DOI:10.13193/j.issn.1673-7717.2025.05.035

柔毛淫羊藿生态适宜性区划研究

赖锟阳[1,2,3],崔欣萍[1,3],张宇飞[4],闫滨滨[1,3],万修福[1,3],
孙楷[1,3],康传志[1,3],吕朝耕[1,3],张燕[1,3],朱寿东[1,3]
(1.中国中医科学院中药资源中心道地药材品质保障与资源持续利用全国重点实验室,北京 100700;
2.广东药科大学中药学院,广东 广州 510006;3.农业农村部中药材生物学与栽培重点实验室,北京 100700;
4.国机集团科学技术研究院有限公司,北京 100080)

摘要:目的 探究中药柔毛淫羊藿的生态适宜性,挖掘柔毛淫羊藿潜在的适生栽培地,促进柔毛淫羊藿资源的开发利用。方法 基于实地调研、文献收集、中国数字标本馆共收集68条有效点位数据,根据柔毛淫羊藿的生理习性选择了54个生态因子,通过最大信息熵(MaxEnt)模型研究柔毛淫羊藿在中国的潜在生态适宜区。结果 CI指数、4月降水、年日照时长、高程、1月平均温、HI指数是对柔毛淫羊藿分布影响较大的6个生态因子,柔毛淫羊藿主要分布于我国甘肃、陕西南部,四川中北部、贵州中北部,重庆东南部、湖南部等地区。结论 本研究对柔毛淫羊藿的生态适宜性区划与2004年版《中国植物志》中描述的范围基本一致,可为柔毛淫羊藿在我国的资源调查、开发利用和可持续发展提供参考。

关键词:柔毛淫羊藿;最大信息熵;地理信息技术;生态因子;生态适宜性
中图分类号:R282.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-7717(2025)05-0191-07

Ecology Suitability Study of Roumao Yinyanghuo(*Epimedium Pubescens* Maxim.)

LAI Kunyang[1,2,3],CUI Xinping[1,3],ZHANG Yufei[4],YAN Binbin[1,3],WAN Xiufu[1,3],
SUN Kai[1,3],KANG Chuanzhi[1,3],LYU Chaogeng[1,3],ZHANG Yan[1,3],ZHU Shoudong[1,3]
(1.National Key Laboratory for Quality Ensurance and Sustainable Use of Daodi Herbs,National Resource Center for Chinese Materia Medica,China Academy of Chinese Medical Sciences,Beijing100700,China;

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3503801);中央级公益性科研院所基本科研业务专项(ZZXT202310,ZZXT202002);中国机械工业集团有限公司科研专项(ZDZX2022-2);财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系项目(CARS-21);中国中医科学院科技创新工程项目(CI2023E002)

作者简介:赖锟阳(2000-),男,广东清远人,硕士在读,研究方向:中药资源栽培与品质评价。
通讯作者:朱寿东(1982-),男,湖北武汉人,副研究员,博士,研究方向:中药资源生态遥感。E-mail:seaky2002@163.com。
张燕(1978-),女,山东泰安人,研究员,博士研究生导师,博士后,研究方向:中药资源与栽培。E-mail:zhangyan8669@126.com。

[9] 孙莉,孙星怡,赵梦雄,等.针刺十三鬼穴治疗抑郁症的研究进展与思考[J].天津中医药,2023,40(11):1490-1496.
[10] 石雨,王育林.十三鬼穴考辨[J].中医学报,2013,28(11):1772-1774.
[11] 王桂玲,胡俊霞,张帆,等.国医大师贺普仁癫痫辨治经验[J].中华中医药杂志,2021,36(6):3336-3338.
[12] 于丽,苗蓓亮,沈燕,等.武连仲开窍顺筋法治疗痉挛性斜颈经验[J].中国针灸,2022,42(6):679-682.
[13] 李进阳,李华南,王海腾,等.基于复杂网络分析针刺治疗痉挛性斜颈的选穴规律[J].天津中医药,2024,41(6):759-765.
[14] 杜欣冉,马玉侠,高树中.高树中内外合治法治疗不孕症经验探赜[J].中华中医药杂志,2023,38(2):666-669.
[15] 张欣茹,翟泰然,石雪萌,等.高树中应用三调法通关治疗郁证经验[J].山东中医杂志,2023,42(8):846-850.
[16] 郝琳瑶,李双阳,王饶琼,等.基于玄府理论探讨脑-肠轴生理功能和病理[J].中华中医药杂志,2024,39(3):1437-1440.
[17] 邵阅嘉,张敬华.基于脑-肠-菌群轴理论辨证施治阿尔茨海默病[J].世界中医药,2024,19(2):244-249,255.
[18] 罗屹,王智,马跃,等.从常见脑病论述中西医角度下的脑-肠轴机制[J].世界中医药,2023,18(12):1772-1777.
[19] 王志磊.基于脑-肠轴和5-HT通路研究隔药灸脐法治疗IBS-D的机制[D].济南:山东中医药大学,2022.
[20] 王薇薇,吴逊.顶叶外侧癫痫——解剖、生理与临床[J].癫痫杂志,2023(2):134-141.
[21] 马炜,陈隆,张伟,等.难治性颞叶癫痫继发双侧强直-阵挛发作的风险因素分析[J].中风与神经疾病杂志,2023,40(1):52-55.
[22] 魏丹丹,龙洁,吴全龙,等.针刺急救的历史沿革与研究现状[J].中国急救医学,2024,44(3):268-274.
[23] 张成静,王坤庆,王绪虎,等.针灸引发卒中患者癫痫样发作及手法急救1例报道[J].实用老年医学,2016,30(5):440.
[24] 刘渡舟.经方临证指南[M].天津:天津科学技术出版社,1993:94-96.
[25] 于瑶,程光宇,程为平.柴胡加龙骨牡蛎汤在神经精神系统疾病中的应用及作用机制研究进展[J].中国医药导报,2023,20(28):54-57,61.
[26] 王鑫,张小倩,阎丽媚,等.基于脑肠轴理论探讨柴胡加龙骨牡蛎汤对癫痫患者胶质纤维酸性蛋白、神经肽Y及S100B的影响[J].辽宁中医杂志,2023,50(1):1-5.

2. School of Traditional Chinese Medicine, Guangdong Pharmaceutical University, Guangzhou 510006, Guangdong, China;
3. Key Laboratory of Biology and Cultivation of Herb Medicine, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100700, China;
4. Sinomach Academy of Science and Technology Co., Beijing 100080, China)

Abstract: *Objective* To study the ecological suitability of Roumao Yinyanghuo (*Epimedium pubescens* Maxim.), explore the potential suitable cultivation sites of Roumao Yinyanghuo (*Epimedium pubescens* Maxim.) and promote the development and utilization of the resources of Roumao Yinyanghuo (*Epimedium pubescens* Maxim.). *Methods* Based on field research, literature collection and the Chinese Digital Herbarium, a total of 68 items of valid point data were collected, and 54 ecological factors were selected according to the physiological habits of Roumao Yinyanghuo (*Epimedium pubescens* Maxim.), and the potential climatic suitability zones of Roumao Yinyanghuo (*Epimedium pubescens* Maxim.) in China were investigated by the Maximum Information Entropy (MaxEnt) model. *Results* CI index, April precipitation, annual sunshine duration, elevation, January mean temperature and HI index were six ecological factors that had a greater impact on the distribution of Roumao Yinyanghuo (*Epimedium pubescens* Maxim.), which was mainly distributed in Gansu and southern Shaanxi, north - central Sichuan, north - central Guizhou, southeastern Chongqing and southern Hunan in China. *Conclusion* The climatic suitability zones of Roumao Yinyanghuo (*Epimedium pubescens* Maxim.) in this experiment was basically consistent with the range described in *Flora of China* (2004 Edition), which can provide a reference for the investigation, exploitation and sustainable development of Roumao Yinyanghuo (*Epimedium pubescens* Maxim.) in China.

Keywords: Roumao Yinyanghuo (*Epimedium pubescens* Maxim.); MaxEnt; ArcGIS; ecological factors; ecology suitability

柔毛淫羊藿 *Epimedium pubescens* Maxim. 为小檗科淫羊藿属多年生草本植物淫羊藿的干燥叶，具有补肾阳、强筋骨、祛风湿之功，可用于肾阳虚衰、筋骨痿软、风湿痹痛，是最有开发潜力的大宗中药材之一[1-3]。柔毛淫羊藿主产于四川北部的广元市和绵阳市[4]，在四川中南部、陕西西南部和甘肃陇南地区也有少量分布。近年来，随着我国医药行业和保健品行业的飞速发展，淫羊藿的市场需求量猛增[5]，为满足市场需求，一些非传统产区纷纷进行引种和人工栽培适应力较强、药效成分含量较高的柔毛淫羊藿。但由于缺乏柔毛淫羊藿与引种地生态因子适宜性的相关研究，各地所产的柔毛淫羊藿药材质量参差不齐，长期如此势必导致柔毛淫羊藿综合品质评价的下降。为加强柔毛淫羊藿的高产高质栽培技术和探析其最优生长环境条件，现对柔毛淫羊藿适宜性地理分布筛查，选取适宜的地域对引种栽培柔毛淫羊藿进行生态适宜性研究以推动柔毛淫羊藿产业发展。

运用最大信息熵模型（MaxEnt）对药用植物生态适宜性进行区划研究的原理是基于已知物种分布资料和生态数据的信息熵，通过最大化信息熵来实现适宜性分布的最大多样性和不确定性[6-7]。MaxEnt 模型相比 ENFA、Bioclim、Domain 等模型的模拟精度更高，结果更为可靠[8]，目前该模型已在厚朴[9]、薄荷[10]、当归[11]、苍术[12]等中药材的适宜性区划中成功应用。本研究以柔毛淫羊藿为对象，利用地理信息系统（GIS）和最大信息熵模型（MaxEnt）对柔毛淫羊藿进行生态适宜性区划研究，明确了总黄酮醇苷（ABCI）含量与生态因子之间的关系，为柔毛淫羊藿筛选合适的栽培生态区提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 柔毛淫羊藿地理分布数据的获取与整理 本研究在2021—2022年实地勘测采样的基础上，结合查阅相关文献资料[13-24]、查阅中国数字标本馆（CVH）（网址：https://www.cvh.ac.cn/）3种途径，共收集了柔毛淫羊藿地理分布点位信息68个（表1）。之后按照 MaxEnt 模型要求，将物种名、地理分布经纬度存储为以.csv 为后缀的格式。

1.2 柔毛淫羊藿的空间数据 本实验的空间数据来自中国中医科学院中药资源中心道地药材品质保障与资源持续利用全国重点实验室提供的“中药资源空间信息网格数据库”（网址：http://www.tcm-resources.com/），根据柔毛淫羊藿的生理习性，共筛选出54个生态因子，包括24个温度因子，21个降水因子，3个土壤因子等，详见表2。

1.3 建立模型与筛选生态因子 采用 Maxent（网址：https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/）对柔毛淫羊藿生态适宜性区域分布进行分析，得到对柔毛淫羊藿生长影响较大的各种生态因子。采样及分析和制图软件采用 ESRI 公司开发的地理信息系统平台 ArcMap 10.2。

Maxent 建模参数设定：随机测试比例 15%，最大迭代次数 1×10^6，设置响应曲线、接受者操作特性曲线（receiver operating characteristic curve，ROC）和刀切法（Jackknife）。以响应曲线评价生态因子适宜度范围，以 ROC 曲线及曲线下面积 AUC 值评价模型精度，以刀切法检验生态因子的权重。

将68个淫羊藿分布信息及54个生态因子导入 Maxent 模型中进行迭代运算，舍去贡献率为0的生态因子，重复运算直到所有的生态因子均有贡献率，之后，取总贡献率≥99.9的生态因子利用 Spearman 相关系数进行相关性分析，当2个因子的相关系数 > ±0.8 时任意舍去其中一个生态因子，最终选取满足以上条件的贡献率大、权重高的生态因子为主导生态因子。

1.4 生态因子与柔毛淫羊藿有效成分的相关性分析 基于柔毛淫羊藿的位置信息和调研搜集得到的总黄酮醇苷 ABCI 含量信息（表3），应用 R 语言（v4.2.2，http://www.r-project.org/）建立柔毛淫羊藿药材品质和生态因子之间的逐步回归模型，筛选与柔毛淫羊藿含量相关的生态因子并探究其相关性。

表 1 柔毛淫羊藿样本位置信息

编号	海拔/(m)	经度	纬度	编号	海拔/(m)	经度	纬度
1	637.00	109°19′15.30″	32°54′23.29″	35	789.00	106°28′01.05″	30°45′51.43″
2	1 310.00	105°22′3.65″	26°14′16.10″	36	772.00	106°27′42.48″	30°45′29.32″
3	727.00	118°10.355′	30°06.062′	37	1 358.00	106°16′29.96″	32°44′43.95″
4	290.00	113°08.673′	24°59.633′	38	865.00	106°18′02.03″	32°17′47.80″
5	213.00	110°58.746′	25°54.809′	39	728.19	108°43′44″	30°53′47″
6	1 236.00	109°49.864′	29°46.973′	40	708.65	108°43′47″	30°53′48″
7	93.00	115°17.998′	30°54.353′	41	1 470.27	106°11′42″	32°56′15″
8	235.00	111°33.490′	25°06.636′	42	1 416.19	105°08′59″	34°15′10″
9	385.00	109°39.804′	28°25.232′	43	506.10	103°46′32″	31°13′04″
10	247.00	111°27.117′	25°20.169′	44	1 234.20	108°26′14.01″	25°45′52.88″
11	1 087.00	109°40.544′	29°32.158′	45	1 176.00	108°15′02.88″	25°56′02.98″
12	163.00	113°26.359′	28°06.281′	46	773.70	109°18′57.00″	26°13′16.00″
13	360.00	109°27.997′	27°29.694′	47	449.00	108°57′30.00″	27°31′10.00″
14	133.00	116°19.733′	27°03.102′	48	1 362.00	113°30′55.00″	35°31′27.00″
15	322.00	113°51.118′	27°50.080′	49	959.00	108°20′08.00″	26°18′59.00″
16	101.00	115°02.012′	29°19.623′	50	500.00	109°28′87.00″	27°49′36.00″
17	138.00	117°53.333′	29°32.542′	51	580.50	108°44′32.50″	27°44′53.70″
18	260.00	118°06.618′	29°04.011′	52	1 100.00	117°11′55.56″	27°42′23.54″
19	877.00	104°20.000′	31°50.000′	53	1 329.30	107°28′45.64″	28°52′04.31″
20	710.00	106°15.967′	32°02.933′	54	771.10	106°46′05.40″	25°32′21.71″
21	770.00	103°36.759′	31°00.508′	55	684.60	108°32′25.50″	26°36′31.10″
22	680.00	104°17.499′	30°30.890′	56	880.00	107°36′24.00″	25°34′05.00″
23	590.00	107°20.167′	31°59.883′	57	1 513.00	110°35′26.90″	34°48′14.23″
24	887.00	103°02.667′	30°01.013′	58	1 230.80	106°44′52.80″	27°56′28.80″
25	1 377.00	104°20.000′	31°49.000′	59	1 300.90	106°29′44.10″	27°44′46.30″
26	670.00	106°30.000′	31°51.000′	60	1 421.00	105°27′02.40″	26°12′10.80″
27	730.00	103°34.847′	30°53.678′	61	1 382.70	106°47′37.80″	26°58′37.70″
28	1 034.00	106°17′53.86″	32°47′44.59″	62	531.00	109°11′53.00″	27°57′20.00″
29	931.00	105°35′20.72″	33°21′18.00″	63	915.60	108°51′12.70″	27°37′14.00″
30	1 206.00	104°49′33.94″	32°17′47.80″	64	943.20	107°57′48.07″	27°02′08.00″
31	1 179.00	104°49′57.78″	32°32′54.67″	65	282.00	114°12′43.00″	28°51′32.00″
32	1 341.00	104°32′22.18″	32°32′22.18″	66	1 578.00	105°56′12.60″	27°11′05.70″
33	698.00	106°27′41.68″	30°45′52.82″	67	——	104°03′49.41″	35°48′17.28″
34	619.00	106°28′38.65″	30°45′48.60″	68	843.00	108°25′39.00″	25°55′36.00″

2 结果与分析

2.1 Maxent 模型的预测精准度 Maxent 模型预测精度是以 ROC 曲线下面积的大小(即 AUC 值)作为模型预测精准度的评价指标,AUC 值的取值范围为[0,1],AUC 值越大表明模型预测精准度与可信度越高[25],一般设置 4 级评价标准:0.5 ~ 0.6 模型预测失败,0.6 ~ 0.7 较差,0.7 ~ 0.8 一般,0.8 ~ 0.9 好,0.9 ~ 1 非常好。如下图 ROC 曲线所示(插页ⅩⅩⅩⅢ图 1),柔毛淫羊藿 Maxent 模型 ROC 曲线训练数据集和测试数据集的 AUC 值为 0.978,趋近于 1,表明 Maxent 模型对柔毛淫羊藿的潜在分布区模拟效果非常好,由模型运算得出的中药柔毛淫羊藿生境适宜度具有很高的准确度和可信度。

2.2 主要生态因子的筛选 利用最大信息熵模型对 68 个采样点的生态因子属性进行运算,结果筛选出 21 个生态因子进行生态适宜度分析,结果见表 4。对柔毛淫羊藿分布贡献率排前 6 位的生态因子为:4 月降水量(44.0%),干旱指数(index_CI,CI 指数)(20.0%),年日照时长(15.4%),高程(8.5%),季度温度标准差(2.2%)和日较差/年较差(1.9%),累积贡献率达到 92.0%。置换重要性(值越大表明模型对该变量的依赖性越强)排名前 6 的生态因子为:高程(16.7%),湿润指数(index_HI,HI 指数)(14.3%),CI 指数(13.4%),1 月平均温(12.3%),冷季平均温(9.2%)和年日照时长(9.1),累积值为 75.0%。

刀切法(Jackknife)检验结果表明(插页ⅩⅩⅩⅣ图 2),仅使用单一环境因子变量时,对正规化训练增益影响最大的 6 个环境因子为:年日照时长(year_rz),CI 指数,生长季日照时长(growth_rz),4 月降水量(prec4),日较差(bio2),10 月降水(prec10)。

综合来看,CI 指数、4 月降水、年日照时长、高程、1 月平均温和 HI 指数对柔毛淫羊藿的分布有较大影响。

2.3 柔毛淫羊藿的生态适宜性分布 基于上述 MaxEnt 模型的计算结果,得到柔毛淫羊藿的生态适宜性区划分布。结果表明柔毛淫羊藿最适宜栽种在四川省中北部、贵州中北部及重庆东南部,湖南西部、甘肃南部及江西东部等地区为柔毛淫羊藿栽种的较适宜区。

2.4 生态因子对柔毛淫羊藿有效成分含量的影响 以柔毛淫羊藿药材中 4 种药效物质总和 ABCI 为因变量,模型筛选出的 6 个主导生态因子(高程、年日照时长、1 月均温、4 月降水量、干旱指数和湿润指数)为自变量,构建 ABCI 与主导生态因子

的回归模型,结果如下:ABCI = 1.187 9 − 0.000 52 × 高程 − 0.000 02 × 年日照时长 + 0.028 73 × 1 月均温 − 0.009 80 × 4 月降水量 − 0.108 70 × 干旱指数 + 0.118 30 × 湿润指数,R^2 = 0.185 3,P < 0.05。

表 2 本研究使用的生态因子

编号	缩写	含义	编号	缩写	含义
1	bio1	年均温度	28	tmean3	3 月均温
2	bio2	日较差	29	tmean4	4 月均温
3	bio3	日较差/年较差	30	tmean5	5 月均温
4	bio4	季度温度标准差	31	tmean6	6 月均温
5	bio5	最暖月最高温	32	tmean7	7 月均温
6	bio6	最冷月最低温	33	tmean8	8 月均温
7	bio7	温度年较差(bio5 − bio6)	34	tmean9	9 月均温
8	bio8	湿季平均温	35	tmean10	10 月均温
9	bio9	干季平均温	36	tmean11	11 月均温
10	bio10	暖季平均温	37	tmean12	12 月均温
11	bio11	冷季平均温	38	tmean4 ~ 10	生长季均温
12	bio12	年均降水量	39	prec1	1 月降水
13	bio13	最大月降水量	40	prec2	2 月降水
14	bio14	最小月降水量	41	prec3	3 月降水
15	bio15	季度降水变异系数	42	prec4	4 月降水
16	bio16	湿季降水量	43	prec5	5 月降水
17	bio17	干季降水量	44	prec6	6 月降水
18	bio18	暖季降水量	45	prec7	7 月降水
19	bio19	冷季降水量	46	prec8	8 月降水
20	tr_hsl	土壤含沙量	47	prec9	9 月降水
21	tr_water	土壤含水等级	48	prec10	10 月降水
22	tr_pH	土壤 pH	49	prec11	11 月降水
23	altitude	高程	50	prec12	12 月降水
24	year_rz	年日照时长	51	prec4 ~ 10	生长季降水
25	growth_rz	生长季日照时长	52	index_CI	干旱指数
26	tmean1	1 月均温	53	index_HI	湿润指数
27	tmean2	2 月均温	54	index_WI	温暖指数

表 3 柔毛淫羊藿总黄酮醇苷 ABCI 含量

编号	ABCI 含量/(%)	编号	ABCI 含量/(%)	编号	ABCI 含量/(%)
S1	3.29	S19	3.13	S37	2.38
S2	4.04	S20	3.13	S38	1.06
S3	2.01	S21	4.88	S39	2.50
S4	2.82	S22	4.25	S40	2.86
S5	3.55	S23	5.46	S41	1.81
S6	3.54	S24	2.86	S42	5.26
S7	1.86	S25	1.72	S43	2.80
S8	2.97	S26	4.18	S44	1.04
S9	2.33	S27	2.90	S45	5.06
S10	3.77	S28	5.13	S46	1.90
S11	3.93	S29	3.48	S47	1.68
S12	2.63	S30	2.65	S48	1.95
S13	3.35	S31	3.03	S49	2.25
S14	3.06	S32	2.49	S50	3.81
S15	2.65	S33	3.39	S51	2.05
S16	3.44	S34	3.68	S52	1.84
S17	2.99	S35	2.02	S53	3.83
S18	3.16	S36	2.79	—	—

表 4 MaxEnt 模型运算的生态因子贡献率

序号	生态因子	贡献率/(%)	置换重要性/(%)
1	4 月降水	44.0	0.1
2	干旱指数	20.0	13.4
3	年日照时长	15.4	9.1
4	高程	8.5	16.7
5	季度温度标准差	2.2	0.2
6	日较差/年较差	1.9	8.7
7	土壤含水等级	1.6	0.2
8	最冷月最低温	1.2	0.1
9	10 月降水	0.9	0.8
10	冷季平均温	0.8	9.2
11	生长季日照时长	0.5	0.1
12	2 月降水	0.4	3.8
13	12 月降水	0.4	0.1
14	干季降水量	0.3	0.1
15	日较差	0.3	1.7
16	1 月均温	0.2	12.3
17	9 月降水	0.2	0.8
18	生长季平均温	0.2	0.1
19	5 月降水	0.2	3.7
20	3 月降水	0.1	2.9
21	湿润指数	0.1	14.3

该回归模型总体显著性,对各回归系数进行 T 检验,常数项、高程、年日照时长、1 月最低温、4 月降水量、CI 指数与 HI 指数的系数的 P 值分别为 0.267 7、0.805 3、0.821 2、0.034 6、0.210 3、0.021 1、0.734 4,其中 1 月最低温与 CI 指数的 P 值小于 0.05,表示这两个生态因子的回归系数达到显著水平。利用逐步回归分析,构建 ABCI 与 1 月均温、CI 指数的回归模型,即:ABCI = 0.961 9 + 0.039 9 × 1 月均温 − 0.132 3 × 干旱指数,R^2 = 0.232 1,P < 0.001。

对模型进行残差分析检验,标准化残差值均匀分布于 ±2 的区域内,可知残差具有等方差性。对模型进行误差的正态性检验,由插页XXXⅣ图 3 可以看出残差值几乎都落在一条直线上,说明残差满足正态性。基于回归拟合分析,发现总黄酮醇苷 ABCI 含量与 1 月均温呈显著正相关,与 CI 指数呈显著负相关。

3 讨论

本研究选用 MaxEnt 模型对中药柔毛淫羊藿在我国的生态适宜区进行预测,由 ROC 曲线得到的 AUC 值为 0.978,证明该模型的预测结果是可靠、准确的,具有较高的可信度。

3.1 柔毛淫羊藿生境适宜性的主要生态影响因子 本研究采用 MaxEnt 模型对柔毛淫羊藿生境适宜性的主要生态影响因子分析研究表明,CI 指数、4 月降水、年日照时长、高程、1 月均温、HI 指数是影响柔毛淫羊藿生长分布的最主要生态因子。柔毛淫羊藿是典型的半阴植物,一般生长在林下、沟边灌丛等阴湿处,所以 CI 指数、HI 指数作为影响柔毛淫羊藿分布最主要生态因子与其实际生长喜湿润、怕干旱的特点相符合,且 4 月降水对柔毛淫羊藿的贡献率达 44%,因柔毛淫羊藿的采收期一般为 8 ~ 9 月,采收期前的 4 月份正是柔毛淫羊藿开始快速生长的时期,充足的降雨量有利于柔毛淫羊藿生物量的积累。柔毛淫羊藿分布对高程、1 月均温、年日照时长的要求比较高,郭兰萍团队[26]发现柔毛淫羊藿适宜在 300 ~ 1700 m、1

月均温在 3 ℃以上、年平均日照时数为 1200 ~ 1500 h 的环境下生长。一般说来,高程与气压、温度呈负相关,本文对收集到的 68 份柔毛淫羊藿点位数据整理发现柔毛淫羊藿生长的平均海拔为 814.8 m,最高不超过 1600 m,这与秦伟瀚[27]研究发现淫羊藿属植物的药效成分含量随高程从 300 m 增大到 1500 m 而呈现出急剧下降的趋势,认为高程是影响淫羊藿属药用植物品质的重要因子这一结论相一致。1 月均温的高低直接影响柔毛淫羊藿的存活率,柔毛淫羊藿不宜在极端寒冷的条件下生长,本实验结果表明柔毛淫羊藿药效成分 ABCI 含量与 1 月均温呈显著正相关,因此高程也成为影响柔毛淫羊藿生长分布的重要因子之一。传统认为柔毛淫羊藿适宜在山沟、灌丛等阴湿地带生长[28],前人研究发现柔毛淫羊藿的净光合速率较低,约 1.68 ~ 3.39 μmol CO_2 ·(m^2 · s)$^{-1}$,能利用弱光进行光合作用[16]。调查发现,我国西南部大巴山、武陵山、大娄山等柔毛淫羊藿主产区的地势起伏大,垂直分布特征明显,而柔毛淫羊藿为低矮阴生草本植物,不宜暴露于烈日照射下,所以柔毛淫羊藿对年均日照数也有一定要求。

3.2 柔毛淫羊藿的生境适宜性区划 运用 ArcGIS 软件探究柔毛淫羊藿在我国的生态适宜性区划分布,本研究结果表明柔毛淫羊藿分布最集中的区域位于四川东北部、陕甘地区南部、重庆东南部和贵州中部,该区域主要以成都平原西北部山区、秦岭、大巴山脉、巫山、云贵高原东北部的山地丘陵为主;同时在我国湖南南部、江西西部和东部也有小范围的适宜性生境,该区域的地形区主要有南岭、罗霄山和武夷山。从适宜性生境面积上看,川、渝、贵的柔毛淫羊藿资源蕴藏量较大,适宜种植区域较广,而陕、甘、湘、赣的适宜种植区域较小。本试验所得分布区与 2004 年版《中国植物志》中柔毛淫羊藿的分布区域基本一致,该结果可为当地中药种植产业结构调整及全国柔毛淫羊藿药材生产区划提供全面客观的依据。

综合整个研究,样本位置信息基本覆盖了柔毛淫羊藿的分布区,考虑了大多数柔毛淫羊藿分布的生态位,依据生态适宜性的研究结果,预测了影响生态适宜区的主要生态因子,从理论上预测了柔毛淫羊藿的生态适宜区,为充分发挥适宜地的生态条件,合理开发利用柔毛淫羊藿资源,建立柔毛淫羊藿的生态种植基地提供参考。

参考文献

[1] LI X A, KHAN I, XIA W R, et al. Icariin enhances youth - like features by attenuating the declined gut microbiota in the aged mice [J]. Pharmacol Res, 2021, 168: 105587.
[2] 马文青, 徐超群, 郭宝林, 等. 不同光强对柔毛淫羊藿生长特性和淫羊藿酮醇苷含量的影响[J]. 中国现代中药, 2023, 25(4): 847 - 853.
[3] 秦伟瀚, 刘翔, 郭延垒, 等. 不同海拔高度柔毛淫羊藿与天平山淫羊藿中主要成分含量变化研究[J]. 中药材, 2017, 40(3): 649 - 651.
[4] 郭宝林, 黄文华, 孙娥, 等. 淫羊藿药材和饮片市场调查[J]. 中国中药杂志, 2010, 35(13): 1687 - 1690.
[5] 秦振娴. 柔毛淫羊藿与心叶淫羊藿生长发育及其品质形成研究[D]. 北京: 北京协和医学院, 2020.
[6] 康传志, 周涛, 郭兰萍, 等. 全国栽培太子参生态适宜性区划分析[J]. 生态学报, 2016, 36(10): 2934 - 2944.
[7] ELITH J, PHILLIPS S J, HASTIE T, et al. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists[J]. Divers Distrib, 2011, 17(1): 43 - 57.
[8] 曹向锋, 钱国良, 胡白石, 等. 采用生态位模型预测黄顶菊在中国的潜在适生区[J]. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3063 - 3069.
[9] 杨红兵, 明孟碟, 张承程, 等. 基于生境适宜度的厚朴生长适宜性研究[J]. 南京中医药大学学报, 2015, 31(5): 457 - 460.
[10] 邵扬, 叶丹, 欧阳臻, 等. 薄荷的生境适宜性区划及品质区划研究[J]. 中国中药杂志, 2016, 41(17): 3169 - 3175.
[11] 严辉, 张小波, 朱寿东, 等. 当归药材生产区划研究[J]. 中国中药杂志, 2016, 41(17): 3139 - 3147.
[12] ZHU S D, PENG H S, GUO L P, et al. Regionalization of Chinese material medical quality based on maximum entropy model: a case study of *Atractylodes lancea*[J]. Sci Rep, 2017, 7: 42417.
[13] 蒋勇, 黄华, 李仁清, 等. 柔毛淫羊藿四川主产区种质资源的质量特征研究[J]. 江西中医药, 2021, 52(4): 63 - 68.
[14] 张悦. 基于淫羊藿苷类黄酮差异的柔毛淫羊藿种质遴选及候选基因挖掘[D]. 天津: 天津中医药大学, 2022.
[15] 李仁清. 4 种淫羊藿同质园栽培质量变化及淫羊藿多苷成分动态累积规律研究[D]. 南昌: 江西中医药大学, 2021.
[16] 刘婷. 淫羊藿属非腺毛发育及宝兴淫羊藿复合群的非腺毛特征研究[D]. 太原: 山西中医药大学, 2020.
[17] 马越. 不同产地淫羊藿药材资源品质评价[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
[18] 何理. 柔毛淫羊藿有效药用成分与土壤微生物群落研究[D]. 南充: 西华师范大学, 2019.
[19] 植汉成, 刘翔, 郭宝林, 等. 柔毛淫羊藿及其近缘种叶片非腺毛形态及其分类学意义[J]. 西北植物学报, 2018, 38(11): 2023 - 2035.
[20] 刘翔, 付长珍, 高敏, 等. 基于 ISSR 技术和非腺毛特征研究柔毛淫羊藿和近缘种遗传关系和居群遗传多样性[J]. 中国中药杂志, 2017, 42(16): 3090 - 3097.
[21] 何理, 谌利民, 黎云祥, 等. 柔毛淫羊藿的光合特性及其对环境的适应性分析[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(18): 1 - 3, 6.
[22] 钱一凡, 黎云祥, 陈兰英, 等. 施肥对巫山淫羊藿和柔毛淫羊藿产量的影响[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2014, 35(1): 57 - 62.
[23] 孔璐, 黎云祥, 权秋梅, 等. 不同群落类型柔毛淫羊藿总黄酮和淫羊藿苷含量及其与土壤因子的关系[J]. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2517 - 2522.
[24] 范雪兰,徐超群,曹阳,等. 生态因子与柔毛淫羊藿药效成分含量及花、叶性状的相关性研究[J]. 中国中药杂志,2024,49(12):3194 - 3203.
[25] 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 等. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用[J]. 生物多样性, 2007, 15(4): 365 - 372.
[26] 郭兰萍, 黄璐琦. 道地药材生产技术规范研究[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2023.
[27] 秦伟瀚, 阳勇, 刘翔, 等. 基于 UPLC - MS/MS 法研究淫羊藿属植物品种品质与生长海拔、植物类群间关系[J]. 天然产物研究与开发, 2017, 29(2): 278 - 283.
[28] PAN J Q, GUO B L. Effects of light intensity on the growth, photosynthetic characteristics, and flavonoid content of *Epimedium pseudowushanense* B. L. Guo[J]. Molecules, 2016, 21(11): 1475.

灵芝化学成分、药理作用及质量标志物预测分析

（正文见 172－182 页）

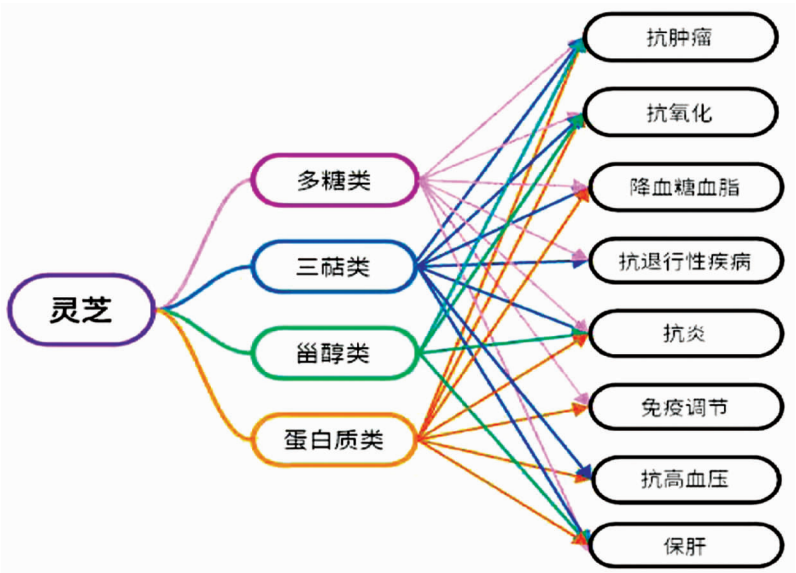


图 4　灵芝成分与药效相关性

柔毛淫羊藿生态适宜性区划研究

（正文见 191－195 页）

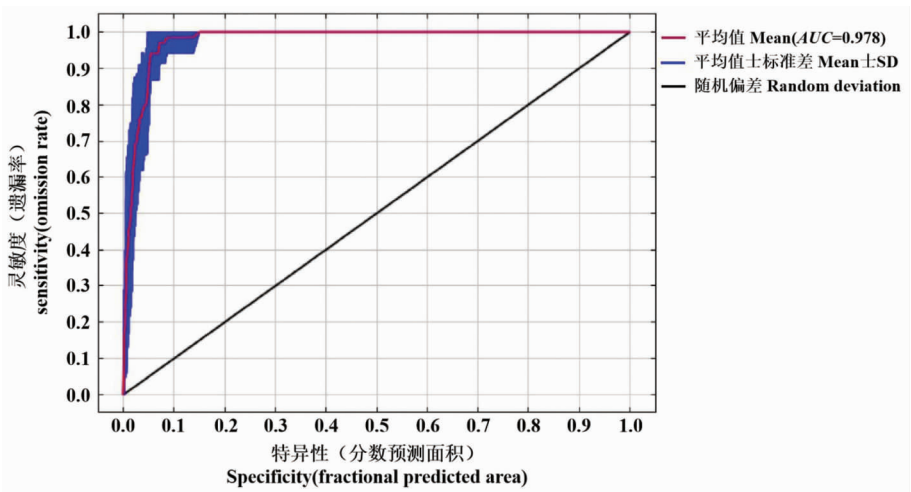


图 1　柔毛淫羊藿运行特征曲线

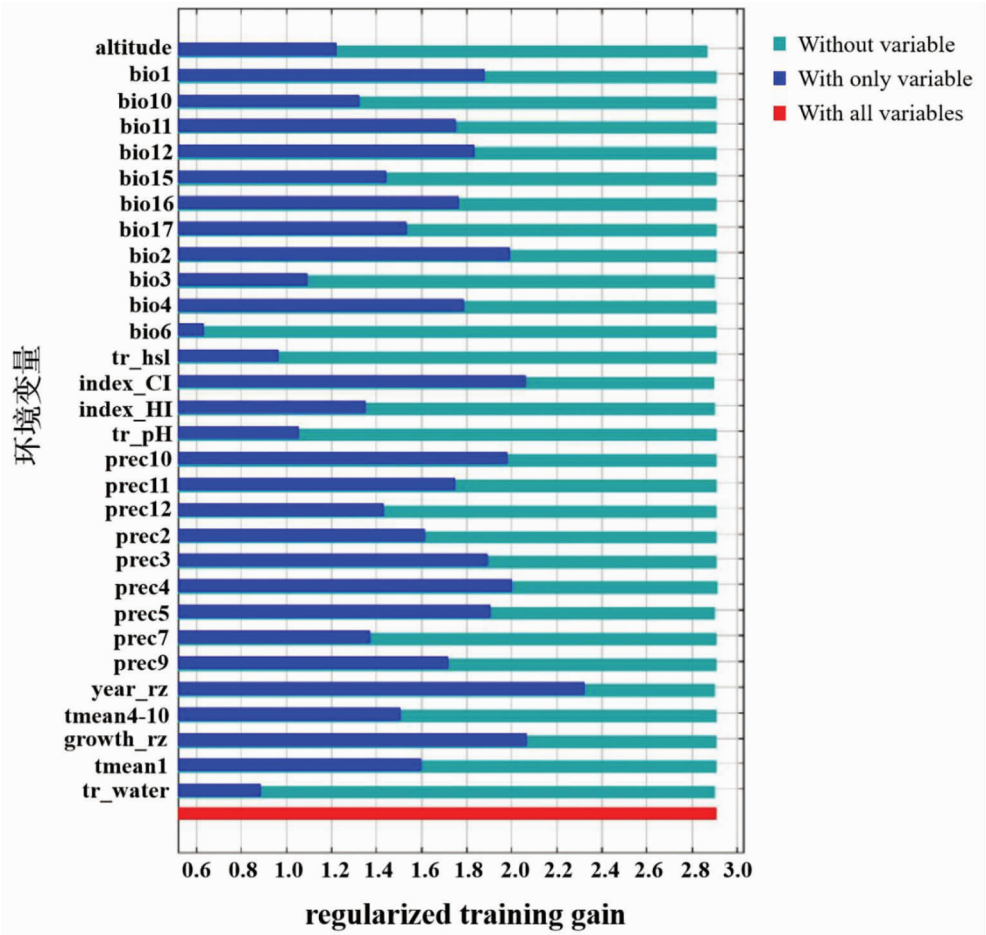


图 2 柔毛淫羊藿分布适宜度预测结果刀切图

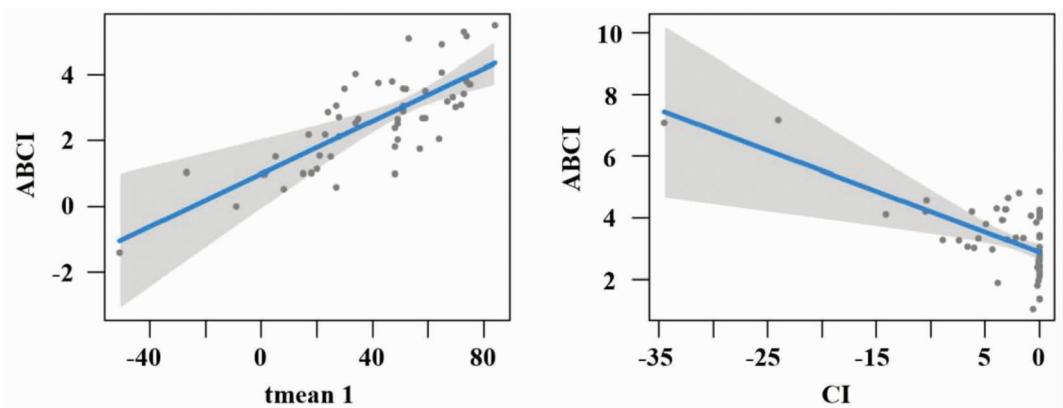


图 3 柔毛淫羊藿 ABCI 含量与 1 月均温、CI 指数相关性分析