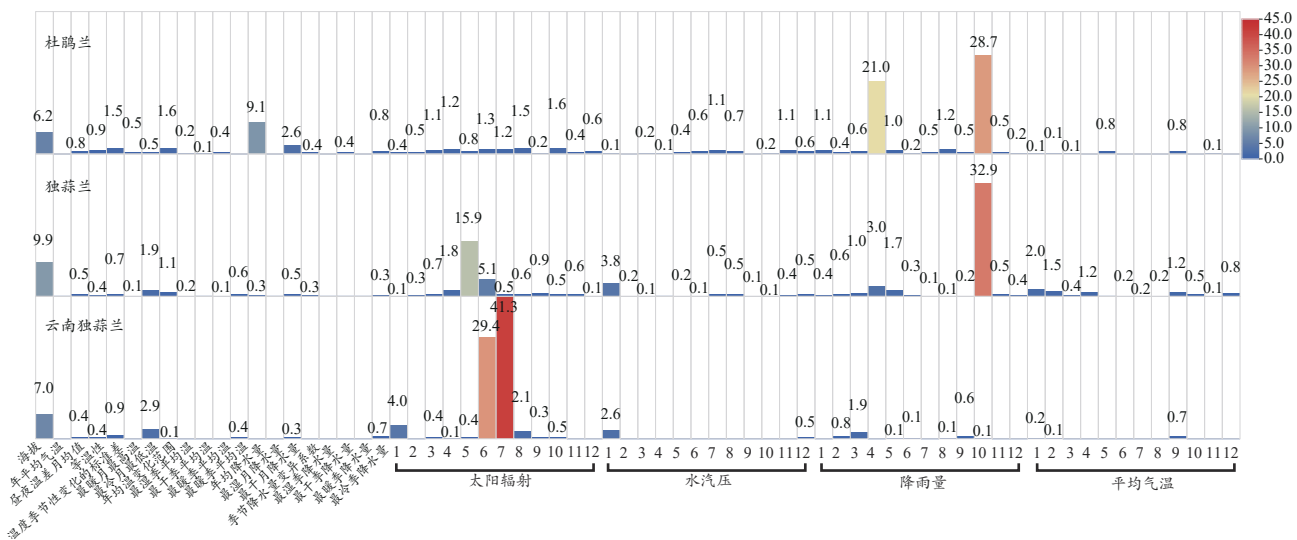


图3 生态因子贡献率

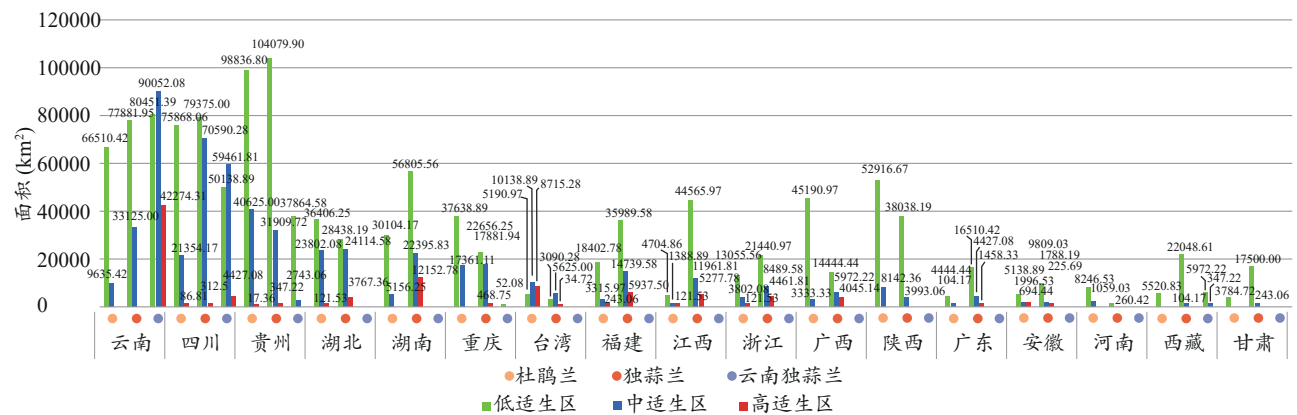


图4 3个物种生态适宜性区划各省市自治区分布面积

2.2 生态因子间相关性

一些生态因子在山慈菇3个基原物种中均表现出相似的强相关性,如图2所示。同类别生态因子之间都表现出了较强的正相关,尤其在月度数据中,同类型两两生态因子互相越邻近月份,相关性越明显。水汽压和平均气温之间紧密正相关,且这两种生态因子与海拔之间都存在较强的负相关。就不同物种来看,杜鹃兰(图2A)和独蒜兰(图2B)的生态因子间相关性相似,二者部分水汽压和降雨量生态因子间均存在较弱的正相关。对于云南独蒜兰(图2C),邻月的同类型生态因子间较另外两个物种表现出了更强的正相关,海拔与温度、水汽压间的负相关性也较强。

2.3 生态适宜性关键生态因子

68个生态因子对3个物种的生态适宜性贡献率如图3所示。总体而言,海拔、降雨量、太阳辐射是影响山慈菇基原物种生态适宜性的关键生态因子,但不同

物种具有明显差异。对杜鹃兰生态适宜性影响最大的生态因子种类主要是降雨量(69.2%),其次是海拔(6.2%)和太阳辐射(10.8%)。其中,10月降雨量贡献率最大(28.7%),其次是3月降雨量(21.0%)和年均降水量(9.1%);对独蒜兰生态适宜性影响最大的生态因子种类主要是降雨量(42.6%)和太阳辐射(27.1%),其次是海拔(9.9%)。10月降雨量在独蒜兰中也表现出最高的贡献率(32.9%),其次是5月太阳辐射(15.9%);对云南独蒜兰生态适宜性影响最大的生态因子种类则主要是太阳辐射(78.5%),其次是海拔(7.0%),尤其7月(41.3%)和6月(29.4%)太阳辐射的贡献率显著。

2.4 生态适宜性区划

山慈菇基原物种的潜在生态适宜性区划如图4所示。3个物种的适宜分布区域均在中国南部地区。杜鹃兰的潜在高适生区集中在台湾地区,面积约

8715 km²,其次在安徽(694 km²)、福建(243 km²)、湖北(121 km²)、江西(121 km²)和浙江(121 km²)等地也有较少面积为潜在高适生区;其潜在中适生区则主要集中在四川盆地周围的高山区域。独蒜兰的潜在高适生区则主要分布在华南地区,尤其在湖南(12 152 km²)、福建(5937 km²)、江西(5277 km²)、浙江(4461 km²)、广西壮族自治区(4045 km²)、湖北(3767 km²)等地区有较广泛的高适生区面积;其潜在中适生区分布与杜鹃兰重叠区域较大,但在四川南部及相邻云南北部地区也有较广泛的中适生区;云南独蒜兰潜在高适生区和中适生区分布都集中在云南四川相接一带,但其潜在高适生区更加集中在云南(42 274 km²),在四川有较少分布面积(4427 km²)。

3 讨论

3.1 山慈菇基原物种生态因子研究

生态型是道地药材形成的生物学本质^[29],研究药材生态适宜性的关键生态因子具有重要意义。吴沙沙等^[13-14]分别对杜鹃兰、独蒜兰、云南独蒜兰的无公害种植体系进行研究,发现杜鹃兰对温度、湿度和光照度等的适应范围很广,而独蒜兰和云南独蒜兰与之相比适应范围相对较小。本研究通过 MaxEnt 模型分析了68个生态因子对于山慈菇3个基原物种杜鹃兰、独蒜兰和云南独蒜兰生态适宜性的影响,其中海拔对其均有较高的贡献率。海拔高度是影响植株生长发育、产量和品质的重要生态因子,温度和饱和水汽压亏缺随海拔升高而降低^[30],藏北高原高寒草甸地上生物量与海拔、湿度显著正相关,而与温度负相关^[31],水稻生育期随海拔高度增加而延长,籼稻生育期的变化对较高海拔的低温更为敏感^[32]。结合本研究生态因子间的相关性分析,海拔、气温、水汽压等生态因子可能相互作用,共同对山慈菇基原物种进化、生长发育等产生一定的作用。10月降雨量是对杜鹃兰和独蒜兰生态

适宜性贡献率最高的生态因子,这一阶段,3个基原物种的蒴果都处于生长发育的关键时期(9-12月)^[33]。4月降雨量和5月太阳辐射也分别对杜鹃兰和独蒜兰生态适宜性有较高的影响,这一阶段处于植株重要的开花期(4-6月)^[33]。云南独蒜兰与杜鹃兰、独蒜兰相比,生长范围狭窄,对生长环境要求更高,对适宜光照范围更加敏感^[13-14],本研究中6、7月的太阳辐射对其生态适宜性表现出了极其重要的影响。

3.2 生态适宜性区划研究

本研究基于山慈菇3个基原物种综合对其当前潜在生态适宜性区划分布进行了研究,其中杜鹃兰预测结果与Li等^[23]研究结果相一致,但高适生区分布略有不同,更加集中在台湾地区。这可能与所选取生态因子的种类不同有关,山慈菇基原物种较喜阴凉环境,结合关键生态因子的分析可以反映出补充太阳辐射类别的生态因子对其生态适宜性分析的重要性。另外,注意到杜鹃兰与一个原产自台湾省的小兰屿蝴蝶兰(*Phalaenopsis equestris*)在进化上有着密切的联系,与其他的兰科植物相比,两者间共享着最多的同源基因簇,且在分化前两者间就发生了全基因组复制事件^[34]。物种进化和生态适宜性之间是密不可分的,本研究中杜鹃兰潜在高适生区分布集中在台湾省,这可能与遗传进化过程有一定的关联。另外,本研究杜鹃兰和独蒜兰的潜在适宜分布均比较广泛,中适生区和高适生区在多个省份均有分布,在实际生产中可考虑同地种植,尤其是四川盆地周围高山区域。但杜鹃兰更适宜在台湾扩大种植规模,独蒜兰则应依据区划在华南地区及安徽、湖北等多个省份的中适生区和高适生区进行小规模扩种。云南独蒜兰的适宜分布范围相对狭窄,对气候条件的要求也更加严苛,而目前云南四川相接一带现有栽培面积较小,故应在现有基础上扩增种植区域面积,并加大对其道地产区野生资源的保护力度。

参考文献

- 1 国家药典委员会. 中华人民共和国药典. 北京: 中国医药科技出版社, 2020:34-35.
- 2 Xue Z, Li S, Wang S J, et al. Mono-, Bi-, and triphenanthrenes from the tubers of *Cremastra appendiculata*. *J Nat Prod*, 2006, 69(6): 907-913.
- 3 司函瑞, 司雨, 焦玉凤, 等. 山慈菇化学成分及其药理作用研究进展. 辽宁中医药大学学报, 2020, 22(5):151-155.
- 4 原文珂, 覃彬华, 李小平, 等. 山慈菇的化学成分研究. 中国现代中药, 2017, 19(5):639-641, 669.
- 5 王骁, 范焕芳, 李德辉, 等. 山慈菇抗肿瘤作用研究进展. 江苏中医药, 2023, 55(2):74-76.
- 6 郝壮壮, 曹宇欣, 刘朦朦, 等. 基于HPLC指纹图谱及多指标成分测

- 定结合化学计量学的不同商品规格山慈菇质量差异分析. 中草药, 2023, 54(6):1935-1945.
- 7 王泯蓉, 张勇, 沈娟. 山慈菇多糖对人卵巢癌细胞增殖和上皮间质转化的影响. 中国临床药理学杂志, 2023, 39(13):1899-1903.
 - 8 张志强, 魏毅强, 杨亚莉, 等. 山慈菇多糖对肝癌腹水荷瘤小鼠症状的改善机制. 西北药学杂志, 2023, 38(3):74-80.
 - 9 闫铃铃, 王贝, 王龙, 等. 珍稀濒危中药替代模式的构建与组分替代研究策略. 中国中药杂志, 2023, 48(1):30-38.
 - 10 陶文琴, 廖初琴, 黄建睿, 等. 广东野生珍稀濒危南药植物资源调查. 中国野生植物资源, 2022, 41(11):74-79.
 - 11 张成才, 王升, 王月枫, 等. 药用植物组织培养技术在中药资源可持续发展中的应用研究. 中国中药杂志, 2023, 48(5):1186-1193.
 - 12 张光富, 熊天石, 孙婷, 等. 江苏珍稀濒危植物的多样性、分布及保护. 生物多样性, 2022, 30(2):27-36.
 - 13 吴沙沙, 戴中武, 凌瑞, 等. 杜鹃兰无公害种植体系研究. 世界中医药, 2020, 15(15):2249-2254.
 - 14 吴沙沙, 沈立明, 曹孟霞, 等. 独蒜兰和云南独蒜兰无公害种植体系研究. 世界中医药, 2020, 15(13):1920-1925.
 - 15 许仲林, 彭焕华, 彭守璋. 物种分布模型的发展及评价方法. 生态学报, 2015, 35(2):557-567.
 - 16 刘婷, 曹家豪, 齐瑞, 等. 基于GIS和MaxEnt模型分析气候变化背景下紫果云杉的潜在分布区. 西北植物学报, 2022, 42(3):481-491.
 - 17 张雪梅, 刘涛, 任世杰, 等. 基于MaxEnt模型的3种野生牧草西藏地区潜在适生区分析. 草地学报, 2023, 31(8):2314-2322.
 - 18 姚政宇, 韩其飞, 林彬. 基于最大熵模型的新疆主要有毒杂草分布区预测. 生态学报, 2023, 43(12):5096-5109.
 - 19 李芳菲, 李丽, 吴巩胜, 等. 基于最大熵模型的青海祁连山雪豹生境适宜性评价. 生态学报, 2023, 43(6):2202-2209.
 - 20 张惠惠, 孟祥霄, 林余霖, 等. 基于GMPGIS系统和MaxEnt模型预测人参全球潜在生长区域. 中国中药杂志, 2023, 48(18):4959-4966.
 - 21 张飞, 陈随清, 王利丽, 等. 基于Maxent和ArcGIS的山茱萸生态适宜性区划研究. 中国中药杂志, 2017, 42(16):3078-3083.
 - 22 章鹏飞, 张虹, 张小波, 等. 多花黄精生态适宜性区划研究. 中国中药杂志, 2020, 45(13):3073-3078.
 - 23 Li W N, Zhao Q, Guo M H, *et al.* Predicting the potential distribution of the endangered plant *Cremastra appendiculata* (Orchidaceae) in China under multiple climate change scenarios. *Forests*, 2022, 13(9):1504.
 - 24 韦红边, 吕享, 高晓峰, 等. 兰科药用植物杜鹃兰的研究进展. 贵州农业科学, 2017, 45(7):88-92.
 - 25 陈士林, 索凤梅, 韩建萍, 等. 中国药材生态适宜性分析及生产区划. 中草药, 2007, 38(4):481-487.
 - 26 Phillips S J, Anderson R P, Dudík M, *et al.* Opening the black box: An open-source release of Maxent. *Ecography*, 2017, 40(7):887-893.
 - 27 Sun S X, Zhang Y, Huang D Z, *et al.* The effect of climate change on the richness distribution pattern of oaks (*Quercus* L.) in China. *Sci Total Environ*, 2020, 744:140786.
 - 28 李建宇, 陈燕婷, 郭燕青, 等. 基于MaxEnt预测未来气候条件下钻叶紫菀在中国的潜在适生区. 植物保护, 2023, 49(2):92-102.
 - 29 黄林芳, 张翔, 陈士林. 道地药材品质生态学研究进展. 世界科学技术-中医药现代化, 2019, 21(5):844-853.
 - 30 付刚, 沈振西. 藏北高原不同海拔高度高寒草甸蒸散与环境湿度的关系. 中国草地学报, 2015, 37(3):67-73.
 - 31 付刚, 周宇庭, 沈振西, 等. 藏北高原高寒草甸地上生物量与气候因子的关系. 中国草地学报, 2011, 33(4):31-36.
 - 32 杨荣教, 郭梦逸, 王白昌, 等. 不同海拔条件下籼、粳稻生长发育差异分析. 分子植物育种, 1-12 [2024-02-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230831.2009.014.html>.
 - 33 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志. 北京: 科学出版社, 2022:164-167.
 - 34 Wang J, Xie J J, Chen H X, *et al.* A draft genome of the medicinal plant *Cremastra appendiculata* (D. Don) provides insights into the colchicine biosynthetic pathway. *Commun Biol*, 2022, 5:1294.

Key Environment Factors and Regionalization of the Ecological Suitability of the Original Species of Chinese Medicine *Cremastrae Pseudobulbus*/Pleiones *Pseudobulbus*

CHI Yujie, ZHU Mingyu, LIU Yifei, LIU Di, SEN Lin, HU Zhigang, ZHANG Jingjing
(College of Pharmacy, Hubei University of Chinese Medicine, Wuhan 430065, China)

Abstract: Objective In order to offer a theoretical foundation for *Cremastrae Pseudobulbus*/Pleiones *Pseudobulbus* original species scientific introduction and site selection for expansion. Methods We gathered sample distribution information for the original species of *Cremastrae Pseudobulbus*/Pleiones *Pseudobulbus* nationwide by consulting various databases and conducting field investigations. A total of 257 effective distribution data were gathered. Altitude, temperature, solar radiation, precipitation, and water vapor pressure were among the 68 environment factors that were chosen from 5 categories. The ecological suitability of *Cremastrae Pseudobulbus*/Pleiones *Pseudobulbus* original species was investigated using Maxent and ArcGIS. Results The investigation revealed that precipitation, solar radiation, and

altitude were the core environment factors influencing the ecological suitability of *Crematae Pseudobulbus/Pleiones Pseudobulbus*. The most important environment factors varied significantly between diverse original species. The most suitable potential areas for the growth of *Cremata appendiculata*, *Pleione bulbocodioides*, and *Pleione yunnanensis* were concentrated in Taiwan, South China, and the adjacent areas of Yunnan and Sichuan, respectively. Conclusion Further ecological suitability levels were classified for their potential distribution areas, providing a scientific basis for the rational introduction, cultivation, and artificial standardized expansion of the *Crematae Pseudobulbus/Pleiones Pseudobulbus*.

Keywords: *Crematae Pseudobulbus/Pleiones Pseudobulbus*, Maxent and ArcGIS, Environment factors, Ecological suitability

(责任编辑: 李青)