

苗族药红禾麻生态适应性及品质区划分析

舒燕霞, 孙开芬, 徐文芬*, 陈胤睿, 孙庆文, 王波
(贵州中医药大学, 贵阳 550025)

[摘要] 目的:探索苗族药红禾麻潜在适宜分布区及其优质药材产区空间分布状况。方法:基于200个红禾麻分布位点及120个生态因子,利用最大熵模型(MaxEnt)及地理信息系统(ArcGIS)软件预测其潜在适生区。采用高效液相色谱法(HPLC)测定33批黔产红禾麻中芦丁、山柰酚-3-O-芸香糖苷、槲皮苷的含量,结合前期所测药材总多糖、总黄酮的含量数据,分析红禾麻主要药效成分与生态因子的相关性,并借助ArcGIS中协同克里金插值法进行品质区划。结果:红禾麻在我国最适分布区为云南、贵州、四川、湖南及湖北等地,其高、中适生区面积占总分布面积的59.48%。影响红禾麻生长分布的主要生态因子为10月降水量、坡度、冷季最低温、海拔、6月太阳辐射强度及4月降水量;温度、辐射强度、降水量、土壤组分及性质等对红禾麻次生代谢产物的积累影响较大。红禾麻药材品质研究结果表明,其高品质区主要包括贵州省雷山县、凯里市、清镇市、平坝县、惠水县、龙里县、开阳县及江口县等地。结论:红禾麻在国内分布区域广,但适宜分布区主要集中在西南部及华中部分地区,贵州境内红禾麻种植基地可优选黔东南及黔中地区的部分县市。该研究对红禾麻潜在适生区及其在贵州的最佳种植区进行了预测,可为红禾麻引种栽培及规模化种植选址提供科学参考。

[关键词] 最大熵模型(MaxEnt); 地理信息系统(ArcGIS); 红禾麻; 适宜性评价; 品质区划; 空间插值

[中图分类号] R284.2;R289;R22;R2-031;R33 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-9903(2023)03-0160-10

[doi] 10.13422/j.cnki.syfjx.20221617

[网络出版地址] <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3495.R.20221102.1133.005.html>

[网络出版日期] 2022-11-02 13:37:21

Ecological Suitability and Quality Regionalization Analysis of Miao Medicine *Laportea bulbifera*

SHU Yanxia, SUN Kaifen, XU Wenfen*, CHEN Yinrui, SUN Qingwen, WANG Bo
(Guizhou University of Traditional Chinese Medicine, Guiyang 550025, China)

[Abstract] **Objective:** To explore the potential suitable distribution area and spatial production area of high-quality medicinal materials of Miao medicine *Laportea bulbifera*. **Method:** Based on 200 distribution spots of *L. bulbifera* and 120 ecological factors, the maximum entropy model (MaxEnt) and ArcGIS software were applied to predict the potential suitable areas. The content of rutin, kaempferol-3-O-rutinoside, and quercitrin from 33 batches of *L. bulbifera* in Guizhou province was determined by high-performance liquid chromatography (HPLC). Combined with the previous content data of total polysaccharides and total flavonoids, the correlation between the main pharmacodynamic components of *L. bulbifera* and ecological factors was analyzed. Eventually, the quality regionalization of *L. bulbifera* was exhibited by the collocated Cokriging in ArcGIS. **Result:** The optimum distribution areas of *L. bulbifera* were Yunnan, Guizhou, Sichuan, Hunan, and Hubei provinces in China, and the high and medium suitable areas accounted for 59.48% of the total distribution areas. October precipitation, slope, min temperature of the coldest month, altitude, solar radiation intensity in June, and April

[收稿日期] 2022-08-18

[基金项目] 国家自然科学基金项目(81260687);贵州省中央引导地方科技发展资金项目(黔科中引地[2022]4016);贵州省省长基金项目(黔省专合字[2011]61号);贵州省优秀青年科技人才项目(黔科合平台人才[2019]5658)

[第一作者] 舒燕霞,在读硕士,从事中药及民族药质量控制研究工作,E-mail:shuyanxia66@163.com

[通信作者] *徐文芬,教授,硕士生导师,从事中药资源及质量控制研究及教学工作,E-mail:wenfexu@126.com

precipitation were the main ecological factors affecting the growth and distribution of *L. bulbifera*. Temperature, radiation intensity, precipitation, and soil composition and properties had great effects on the accumulation of secondary metabolites in *L. bulbifera*. The results showed that the high-quality areas of *L. bulbifera* mainly included Leishan county, Kaili city, Qingzhen city, Pingba district, Huishui county, Longli county, Kaiyang county, and Jiangkou county in Guizhou province. **Conclusion:** *L. bulbifera* is widely distributed in China, but the suitable distribution areas are mainly concentrated in southwest China and part of central China. The planting bases of *L. bulbifera* can be selected in parts of cities and counties in southeast and central Guizhou province. In this study, the potential suitable growing areas and the optimum planting areas of *L. bulbifera* in Guizhou were predicted, which could provide scientific references for the cultivation and the site selection of large-scale planting for *L. bulbifera*.

[Keywords] maximum entropy model (MaxEnt); ArcGIS; *Laportea bulbifera*; suitability evaluation; quality regionalization; spatial interpolation

红禾麻来源于荨麻科艾麻属植物珠芽艾麻的新鲜或干燥全草,具有祛风除湿、活血止痛、止痒等功效,用于治疗风湿痹痛、肢体麻木、跌扑损伤、骨折等^[1]。其原植物常生长于海拔1 000~2 400 m的山坡林下或林缘路边半阴坡湿润处,主要分布于中国西南各省,主产于云南、贵州,是贵州苗族常用药,苗语称之为“锐达棍”或“蛙斗”^[2-4]。红禾麻主要含有黄酮类、香豆素类、多糖及挥发油类等成分,具有抗类风湿性关节炎(RA)、抗炎镇痛、抗氧化等药理活性,在治疗由血虚风燥所致的皮肤瘙痒、跌打损伤引起的肢体疼痛等疗效显著^[5-9],为贵州民族药复方制剂润燥止痒胶囊、复方伤复宁膏的主要原料药。

目前红禾麻药材的供给主要依靠野外采挖,随市场需求的日益增长,其野生资源愈加匮乏,已成为该药材相关产业可持续发展的瓶颈。红禾麻种植区选择是其产业化发展关键,故本研究旨在建立红禾麻生态适宜分布模型及贵州品质区划模型,选出既有产量又能保证其药效的区域,对红禾麻野生资源保护及规范化种植具有深刻意义。

黄酮类成分是红禾麻药材主要的化学成分,具有抗炎、抗病毒、抗氧化等药理活性。红禾麻中芦丁、山柰酚-3-*O*-芸香糖苷、木犀草苷、槲皮苷、异槲皮苷可通过抑制辅助性T细胞1介导的免疫应答而改善RA,而红禾麻总黄酮、总多糖则具有一定的抗氧化作用,且表明芦丁、山柰酚-3-*O*-芸香糖苷、槲皮苷及总黄酮、总多糖含量因产地不同而异^[10-15]。故本文以黔产红禾麻中总黄酮、总多糖、芦丁、山柰酚-3-*O*-芸香糖苷、槲皮苷作为指标成分进行其品质区划研究。

最大熵模型(MaxEnt)是模拟物种适宜栖息地,

表达出一个物种分布最大概率的模型,预测精度高,在药用植物资源生态适宜性及品质区划方面应用广泛;而地理信息系统(ArcGIS)中协同克里金空间插值平台则可反映不同生态因子对药材品质的影响,两者结合即可预测出药材的最适分布区及与药材品质密切相关的优质产区^[16-21]。因此,本文运用MaxEnt模型与ArcGIS软件对红禾麻野生植物的适宜分布区进行预测,结合课题组前期研究所得的活性成分指标,利用协同克里金插值法对黔产红禾麻进行品质区划,以期为该药材的引种驯化、产址优选提供参考依据。

1 数据与材料

1.1 分布点数据 红禾麻样点数据来源于课题组野外资源调查及国家植物标本资源库信息网(<http://www.cvh.ac.cn>)、全球生物多样性信息数据库网络(GBIF, <http://www.gbif.org/>),为防止预测结果过拟合,将得到的295个无重复分布样点数据导入ArcGIS 10.4.1软件,删除国外分布点及分布位置半径<10 000 m的分布点,筛选得到200个分布点进行分析。

1.2 生态因子数据 环境数据来源于Worldclim全球气候数据库(<http://www.worldclim.org>),包括生物气候变量(bio 1-19)、每月降水量(prec 1-12)、每月平均气温(tavg 1-12)、每月最高气温(t_max 1-12)、每月最低气温(t_min 1-12)、每月辐射强度(scrad 1-12)、海拔(altitude)、坡度(slope)、坡向(aspect)及植被类型等共83个环境因子。土壤因子下载于国家青藏高原科学数据中心(<http://www.data.tpdc.ac.cn/>)。依据红禾麻野生植物的适生环境特点,选择土壤质地(t_texture)、土壤含沙量(t_sand)、土壤有机碳(t_oc)、表层土砾石含量(t

gravel)、土壤质地分类(t_usda_tex_class)、土壤的阳离子交换能力(t_cec_soil)、表层土壤硫酸盐含量(t_caso₄)及表层土壤电导率(t_ece)等37个土壤因子。

1.3 仪器和试剂 Agilent 1100型高效液相色谱仪、Agilent SB-C₁₈色谱柱(4.6 mm×150 mm, 5 μm, 美国Agilent公司); AG135型1/10万电子分析天平(瑞士Mettler-Toledo公司); KQ-500DE型数控超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司)。

对照品芦丁(中国食品药品检定研究院, 批号100080-201610)、山柰酚-3-*O*-芸香糖苷(成都埃法生物科技有限公司, 批号AF8060507)、槲皮苷(北京仪化通标科技有限公司, 批号141211), 纯度均≥98%; 乙腈、甲醇(色谱纯, 上海国药沪试公司); 磷酸(上海国药沪试公司); 乙醇、甲醇及其他试剂均为分析纯; 实验用水均为纯净水。

实验用33批红禾麻药材采收时间参照2019年版《贵州省中药材民族药材质量标准》^[1], 于夏、秋两季集中采集, 经贵州中医药大学孙庆文教授鉴定为荨麻科植物珠芽艾麻 *Laportea bulbifera* 的新鲜或干燥全草, 药材烘干后, 粉碎, 过三号筛, 备用。样品信息见表1。

2 方法

2.1 红禾麻生态适宜性

2.1.1 MaxEnt构建 利用MaxEnt软件构建红禾麻生态因子与地理分布的模型, 设置25%分布点作为测试集用于模型验证, 75%分布点作为训练集用于建模; 在界面勾选受试者工作曲线(ROC曲线)、刀切法和响应曲线, 其余参数均为默认值^[19, 22]。以ROC曲线下面积(AUC)评价模型预测结果的准确度, 刀切法检测环境变量的重要性, 响应曲线评价环境因子适度范围。

2.1.2 生态因子筛选及模型精度检验 将200个分布数据与120个生态因子导入MaxEnt软件进行运算, 剔除贡献率为0的因子后再运算, 直至生态因子贡献度不为0为止。利用ArcGIS 10.4.1软件提取各分布点生态因子数据后, 将其导入统计产品与服务解决方案(SPSS 22.0)做相关性分析, 舍去相关性系数>0.8的一对环境因子中贡献率较低者。将筛选出的生态因子作为最终变量导入MaxEnt模型, 进行10次建模。最后运用AUC值来评价模型预测结果精准性, 0.5≤AUC<0.6时, 模型预测失败; 0.6≤AUC<0.7时, 模型预测效果较差; 0.7≤AUC<0.8时, 模型预测效果一般; 0.8≤AUC<0.9时, 模型预测效果好;

0.9≤AUC<1时, 模型预测效果极好, 准确性较高, 可较为准确地反映物种潜在分布状况^[22-23]。

2.1.3 生态适宜性等级划分 将MaxEnt模型运行10次的平均值导入ArcGIS进行重分类, 得到全国红禾麻分布概率图, 利用自然间断点分级法(Jenks)将分布概率 P 分为4个分区, 即不适宜区 $P<0.10$; 低适宜区 $0.10\leq P<0.30$; 中适宜区 $0.30\leq P<0.50$; 高适宜区为 $P\geq 0.50$ 。最终得到红禾麻生态适宜性等级区划图。

2.2 红禾麻中5种化学成分的含量测定 基于课题组前期建立的红禾麻质量控制方法^[12-13], 采用比色法和HPLC法分别测定红禾麻中总黄酮、总多糖及芦丁、山柰酚-3-*O*-芸香糖苷和槲皮苷的含量。

2.2.1 色谱条件及系统适用性试验 采用Agilent SB-C₁₈色谱柱(4.6 mm×150 mm, 5 μm), 流动相为甲醇(A)-乙腈(B)-0.1%磷酸水溶液(C), 梯度洗脱(0~20 min, 12%~15%A, 13%~17%B; 20~25 min, 15%~95%A, 17%~0%B; 25~30 min, 95%A, 0%B); 流速1.0 mL·min⁻¹, 检测波长360 nm, 柱温30 °C, 进样量10 μL。在上述色谱条件下, 芦丁、山柰酚-3-*O*-芸香糖苷、槲皮苷3个色谱峰与干扰峰的分离度均≥1.5, 理论板数均不低于3 000。

2.2.2 对照品溶液的制备 分别精密称取对照品芦丁、山柰酚-3-*O*-芸香糖苷、槲皮苷适量, 置10 mL量瓶中, 加70%乙醇超声溶解并定容, 摇匀, 制成每1 mL含芦丁100.7 μg、山柰酚-3-*O*-芸香糖苷101.0 μg、槲皮苷102.2 μg的单一对照品溶液。精密移取上述单一对照品储备液适量, 置于同一量瓶中混合, 制成含芦丁、山柰酚-3-*O*-芸香糖苷、槲皮苷质量浓度分别为60.40、40.40、30.60 mg·L⁻¹的混合对照品溶液, 于4 °C冰箱中保存, 备用。

2.2.3 供试品溶液的制备 取红禾麻药材粉末约1.0 g, 精密称定, 置50 mL锥形瓶中, 精密加入75%乙醇10 mL, 称定质量, 超声处理(功率300 W, 频率40 kHz)1 h, 取出放冷至室温, 再次称定质量, 用75%乙醇补足减失质量, 摇匀, 滤过, 8 000 r·min⁻¹离心20 min(离心半径2.5 cm), 取上清液, 0.45 μm的微孔滤膜滤过, 即得供试品溶液。

2.2.4 专属性试验 分别取混合对照品溶液、供试品溶液(S19)及空白溶液各适量, 按2.2.1项下色谱条件进行测定, 记录色谱图、光谱图。结果显示, 供试品溶液中各待测成分的保留时间与混合对照品溶液中芦丁、山柰酚-3-*O*-芸香糖苷、槲皮苷的保留时间基本一致, 分离度均>1.5, 空白溶液对主峰无干

表1 33批黔产红禾麻样品采集信息

Table 1 Collection information from 33 batches of *Laportea bulbifera* in Guizhou province

批号	产地	海拔/m	纬度(N)	经度(E)
S1	贵州省赫章县罗布石林	2 546.20	26°49'19.82"	104°43'49.20"
S2	贵州省赫章县罗布石林	2 615.50	26°49'29.64"	104°44'46.60"
S3	贵州省赫章县韭菜坪	2 588.60	26°50'09.83"	104°44'46.60"
S4	贵州省赫章县韭菜坪	2 517.30	26°51'35.87"	104°41'49.28"
S5	贵州省赫章县韭菜坪	2 517.60	26°51'35.51"	104°41'49.06"
S6	贵州省赫章县大塘乡	2 095.60	27°04'27.57"	104°36'55.97"
S7	贵州省威宁县盐仓镇	2 444.20	26°56'56.07"	104°25'02.86"
S8	贵州省威宁县盐仓镇	2 363.80	26°56'38.78"	104°24'28.27"
S9	贵州省威宁县盐仓镇	2 388.40	26°56'37.38"	104°24'29.77"
S10	贵州省威宁县盐仓镇	2 388.60	26°56'38.57"	104°24'30.77"
S11	贵州省威宁县二塘镇	2 474.40	26°42'22.12"	104°37'43.22"
S12	贵州省贵阳市水田镇	1 346.00	26°26'35.42"	106°27'19.49"
S13	贵州省修文六屯	1 113.00	26°18'19.90"	107°00'54.78"
S14	贵州省威宁县黑石头镇	1 811.80	26°45'47.65"	104°08'12.72"
S15	贵州省梵净山零步	1 700.20	27°53'46.65"	108°43'20.24"
S16	贵州省梵净山蘑菇石	2 285.30	27°54'45.84"	108°41'36.11"
S17	贵州省梵净山拜佛台	2 283.50	27°54'52.89"	108°05'31.78"
S18	贵州省梵净山拜佛台	2 289.30	27°54'55.56"	108°41'31.90"
S19	贵州省梵净山新金顶	2 243.10	27°54'36.90"	108°41'31.78"
S20	贵州省梵净山回香坪	1 791.10	27°54'05.73"	108°42'14.06"
S21	贵州省松桃县乌罗镇	819.80	27°58'15.40"	108°46'33.73"
S22	贵州省松桃县乌罗镇	816.20	27°58'16.09"	108°46'41.76"
S23	贵州省台江县金红阳	908.00	26°35'36.49"	108°18'44.92"
S24	贵州省台江县金红阳	948.00	26°35'03.80"	108°19'15.11"
S25	贵州省台江县金红阳	1 149.00	26°34'40.60"	108°19'51.49"
S26	贵州省台江县展新村	1 650.40	26°34'36.51"	108°20'43.66"
S27	贵州省剑河县白道村	639.90	26°23'19.72"	108°24'52.54"
S28	贵州省开阳县紫江地缝	1 015.80	26°54'59.48"	107°02'01.02"
S29	贵州省开阳县紫江地缝	1 024.40	26°55'22.82"	107°02'19.47"
S30	贵州省贵阳市水田镇上水村	1 320.50	26°45'07.78"	106°49'38.69"
S31	贵州省雷山县雷公山	1 258.30	26°55'54.52"	106°35'26.01"
S32	贵州修文县六屯	1 245.50	26°58'17.12"	106°50'35.35"
S33	贵州都匀市斗篷山	1 945.20	26°03'11.57"	107°41'46.47"

扰;且供试品溶液中待测成分的紫外(UV)光谱图分别与混合对照品溶液中芦丁、山柰酚-3-O-芸香糖苷、槲皮苷 UV 光谱图一致,表明该方法专属性良好。

2.2.5 线性关系考察 取 2.2.2 项下单一对照品储备液,用 70%乙醇倍半稀释成不同浓度的单一对照品溶液,芦丁(100.7、50.34、25.17、5.040、2.520、1.260、0.630 0 mg·L⁻¹)、山柰酚-3-O-芸香糖苷

(101.0、50.50、25.25、5.050、2.530、1.260、0.630 0 mg·L⁻¹)、槲皮苷(102.2、51.08、25.54、5.100、2.550、1.280、0.640 0 mg·L⁻¹)。将上述单一对照品分别按 2.2.1 项下色谱条件进行测定,记录色谱峰面积,以对照品的进样量(X)为横坐标,对应的峰面积值(Y)为纵坐标,进行线性回归,见表 2。

2.2.6 精密度试验 取 2.2.2 项下混合对照品溶液,按 2.2.1 项下色谱条件连续进样 6 次,测定各峰面

表2 3种待测成分的回归方程、相关系数和线性范围

Table 2 Regression equations, correlation coefficients and linear ranges of three components to be tested

名称	回归方程	相关系数/r	线性范围/mg·L ⁻¹
芦丁	$Y=2\ 915.2 X+1.140\ 4$	0.999 9	0.630 0~100.7
山柰酚-3-O-芸香糖苷	$Y=1\ 689.0 X+1.966\ 9$	0.999 9	0.630 0~101.0
槲皮苷	$Y=1\ 986.7 X-5.839\ 1$	0.999 9	0.640 0~102.2

积,测得芦丁、山柰酚-3-O-芸香糖苷、槲皮苷峰面积的RSD分别为1.8%、1.9%和1.6%,表明仪器精密度良好。

2.2.7 重复性试验 取同一批(S19)红禾麻样品约1.0 g,精密称定,按2.2.3项下方法平行制备6份供试品溶液,按2.2.1项下色谱条件进样测定,结果芦丁、山柰酚-3-O-芸香糖苷、槲皮苷的平均含量分别为0.130、0.071、0.133 mg·g⁻¹,RSD分别为1.1%、1.9%和1.0%,表明该方法测定的重复性良好。

2.2.8 稳定性试验 取S19号红禾麻药材粉末约1.0 g,精密称定,按2.2.3项下方法制备成供试品溶液,按2.2.1项下色谱条件分别于0、2、4、8、12、24 h进样测定,分别记录供试品溶液色谱图中芦丁、山柰酚-3-O-芸香糖苷、槲皮苷的峰面积值,结果芦丁、山柰酚-3-O-芸香糖苷、槲皮苷含量的RSD分别为0.9%、1.1%和0.8%,表明供试品溶液在24 h内稳定性良好。

2.2.9 加样回收率试验 分别取S19号红禾麻药材粉末9份,每份约0.5 g,精密称定,以药材中待测成分含量按照1:0.5、1:1和1:1.5的比例,分别精密加入各对照品,按照2.2.3项下方法制备供试品溶液,按2.2.1项下色谱条件进样测定,记录芦丁、山柰酚-3-O-芸香糖苷、槲皮苷的峰面积值,计算其平均回收率及RSD,结果芦丁、山柰酚-3-O-芸香糖苷、槲皮苷的加样回收率分别为97.31%、97.56%和97.65%,RSD均<3.0%,表明该方法测定结果的准确度良好。

2.3 红禾麻品质区划研究 采用Spearman相关性系数法对33批红禾麻样品中5种成分的含量值与120个生态因子进行相关性分析,筛选出能显著影响各成分含量积累的生态因子为其解释变量,利用ArcGIS 10.4.1软件中的协同克里金空间插值进行分析;若与生态因子无显著相关性的成分,则不加入解释变量。预测并绘制红禾麻中各成分含量空间模式分布图。最后,通过栅格计算器与模糊叠加功能,将红禾麻生态适宜性区划图与各成分含量空间模式分布图进行叠加,得到综合品质区划图。

3 结果

3.1 红禾麻生态适宜性研究

3.1.1 MaxEnt模型预测分析 对生态因子及分布数据进行MaxEnt模型10次运算后,得到AUC平均值为0.903,AUC>0.9,表明该模型预测结果可靠,建立的MaxEnt模型能够准确模拟红禾麻药用植物的潜在地理分布。见图1。

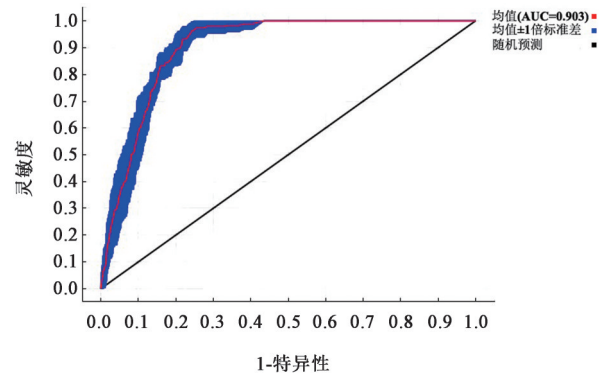


图1 MaxEnt模型预测的ROC曲线

Fig. 1 ROC curve of MaxEnt model prediction

3.1.2 主要生态因子分析 通过预测结果贡献率可以看出,10月降水量(54.8%)对红禾麻药材分布的贡献率最大,坡度(7.0%)、冷季最低温(5.8%)、海拔(3.4%)次之,见表3。根据刀切法得到各生态因子的权重,结果表明,10月降水量权重最大,6月太阳辐射强度次之,见图2。综合分析,最终选择10月降水量、坡度、冷季最低温、海拔、6月太阳辐射强度、4月降雨量进行响应曲线分析,其最适红禾麻分布值为10月降水量(68.51~190.37 mm)、坡度(12.37°~67.90°)、冷季最低温(-6.91~4.35 °C)、海拔(866.17~3 451.84 m)、6月太阳辐射强度(13 809.50~16 846.118 kJ·m⁻²·d⁻¹)、4月降水量(44.63~172.66 mm),见图3。

3.1.3 红禾麻生态适宜性分区 利用ArcGIS软件中“重分类”将预测结果划分为不适生、低适生、中适生、高适生4个等级,见图4。红禾麻分布高适生区面积为570 690.31 km²,占全国分布面积的23.64%,主要分布在贵州西南部和东南部、云南西北部、四川南部和中部、湖北西部及湖南西北部,西藏东南部林芝地区、广西北部桂林地区及辽宁东南部有少量分布;中适生区围绕高适生区分布,其面积为865 302.35 km²,占总分布面积的35.84%,主要集中在云南、贵州两省,湖南省、湖北省、四川省、重庆市等有部分分布;低适生区面积为978 207.80 km²,占总分布面积的40.52%,广西北

表3 生态因子贡献率

Table 3 Contribution rate of ecological factors

生态因子缩写	生态因子	贡献率/%
prec_10	10月降雨量/mm	54.8
slope	坡度/°	7.0
bio_6	冷季最低温	5.8
alt	海拔/m	3.4
srad_06	6月太阳辐射强度/kJ·m ⁻² ·d ⁻¹	3.2
srad_07	7月太阳辐射强度/kJ·m ⁻² ·d ⁻¹	2.9
t_bs	表层(0~30 cm)土壤基本饱和度	2.8
bio_2	昼夜温差月均值/°C	2.3
bio_4	温度季节性变化标准差	1.8
	植被类型	1.5
srad_10	10月太阳辐射强度/kJ·m ⁻² ·d ⁻¹	1.4
share	Share in soil mapping unit	1.3
srad_09	9月太阳辐射强度/kJ·m ⁻² ·d ⁻¹	1.3
aspect	坡向/°	1.2
t_silt	表层(0~30 cm)淤泥含量	1.0
t_sand	表层(0~30 cm)沙含量	1.0
t_oc	表层(0~30 cm)土壤有机碳含量	0.7
prec_04	4月降雨量/mm	0.7
awc_class	土壤有效水含量	0.6
t_ccc_clay	黏性层土壤的阳离子交换能力	0.6
su_sym90	FAO90土壤分类系统中土壤名称	0.6
mu_source1	土壤来源数据库1	0.6
bio_16	最湿季度降水量/mm	0.5
srad_04	4月太阳辐射强度/kJ·m ⁻² ·d ⁻¹	0.5
prec_09	9月降雨量/mm	0.4
t_caso ₄	表层(0~30 cm)土壤硫酸盐含量	0.3
t_clay	表层(0~30 cm)黏土含量	0.3
t_caco ₃	表层(0~30 cm)土壤碳酸盐或石灰含量	0.3
ref_depth	土壤参考深度	0.3
su_code90	FAO90土壤分类系统中土壤编码	0.3
t_teb	表层(0~30 cm)土壤交换性盐基	0.2
drainage	排水	0.2
t_gravel	表层(0~30 cm)土砾石含量	0.2

部、江西省、福建省及浙江省为主要分布区,广东、安徽、吉林等省有零星分布;各省级行政区划内4个适宜区的面积,见表4。

3.2 红禾麻的品质适宜性研究

3.2.1 红禾麻中5种成分含量测定结果 33批红禾麻药材中总黄酮、总多糖及芦丁、山柰酚-3-O-芸香糖苷、槲皮苷的含量测定,见表5。

3.2.2 红禾麻化学成分与生态因子相关性 通过

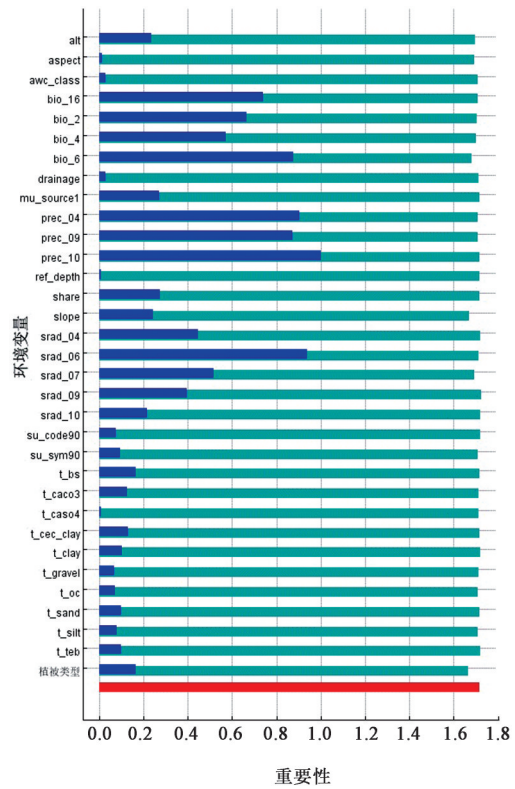


图2 生态因子对红禾麻分布的重要性

Fig. 2 Importance of ecological factors on distribution of *Laportea bulbifera*

Spearman相关性系数法将黔产红禾麻中总多糖、总黄酮、芦丁、山柰酚-3-O-芸香糖苷、槲皮苷的含量与120个生态因子进行相关性分析,确定与该成分相关性最高的3个环境因子进行协同克里金插值法建模,见表6。协同克里金插值法结果显示,总多糖含量在贵州省铜仁市、松桃苗族自治县、黔东南苗族侗族自治州东南地区及威宁彝族回族苗族自治县较高;总黄酮含量在贵州省六盘水市、安顺市、黔西南布依族苗族自治州及遵义市相对较高;芦丁含量较高的地区主要在贵州省贵阳市、安顺市与黔南布依族苗族自治州两市一州交汇处;山柰酚-3-O-芸香糖苷含量在空间分布上由贵州省北部至南部递增;槲皮苷含量在贵州省威宁彝族回族苗族自治县和赫章县较高。

3.2.3 红禾麻药材品质综合评价结果 基于生态适宜性区划与各成分含量空间分布结果,由红禾麻综合品质区划结果可知,红禾麻药材的综合高品质区主要在贵州省中部及中部偏东南地区,主要为苗岭和武夷山两个山脉,包括安顺东北部、贵阳地区、黔南苗族布依族自治州北部、黔东南苗族侗族自治州西部地区、盘州市及铜仁梵净山一带。

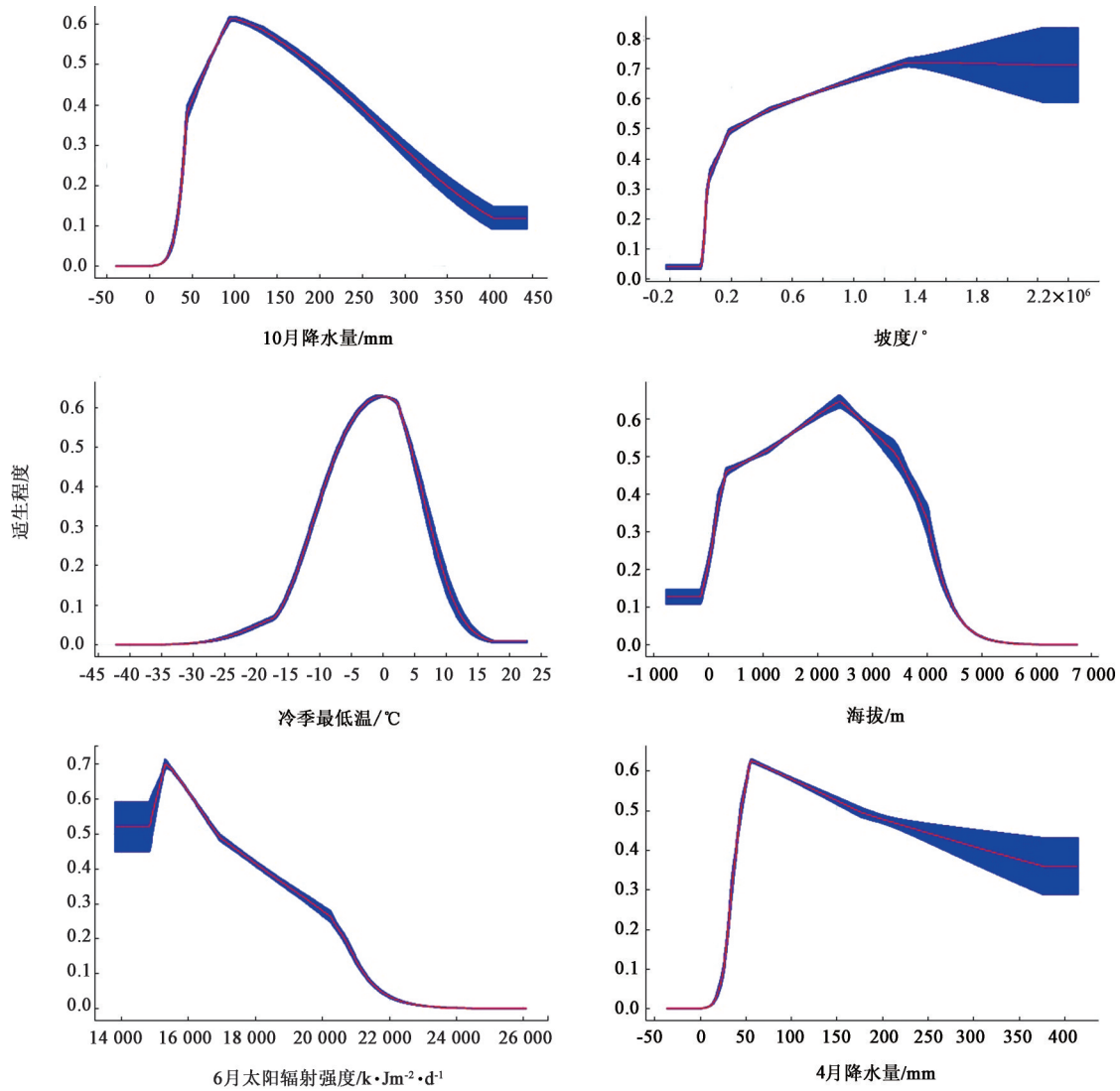


图3 主要生态因子响应曲线

Fig. 3 Response curves of main ecological factors

4 讨论与总结

4.1 红禾麻的生态适宜性分析 通过对红禾麻潜在分布区进行预测,结果显示红禾麻最适分布区主要在贵州西南部和东南部、云南西北部、四川南部和中部、湖北西部及湖南西北部,西藏东南部林芝地区、广西北部桂林地区及辽宁东南部有少量分布;通过对文献资料查阅和野外实地考察发现,本次预测结果与文献记录和实地考察结果基本一致^[3,9],说明本次预测结果可信度较高。

在红禾麻生态适宜区划预测中可知,10月降水量、坡度、冷季最低温、海拔、6月太阳辐射强度及4月降水量对其分布影响较大。通过对红禾麻生长特性及分布特点分析发现,10月正是红禾麻种子成熟关键期,而此时北半球多数地区已进入枯水期,适宜的降水量是保证红禾麻种子发育的关键,是其

再生繁殖的前提,故10月降水量对红禾麻分布尤为重要。在实地考察中发现,红禾麻喜欢生长于落差较大的山林中,例如梵净山、雷公山等,高落差的斜坡环境为其提供的许多阴湿沟谷,是红禾麻最喜欢分布的环境。另外,红禾麻受海拔影响也较为明显,调查发现其在海拔低于1 000 m的环境鲜有分布,该结果与文献记录相吻合^[3]。

4.2 红禾麻的品质适宜性分析 植物次生代谢产物是评价中药品质优劣的重要指标,是植物基因受外界环境刺激后的特异性表达,其合成积累与气候、土壤及生物因素息息相关^[24]。由于地域环境的差异,野生药材品质在自然界中呈现一定的分布模式,按该模式结合影响药材品质形成的主要环境因子进行空间插值处理,即可实现药材品质的空间量化^[25]。本研究参与评价的5种有效成分为多糖类或

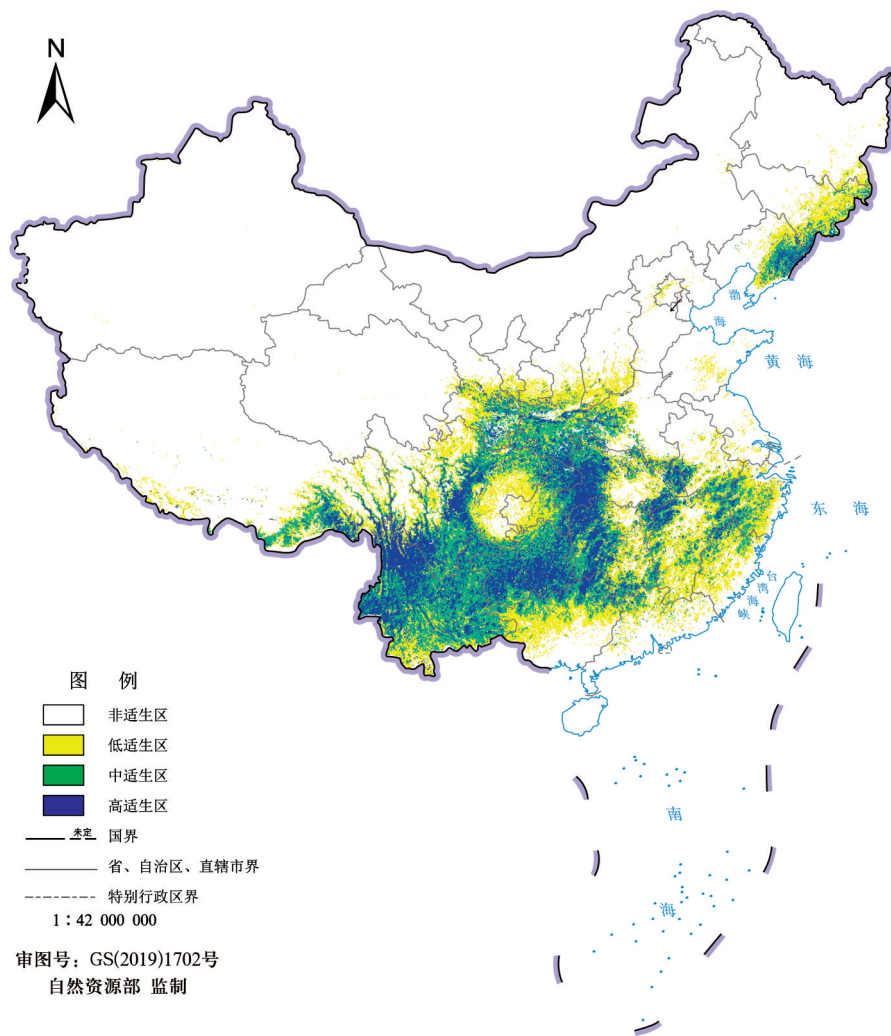


图4 红禾麻适宜性等级区划

Fig. 4 Zoning diagram of suitability grade of *Laportea bulbifera*

表4 4个适生区在各行政区分布面积

Table 4 Distribution area of four suitable areas in each administrative region

行政区划	非适生区		低适生区		中适生区		高适生区	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
云南省	7 327.68	0.10	63 552.03	6.50	174 772.95	20.20	137 647.34	24.12
贵州省	1 625.03	0.02	16 823.81	1.72	73 470.35	8.49	84 080.82	14.73
四川省	162 570.36	2.24	126 998.84	12.98	120 817.32	13.96	71 013.49	12.44
湖北省	32 747.24	0.45	40 167.13	4.11	50 539.65	5.84	62 445.99	10.94
湖南省	26 190.73	0.36	57 574.12	5.89	66 973.98	7.74	61 061.17	10.70
陕西省	83 294.36	1.15	39 665.71	4.05	57 080.81	6.60	25 559.12	4.48
西藏自治区	1 089 358.18	15.02	71 428.39	7.30	47 361.76	5.47	19 851.67	3.48
重庆市	15 794.76	0.22	25 717.59	2.63	21 833.94	2.52	18 953.71	3.32
广西壮族自治区	92 894.24	1.28	77 326.91	7.90	47 643.10	5.51	18 135.75	3.18
其他	5 739 598.03	79.13	458 953.27	46.89	204 808.49	23.68	71 941.25	12.61

注：“其他”包括江西省、甘肃省、辽宁省、河南省、安徽省、浙江省、吉林省、福建省、广东省、山西省、宁夏回族自治区、河北省、江苏省、黑龙江省、青海省、山东省、北京市、新疆维吾尔自治区、内蒙古自治区、台湾省、天津市、海南省、上海市及香港特别行政区

表5 红禾麻中5种成分含量测定 (n=3)

批号	总多糖	总黄酮	芦丁	山柰酚-3-O-芸香糖苷	槲皮苷	批号	总多糖	总黄酮	芦丁	山柰酚-3-O-芸香糖苷	槲皮苷
S1	64.725	17.543	0.273	0.059	0.000	S18	90.716	4.150	0.000	0.000	0.064
S2	44.697	14.891	0.073	0.000	0.079	S19	22.145	11.235	0.130	0.071	0.133
S3	46.642	14.274	0.145	0.077	0.175	S20	75.181	10.613	0.178	0.000	0.000
S4	88.781	7.727	0.025	0.009	0.038	S21	88.430	11.020	0.075	0.011	0.079
S5	88.320	8.719	0.150	0.050	0.036	S22	41.925	12.362	0.028	0.008	0.029
S6	72.203	10.671	0.370	0.250	0.515	S23	73.663	5.547	0.138	0.057	0.051
S7	73.876	12.334	0.197	0.017	0.233	S24	66.746	7.074	0.070	0.033	0.057
S8	91.729	9.033	0.109	0.036	0.155	S25	63.492	6.176	0.007	0.010	0.035
S9	54.330	7.123	0.000	0.000	0.259	S26	100.626	8.568	0.042	0.024	0.089
S10	72.013	8.192	0.266	0.113	0.280	S27	100.811	5.130	0.008	0.008	0.009
S11	50.924	11.241	0.125	0.000	0.134	S28	50.730	7.002	0.019	0.031	0.031
S12	16.840	15.084	1.099	0.312	0.156	S29	86.683	12.705	0.007	0.000	0.131
S13	52.134	11.820	0.032	0.000	0.000	S30	67.518	6.244	0.000	0.000	0.351
S14	36.477	8.114	0.000	0.005	0.025	S31	6.339	12.172	0.011	0.009	0.008
S15	70.218	6.651	0.000	0.008	0.011	S32	4.197	9.204	0.000	0.000	0.122
S16	17.343	13.933	0.241	0.059	0.179	S33	16.025	13.033	0.007	0.550	0.007
S17	24.772	21.565	0.000	0.000	0.194						

表6 生态因子与有效成分相关分析

Table 6 Correlation analysis results between ecological factors and active ingredients

生态因子	总多糖	总黄酮	芦丁	山柰酚-3-O-芸香糖苷	槲皮苷
t_bs		-0.416 ¹⁾			
t_caco ₃	0.478 ²⁾				
t_caso ₄				-0.327 ¹⁾	
t_clay		0.437 ¹⁾			
t_silt					0.356 ¹⁾
t_teb	0.411 ¹⁾				
t_ph	0.433 ¹⁾	-0.419 ¹⁾			
bio_16					-0.363 ¹⁾
prec_07			0.423 ²⁾		
prec_08				0.346 ¹⁾	
srad_10				0.328 ¹⁾	-0.459 ²⁾
tavg_08			-0.425 ²⁾		
tmax_07			-0.430 ²⁾		

注:相关性¹⁾P<0.05,²⁾P<0.01

黄酮类成分,结果表明,红禾麻中多糖类、黄酮类成分的产生和动态积累与太阳辐射、温度、水分、土壤有机质及土壤盐分密切相关,与文献报道结果基本一致^[12-13,26-27]。就单一成分而言,红禾麻中芦丁、山

柰酚-3-O-芸香糖苷的累积均与降水量、太阳辐射呈显著正相关,而同为黄酮类成分的槲皮苷则为负相关性。另表明,芦丁含量受温度影响显著,而另两种黄酮类成分的积累则与温度无相关性。以总成分论,红禾麻中总多糖、总黄酮含量分别与土壤pH呈现正相关和负相关,说明弱碱性土壤有利于总多糖含量的积累,总黄酮则反之。简言之,红禾麻药材品质的优劣与各环境变量之间无明显规律,而是复杂的量化关系,各类成分受生态因子的影响是否存在显著偏性,其合成与积累又是如何受到调控的,尚需进一步研究。

4.3 小结 综上所述可知,红禾麻的分布区域较广,主要沿四川盆地周围的山脉和高原(云贵高原、巫山、秦岭及横断山脉)分布,即中国西南部及华中部分地区。因红禾麻药材本身繁殖率低,加上人为因素的过渡干预,野生资源愈加匮乏,其实际分布范围可能远小于预测范围。贵州境内红禾麻最佳品质区主要包括雷山县、凯里市、清镇市、平坝县、惠水县、龙里县、开阳县及江口县等地,是其人工种植的理想区域,可通过平衡红禾麻生长适宜性分布,选择高品质区建立红禾麻药材的种植基地,在保证药材品质的同时提升药材经济产量,以保护红禾麻野生资源和促进相关产业的可持续发展。

[利益冲突] 本文不存在任何利益冲突。

[参考文献]

- [1] 贵州省药品监督管理局. 贵州省中药材民族药材质量标准(第二册)[M]. 北京:中国医药科技出版社, 2019:84-85.
- [2] CHEN J R, LIN Q, IB F, et al. Flora of China. Vol. 5 [M]. Beijing: Science Publishing House Missouri Botanical Garden Publishing House, 2003.
- [3] 中国科学院《中国植物志》编辑委员会. 中国植物志 [M]. 北京:科学出版社, 1995:32.
- [4] 刘栋梁,林开冲. 苗族与布依族的骨伤民间疗法[J]. 中国民族医药杂志, 1998, 4(4):32.
- [5] WANG J, LU J, LAN Y, et al. Total coumarins from *Urtica dentata* Hand prevent murine autoimmune diabetes via suppression of the TLR4-signaling pathways [J]. J Ethnopharmacol, 2013, 146 (1) : 379-392.
- [6] HOU W R, SU Z Q, PI H F, et al. Immunosuppressive constituents from *Urtica dentata* Hand [J]. J Asian Nat Prod Res, 2010, 12(8):707-713.
- [7] XIANG M, HOU W R, XIE S N, et al. Immunosuppressive effects of an ethyl acetate extract from *Urtica dentata* Hand on skin allograft rejection [J]. J Ethnopharmacol, 2009, 126(1):57-63.
- [8] LUO X, LI L L, ZHANG S S, et al. Therapeutic effects of total coumarins from *Urtica dentata* Hand on collagen-induced arthritis in Balb/c mice [J]. J Ethnopharmacol, 2011, 138(2):523-529.
- [9] 国家中医药管理局,《中华本草》编委会. 中华本草:苗族药卷[M]. 贵阳:贵州科技出版社, 2005:283-284.
- [10] 李莹,陈思颖,巩仔鹏,等. 离体外翻肠囊法研究红禾麻提取物在正常与类风湿性关节炎模型大鼠中的肠吸收特性差异[J]. 中国中药杂志, 2020, 45(2):405-411.
- [11] 胡贺佳,唐娟,陈思颖,等. 基于指纹图谱和多指标定量测定的苗族药红禾麻质量控制研究[J]. 中草药, 2020, 51(16):4325-4330.
- [12] 邹淑涵,陈胤睿,徐文芬,等. 基于灰色关联的苗族药红禾麻总黄酮含量影响因子分析[J]. 广西植物, 2017, 37(4):461-469, 452.
- [13] 邹淑涵,杨勇,温迪,等. 苗族药红禾麻种质资源药材中多糖含量及与环境因子的相关性分析[J]. 种子, 2016, 35(8):60-64.
- [14] 邹淑涵. 苗族药红禾麻质量控制及抗氧化、抗炎活性谱效关系初步研究[D]. 贵阳:贵阳中医学院, 2017.
- [15] 郭文凯,徐文芬,员湮,等. 苗族药红禾麻野生与引种药材 UPLC 指纹图谱研究[J]. 种子, 2019, 38(8):10-15.
- [16] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, DUDIK M, et al. Opening the black box: An open-source release of Maxent[J]. Ecography, 2017, 40(7):887-893.
- [17] WARREN D L, SEIFERT S N. Ecological niche modeling in Maxent: The importance of model complexity and the performance of model selection criteria[J]. Ecol Appl, 2011, 21(2):335-342.
- [18] PHILLIPS S J, DUDIK M. Modeling of species distributions with Maxent: New extensions and a comprehensive evaluation [J]. Ecography, 2008, 31(2):161-175.
- [19] 陈麒羽,徐文芬,张永萍,等. 小花清风藤生态及品质适宜性区划[J]. 中国实验方剂学杂志, 2021, 27(23):172-180.
- [20] 陈博,王莉,韦翡翠,等. 定西市党参生态适宜性区划研究[J]. 中国现代中药, 2020, 22(6):845-848.
- [21] 陈敬忠,刘济明,王灯,等. 基于AcrGIS中协同克里金插值的米槁品质适宜性分析及评价[J]. 四川大学学报:自然科学版, 2020, 57(3):583-590.
- [22] 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.
- [23] 张颖,李君,林蔚,等. 基于最大熵生态位元模型的入侵杂草春飞蓬在中国潜在分布区的预测[J]. 应用生态学报, 2011, 22(11):2970-2976.
- [24] VERMA N, SHUKLA S. Impact of various factors responsible for fluctuation in plant secondary metabolites [J]. J Appl Res Med Aroma, 2015, 2(4):105-113.
- [25] 孙洪兵,蒋舜媛,孙辉,等. 基于3S技术的羌活区划研究 II. 基于协同克里金插值的羌活品质适宜性分析及评价[J]. 中国中药杂志, 2017, 42(14):2633-2638.
- [26] 贾立平. 太阳辐射与植物生长发育的关系[J]. 新农业, 2021(19):36.
- [27] 韦伟旻. 盐胁迫对几种药用植物生长发育和生理生化特性的影响[D]. 南京:南京农业大学, 2015.

[责任编辑 顾雪竹]