

基于 MaxEnt 模型的甘肃省南部洮河流域淫羊藿品质变化分析

李云峰^{1, 2, 3}, 何平^{2, 3}, 孟繁蕴^{2, 3}

- (1. 承德医学院河北省中药研究与开发重点实验室, 承德 067000;
2. 北京师范大学地理科学学部中药资源保护与利用北京市重点实验室, 北京 100875;
3. 北京师范大学地理科学学部天然药物教育部工程研究中心, 北京 100875)

摘要: 淫羊藿(*Epimedium brevicornu* Maxim.) 作为野生药材, 品质受到自然环境的影响。为研究淫羊藿品质变化趋势, 本研究选取甘肃省南部洮河流域内淫羊藿为研究对象, 以淫羊藿苷含量为淫羊藿品质标准, 运用 MaxEnt 模型和地理信息技术, 对影响淫羊藿品质的环境因子进行筛选分析。结果显示, 淫羊藿苷含量与 7 月份水蒸气压呈线性回归关系 ($F=26.331$, $P=0.000$, $r=0.703$, $R^2=0.494$), 淫羊藿苷含量随着 7 月份水蒸气数值增加逐渐降低, 在适宜淫羊藿生长的河道两边, 距离河流越远淫羊藿苷含量越高, 药材品质越好。本研究表明, MaxEnt 模型和地理信息技术可作为研究影响野生淫羊藿品质变化的一种有效方法, 指导淫羊藿药材资源的保护与开发。

关键词: 淫羊藿; 淫羊藿苷; 品质; 物种分布模型; MaxEnt

中图分类号: Q948 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2023.026002

Quality change analysis of *Epimedium brevicornu* Maxim. in Taohe River basin in southern Gansu Province based on the MaxEnt model

LI Yun-Feng^{1, 2, 3}, HE Ping^{2, 3}, MENG Fan-Yun^{2, 3}

- (1. Key Laboratory of Research and Development of Traditional Chinese Medicine in Hebei Province, Chengde Medical University, Chengde 067000, China;
2. Beijing Key Lab of Traditional Chinese Medicine Protection and Utilization, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
3. Engineering Research Center of Natural Medicine, Ministry of Education, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: As a wild medicinal herb, the quality of *Epimedium brevicornu* Maxim. is affected by the natural environment. In order to study the quality change trend of *E. brevicornu* Maxim., this study selected *E. brevicornu* Maxim. in the Taohe River basin in southern Gansu province as the research object, the content of icariin was taken as the quality standard, MaxEnt model and geographic information technology were used to analyze the correlation between icariin content and the environmental factors. The results showed that there was a linear regression relationship between the content of icariin and water vapor pressure in July ($F=26.331$, $P=0.000$, $r=0.703$, $R^2=0.494$), and the content of icariin

收稿日期: 2022-05-03

基金项目: 国家自然科学基金(81072999); 河北省中医药管理局科研计划(2017079)

作者简介: 李云峰(1983—), 男, 山东滨州人, 博士研究生, 主要从事中药资源方面研究。E-mail: 13503347721@163.com

通讯作者: 孟繁蕴, E-mail: mfy@bnu.edu.cn

gradually decreased with the increase of water vapor pressure in July. On both sides of the river that is suitable for the growth of *E. brevicornu* Maxim., the further the distance from the river, the higher the content of icariin, and the better the quality of the medicinal material. In this study, the MaxEnt model and geographic information technology could be used as an effective method to study the quality changes of wild *E. brevicornu* Maxim., and guide the protection and development of its medicinal resources of it.

Keywords: *Epimedium brevicornu* Maxim.; Icariin; Quality; Species distribution model; MaxEnt

1 引言

淫羊藿(*Epimedium brevicornu* Maxim.)为多年生草本植物,属于小檗科淫羊藿属,适宜生长在山坡林下阴湿处,俗名为“仙灵脾”,又因其二回三出复叶结构,得名“三枝九叶草”。淫羊藿始载于东汉时期的《神农本草经》,列为中品,书中记载“主阴痿绝伤,茎中痛,利小便,益气力,强志。一名刚前。生山谷”。陶弘景在《本草经集注》中记录“四川北部有淫羊,一日百合,盖食藿所致,故名淫羊藿”,是最早关于“淫羊藿”名称由来的描述。自古以来,淫羊藿作为药用植物被用于中医临床治疗^[1,2],具有补肾阳、强筋骨等功效。

淫羊藿植物含有 260 多种次生代谢化合物,包括黄酮类、木质素、挥发油等^[1,3],具有广阔的应用前景。其中,黄酮类化合物淫羊藿苷作为淫羊藿主要药效物质,其生理活性作用被广大学者所研究,药理学研究和临床实践证明淫羊藿苷对肝癌、骨质疏松、心血管疾病和阿尔茨海默病具有预防和治疗作用^[4-7],因此,其含量高低常作为衡量淫羊藿品质优劣的主要标准^[3,8]。

中医药学者在长期的医药实践中发现自然环境变化会引起药材品质的改变,本草中记载“土地所出,真伪新陈,并各有法”。现代研究证实,环境湿度对植物生长与次生代谢产物积累起到至关重要的作用^[9-11]。对于淫羊藿而言,早在明代陈嘉谟便做出了“生处不闻水声者为美”的阐述,他认为生长环境对淫羊藿品质具有影响作用,在远离河流相对干燥的环境中生长的淫羊藿临床效果更好,但这一观点尚未得到科学实验证实。目前,淫羊藿药材来源以野生资源为主^[12],传统产区主要分布在甘肃、陕西、山西南部等地区,药材品质对自然环境依赖性较大,质量参差不齐。

随着计算机技术发展和学科交叉逐渐深入,物种分布模型(Species Distribution Models, SDMs)和地理信息系统(Geographic Information Sys-

tems, GIS)^[13]被应用到中药资源领域,为研究中药潜在适宜区划及品质区划带来了新的技术手段^[14-16],促进了中药事业的蓬勃发展。SDMs 是将物种分布数据与所对应的环境和空间特征信息联系起来的统计模型^[17],在诸多 SDMs 中,最大熵模型(Maximum Entropy Model, MaxEnt)因其所需低样本量、操作简便、准确率高等优点,得到广泛使用^[18]。

本研究基于 MaxEnt 模型,以甘肃省南部洮河流域的淫羊藿为研究对象,通过文献调研和实地采样获取样本地理信息,运用 GIS 技术提取淫羊藿的生长环境因子,采用高效液相色谱法(High-performance Liquid Chromatography, HPLC)测定淫羊藿苷含量,分析淫羊藿苷含量与环境因子的相关性,探究生长环境与淫羊藿品质的关系,为淫羊藿药材资源综合利用与人工种植提供实验数据参考。

2 材料与方法

2.1 样本及物种分布数据采集

查阅中国植物志(<http://www.iplant.cn/>)、中国植物图像库(<http://ppbc.iplant.cn/>)以及相关文献资料获得淫羊藿分布点位信息,在此基础上根据淫羊藿实际分布情况,通过实地调查获取植物样本。同时利用全球定位系统(Global Positioning System, GPS)获取对应点经纬度信息。所有淫羊藿分布点位经 Excel 保存为 CSV 格式。

2.2 环境数据获取

选用土壤类型因子、生物气候因子、全年单月气候数据(降水量、太阳辐射、水蒸气压和风速)、地形因子(坡向、坡度),共计 8 种类型、70 个环境因子作为影响淫羊藿生长的环境因子进行研究分析。其中,土壤类型数据来源于中国科学院南京土壤研究所(<http://www.issas.ac.cn/>),其它气候数据来源于世界气候数据库(<http://worldclim.org/>)的 1979—2000 年的气候数据,空间分辨率为 1 km。

运用 SPSS 18.0 (IBM corp., Armonk, NY, USA) 对同类型的环境因子进行 Pearson 相关性分析, 消除因共线性而造成的模型计算结果的过度拟合, 设置相关系数 $|r|$ 为 0.8 作为阈值对环境因子进行筛选。

2.3 淫羊藿苷含量测定

每个采样地随机选取淫羊藿植株 3 株, 各摘取 3 片叶片, 晒干至恒重, 粉碎混合后过 3 号筛, 作为一组样本。每组样本精密称取 0.2 g, 置于具塞锥形瓶中, 加入精密量取的稀乙醇溶液 20 mL, 称定重量, 超声 1 h 后, 补足损失重量, 经 0.45 μm 滤膜过滤得到供试品溶液。采用 2020 版《中国药典》^[19] 规定的 HPLC 检测方法对淫羊藿苷含量进行测定。

2.4 模型运行与适生区分布

使用 MaxEnt V 3.4.1 (http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/) 生态位模型, 随机选取 25% 作为测试集, 75% 作为训练集。将土壤类型因子设定为非连续变量, 选择创建 ROC 曲线, 最大迭代次数为 10 000 次, 模型结果以 Logistic 格式和 ASC 文件输出, 设置使用刀切测试法衡量环境变量重要性和选择绘制响应曲线, 其余参数均为软件默认值^[20]。模型计算完成后, 使用 ROC 曲线下面积, 即 AUC 值对预测结果的准确性进行评价^[21], AUC 取值范围为 0 ~ 1 (表 1)。

表 1 AUC 值与模型精确性

Tab. 1 AUC values and the model accuracy

AUC 值	准确性
<0.60	失败
0.60—0.70	较差
0.70—0.80	一般
0.80—0.90	良好
0.9—1.00	优秀

根据 MaxEnt 运算结果绘制淫羊藿潜在适生区分布图, 存在概率值 P 数值在 0 ~ 1.00 之间, P 值越接近于 1.00 表示该区域越适宜淫羊藿生长^[22]。潜在适应性区域分为 3 种类型: 非适应性区域 (0 ~ 0.25)、低适应性区域 (0.25 ~ 0.50) 和高适应性区域 (0.50 ~ 1.00)^[14]。

2.5 淫羊藿苷含量等级划分

利用 ArcGIS 10.3 (ESRI, Redlands, CA, USA) 中的掩模提取功能, 提取 29 个淫羊藿采集地的环境因子, 然后运用 SPSS 线性回归分析功能对淫羊藿苷含量与环境因子进行多元线性回归分

析^[23], 并对所得回归方程精确度进行评价。

根据多元线性回归方程结果, 利用 ArcGIS 栅格计算功能, 对淫羊藿适生区栅格数据进行处理, 得到甘肃省南部洮河流域内淫羊藿苷分布变化栅格图层。将淫羊藿苷含量变化由低到高分为 7 组: (0 ~ 1.3%)、(1.3% ~ 1.325%)、(1.325% ~ 1.35%)、(1.35% ~ 1.375%)、(1.375% ~ 1.4%)、(1.4% ~ 1.425%)、(>1.425%)。然后根据淫羊藿苷含量分组情况, 结合淫羊藿植株与河流距离远近关系, 探讨分析淫羊藿药材品质在洮河流域变化趋势。

3 结果与分析

3.1 淫羊藿点位信息与淫羊藿苷含量

采用野外调查与文献调研的方式共获得 68 条淫羊藿点位信息 (图 1)。其中根据淫羊藿实际分布情况, 在河南、山西、陕西、宁夏、甘肃、重庆等省采集植物样本 29 份 (表 2), 获取对应点位信息 29 条。通过文献查阅获得文献调研点位信息 39 条。

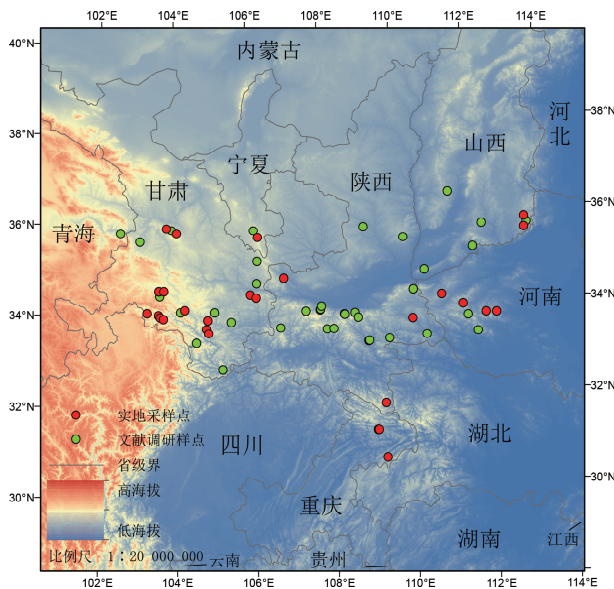


图 1 样本点位分布图

Fig. 1 Distribution of sample points

地图资料源于国家基础地理信息中心 (<http://ngcc.sbsm.gov.cn/>); 核发地图审图号: GS 川 (2023) 32 号

根据 HPLC 检测结果 (表 2), 淫羊藿苷平均含量为 1.04%, 其中甘肃省样本中的淫羊藿苷平均含量为 1.29%, 非甘肃省样本中的淫羊藿苷平均含量为 0.73%, 两者存在显著性差异 ($P < 0.05$), 说明甘肃省出产的淫羊藿药材品质显著优于其它省份, 与目前甘肃省作为淫羊藿优质产区的实际情况相符合。

表 2 采样点信息和淫羊藿苷含量测定

Tab. 2 Sampling site information and content determination of icariin

No.	地点	淫羊藿苷/%
1	甘肃省宕昌县	0.82
2	甘肃省迭部县电尕乡	1.43
3	甘肃省迭部县旺藏乡	1.36
4	甘肃省迭部县旺藏乡	1.15
5	甘肃省迭部县旺藏乡	0.82
6	甘肃省礼县白河镇	1.17
7	甘肃省礼县草坪乡	1.23
8	甘肃省麦积区党川林场	0.97
9	甘肃省麦积区麦积镇	0.88
10	甘肃省七里河区阿干林场	1.47
11	甘肃省武都区樊家坝	1.81
12	甘肃省榆中县兴隆山自然保护区	2.09
13	甘肃省卓尼县大峪沟	1.81
14	甘肃省卓尼县纳浪乡	1.1
15	甘肃省卓尼县纳浪乡	1.45
16	甘肃省卓尼县秋谷村	1.13
17	河南省卢氏县社关镇	0.51
18	河南省鲁山县尧山镇	0.53
19	河南省栾川县狮子庙镇	0.82
20	河南省嵩县车村镇	0.87
21	宁夏泾源县六盘山镇	0.54
22	山西省陵川县六泉乡	0.98
23	山西省陵川县马圪当乡	0.87
24	陕西省镇坪县	0.86
25	陕西省丹凤县庙沟水库	0.44
26	陕西省陇县八渡镇	0.56
27	重庆市奉节县平安乡	0.53
28	重庆市奉节县台子村	0.81
29	重庆市奉节县长槽村	1.13

3.2 环境因子筛选与 MaxEnt 模型准确度分析

经 Pearson 相关性分析去除强相关性因子,最终得到 18 个环境因子(表 3),其中 8 个环境因子(Bio12、Bio15、Prec1、Prec6、Prec8、Prec9、Vapr1、Vapr7)均与湿度相关,表明自然环境中湿度是决定淫羊藿自然分布的主要因素. MaxEnt 模型的测试集平均 AUC 值为 0.980(图 2),平均标准偏差为 0.003,表明所构建的模型预测结果达到优秀水平,可信度高,能够对淫羊藿适生区划区域进行准确的模拟预测.

3.3 淫羊藿适生区分布与关键环境因子分析

淫羊藿适生区(图 3)主要分布在北纬 32°~36°,东经 102°~113°范围内,涉及河南、山西、陕

西、宁夏、甘肃等省的部分地区,适生区总面积约为 $26\times10^4\text{ km}^2$,模拟分布结果与当前淫羊藿实际分布状况基本一致. 其中高适生区面积约为 $10\times10^4\text{ km}^2$,主要分布在甘肃南部、陕西南部及河南西部地区;低适生区面积约为 $16\times10^4\text{ km}^2$,涉及河南、山西、陕西、宁夏、甘肃等省的部分地区.

表 3 所选环境因子

Tab. 3 The selected environmental factors.

环境因子	缩写	单位
坡向	Asp	°
年平均气温	Bio1	°C
等温性	Bio3	1
温度季节性	Bio4	°C
年降水量	Bio12	mm
降水季节性标准差	Bio15	1
	Prec1	
	Prec6	
降水量	Prec8	mm
	Prec9	
坡度	Slo	%
土壤类型	Soil	1
	Vapr1	
水蒸气压	Vapr7	kPa
	SRad8	$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$
太阳辐射	SRad12	day^{-1}
	Wind1	
风速	Wind7	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

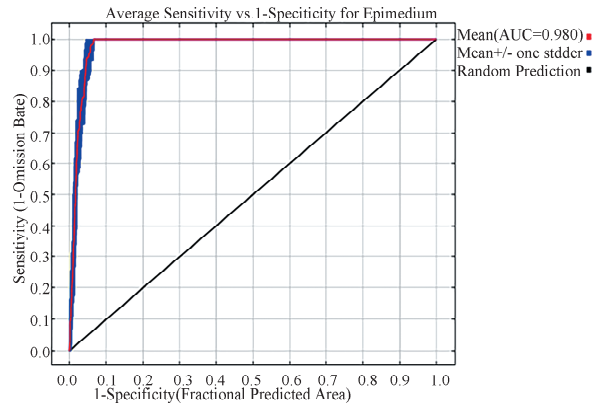


图 2 AUC 值
Fig. 2 AUC value

刀切测试结果表明,影响淫羊藿适生分布贡献率较大的 6 个关键环境因子依次为:9 月份平均降水量(Prec9 25.3%)、土壤类型(Soil 17.3%)、1 月份水蒸气压(Vapr1 17.2%)、7 月份水蒸气压(Vapr7 16.4%)、温度的季节性(Bio4 12.8%)和 8 月份太阳辐射(SRad8 3.9%),累积贡献率超过

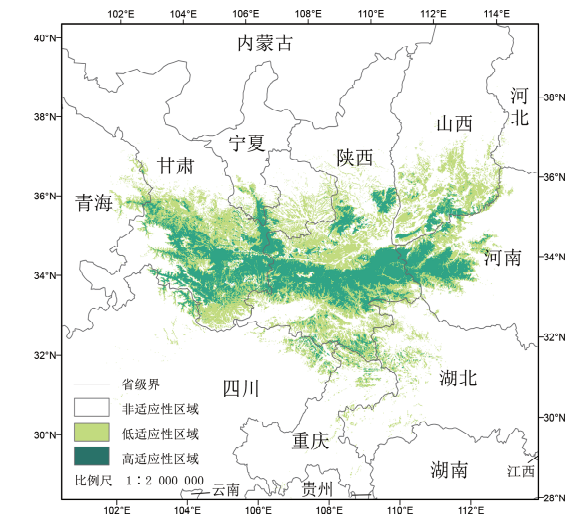


图 3 淫羊藿适生区划

Fig. 3 The adaptive zones of *E. brevicornu* Maxim. 地图资料源于国家基础地理信息中心 (<http://ngcc.sbsm.gov.cn/>);核发地图审图号:GS 川(2023)32 号

90%,其中与环境湿度相关的环境因子有 Prec9、Vapr1、Vapr7,总贡献率约为 58%,其中 Vapr1 正规化训练增益值超过 1.2,Prec9 和 Vapr7 数值均

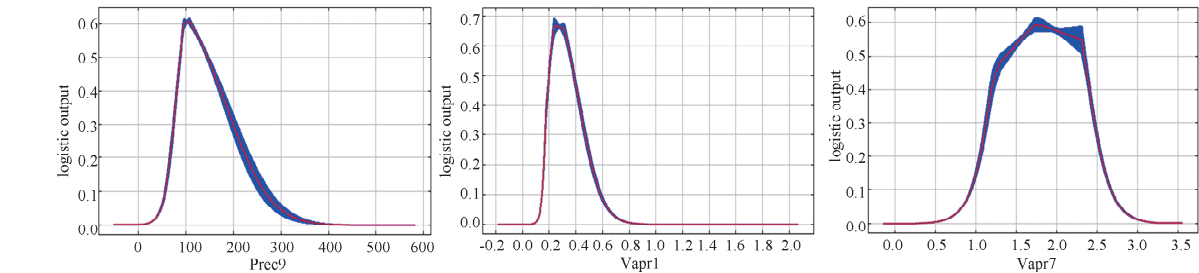


图 5 环境因子响应曲线

Fig. 5 The response curves of the environmental factors

3.4 甘肃省南部洮河流域淫羊藿苷含量变化分析

对淫羊藿苷含量与 18 个环境因子(表 3)进行逐步回归分析,所得回归方程为 $Y=2.178-0.678X$,其中 Y 为淫羊藿苷含量, X 为 Vapr7. 模型显著性检验结果为: $F=26.331,P=0.000,r=0.703,R^2=0.494$,因变量与自变量存在显著线性关系,方程效应显著.淫羊藿苷含量与 Vapr7 呈负相关关系,随着 Vapr7 增加淫羊藿苷含量逐渐降低.

根据回归方程,运用 ArcGIS 栅格计算功能得到甘肃省南部洮河流域淫羊藿植株中淫羊藿苷含量变化图(图 6),淫羊藿苷含量在洮河两岸呈阶梯状递增分布,在距离河道较远的环境中生长的淫羊藿所含的淫羊藿苷含量更高,药材品质更好.此次洮河流域所采集的 4 组样本的淫羊藿苷含量测定结果表明,距离洮河越远的环境中生长的淫羊藿其

超过 0.5(图 4),表明环境湿度是影响淫羊藿生长与分布的重要因素之一.根据环境因子响应曲线图(图 5),当 Prec9 在 84.61~146.15 mm,Vapr1 在 0.25~0.39 kPa,Vapr7 在 1.36~2.33 kPa 范围内变化时,概率值大于 0.5,有利于淫羊藿生长.

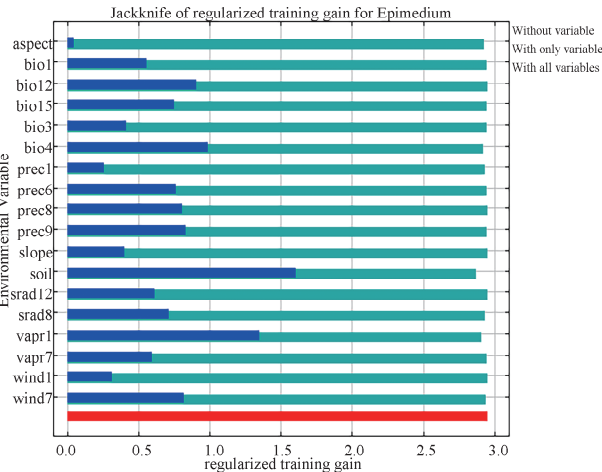


图 4 刀切法对环境因子重要性评价

Fig. 4 Evaluate the relative importance of environmental factors by Jackknife method

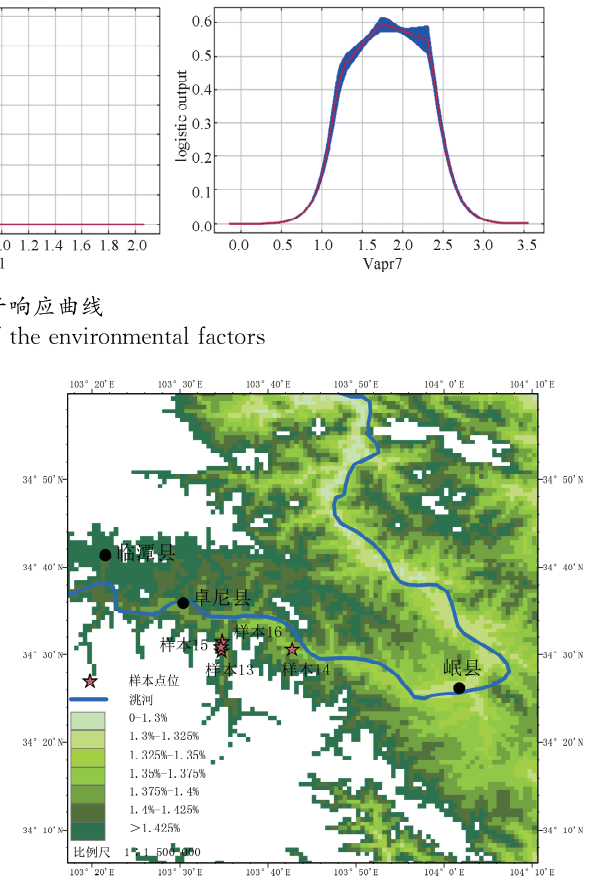


图 6 甘肃南部洮河流域淫羊藿苷含量等级划分

Fig. 6 Quality classification of icariin content in Taohu River, southern Gansu province 地图资料源于国家基础地理信息中心 (<http://ngcc.sbsm.gov.cn/>);核发地图审图号:GS 川(2023)32 号

淫羊藿苷含量越高. 样地 13 距离洮河最远,淫羊藿苷含量最高(1. 81%),其次为样地 15(1. 45%)和样地 16(1. 13%),样地 14 距离洮河最近,淫羊藿苷含量最低(1. 10%). 该药材品质变化趋势与陈嘉谟描述相一致. 分析产生这一变化的主要原因是环境湿度随河流远近产生变化,水蒸气压作为与环境湿度相关的环境因子,在一定范围内水蒸气压越低越有利于次生代谢产物累积^[9],使淫羊藿苷含量增加.

4 讨 论

淫羊藿具有悠久的临床应用历史,现代医学研究表明,淫羊藿次生代谢产物具有多种生理活性作用,市场应用前景广阔. 但淫羊藿作为野生药材,品质容易受到生长环境影响,因此开展淫羊藿品质影响因素研究意义重大. 本文以淫羊藿苷含量作为淫羊藿品质评价标准,基于淫羊藿苷含量与环境因子相关性,对甘肃省南部洮河流域淫羊藿品质变化趋势进行研究.

MaxEnt 模型能够对淫羊藿适生区进行精确运算,根据模型运算结果,淫羊藿适生区主要分布

于河南、山西、陕西、宁夏、甘肃等省的部分地区,模型运算结果基本覆盖淫羊藿实际分布范围,面积约为 $26\times10^4\text{ km}^2$,其中高适生面积为 $10\times10^4\text{ km}^2$,呈带状分布于甘肃、陕西及河南境内部分地区,空间范围狭小,作为野生淫羊藿药材主要采收区,建议在该区域内开展野生淫羊藿资源保护工作,对资源进行合理开发与利用,避免过度采收造成生态环境破坏,促进淫羊藿资源的可持续发展.

根据 MaxEnt 模型评估结果,Prec9、Vapr1 和 Vapr7 作为与环境湿度相关的因子,对于淫羊藿适生分布的累计贡献率约为 58%,说明环境湿度是决定淫羊藿生长分布的主要因素,在淫羊藿适生区范围内,Prec9、Vapr1 和 Vapr7 自东向西整体呈现降低的趋势(图 7),甘肃省环境湿度较陕西、河南两省低. 逐步回归分析结果显示 Vapr7 与淫羊藿苷含量呈负相关关系,当水蒸气压升高时淫羊藿苷含量随之降低,甘肃省境内 Vapr7 数据低于陕西、河南两省,根据回归方程,甘肃省境内淫羊藿药材中淫羊藿苷含量更高,符合目前甘肃省作为淫羊藿药材优质产区的现状.

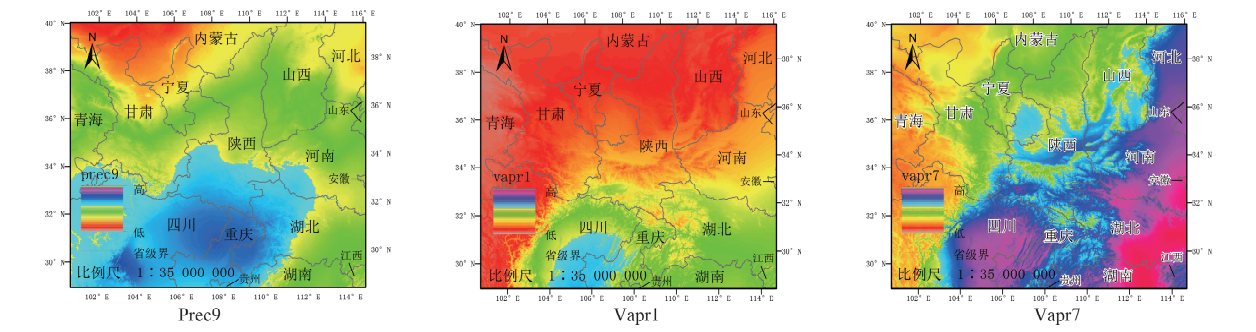


图 7 环境因子变化趋势
Fig. 7 Change trend of environmental factors
地图资料源于国家基础地理信息中心(<http://ngcc.sbsm.gov.cn/>);核发地图审图号:GS 川(2023)32 号

基于所得回归方程运用 ArcGIS 栅格计算功能对淫羊藿适生区图层进行处理,最终得到淫羊藿苷含量在洮河流域变化趋势图层. 研究证实水蒸气压与环境中的湿度存在一定关联性,当湿度升高时,水蒸气压相应增加^[24,25],在洮河流域,环境湿度随着与河道距离的增加逐渐降低,水蒸气压下降,根据回归方程,淫羊藿苷含量相应增加,该趋势变化与古人对于淫羊藿“生处不闻水声者为美”描述相符,在远离河道湿度相对较低的环境中生长的淫羊藿所含的淫羊藿苷含量较高,药材品质较好.

本文以洮河流域内淫羊藿为研究对象,基于淫羊藿适生分布区对影响淫羊藿品质的环境因子进行了筛选分析,探讨了环境因子对淫羊藿品质的影

响路径,结果表明与环境湿度相关的环境因子不但能对淫羊藿生长分布产生影响,而且还可以通过水蒸气压对淫羊藿苷含量产生显著影响,在适宜淫羊藿生长的河道两边,距离河流越远淫羊藿品质越高. 该研究对于开展野生淫羊藿资源的保护、开发,及品种的人工繁育具有一定的理论指导价值.

虽然 MaxEnt 模型在预测物种空间分布方面具有许多优势,但作为生态位模型只能够对物种的基本生态位进行描述,不能够代表物种的实际生态位,同时在本研究中未涉及物种间的竞争、人类活动及地理屏障等因素对于淫羊藿生长分布的影响,可能导致淫羊藿实际生态位小于基本生态位.

参考文献:

- [1] Ma H, He X, Yang Y, *et al.* The genus *Epimedium*: an ethnopharmacological and phyto-chemical review [J]. *J Ethnopharmacol*, 2011, 134: 519.
- [2] 梁海锐, 李家实, 阎文玫, 等. 中药淫羊藿的商品调查和本草考证[J]. *中药通报*, 1988, 12: 7.
- [3] Chen X, Tang Z, Li X, *et al.* Chemical constituents, quality control, and bioactivity of *Epimedium Folium* (Yinyanghuo) [J]. *Am J Chinese Med*, 2015, 43: 783.
- [4] Xu S, Jin T, Lu Y, *et al.* Effect of icariin on Udp-glucuronosyltransferases in mouse liver [J]. *Planta Med*, 2014, 80: 387.
- [5] Qian W, Su Y, Zhang Y, *et al.* Secretome Analysis of rat osteoblasts during icariin treatment induced osteogenesis [J]. *Mol Med Rep*, 2018, 17: 6515.
- [6] Fang J, Zhang Y. Icariin, an anti-atherosclerotic drug from Chinese medicinal herb Horny Goat Weed [J]. *Front Pharmacol*, 2017, 8: 734.
- [7] Angeloni C, Barbalace M, Hrelia S, *et al.* Icariin and its metabolites as potential protective phytochemicals against Alzheimer's disease [J]. *Front Pharmacol*, 2019, 10: 271.
- [8] Jin J, Wang H, Hua X, *et al.* An outline for the pharmacological effect of icariin in the nervous system [J]. *Eur J Pharmacol*, 2019, 842: 20.
- [9] Gai Z, Wang Y, Ding Y, *et al.* Exogenous abscisic acid induces the lipid and flavonoid metabolism of tea plants under drought stress [J]. *Sci Rep-UK*, 2020, 10: 12275.
- [10] 黄璐琦, 郭兰萍. 环境胁迫下次生代谢产物的积累及道地药材的形成 [J]. *中国中药杂志*, 2007, 4: 277.
- [11] 王红星, 乔传英, 古红梅. 影响植物次生代谢产物形成的因素 [J]. *安徽农业科学*, 2007, 35: 11376.
- [12] 郭宝林, 肖培根. 中药淫羊藿主要种类评述 [J]. *中国中药杂志*, 2003, 28: 18.
- [13] Boria R, Olson L, Goodman S, *et al.* Spatial filtering to reduce sampling bias can improve the performance of ecological niche models [J]. *Ecol Mod-*
- el, 2014, 275: 73.
- [14] 王书越, 潘少安, 王明睿, 等. 基于 MaxEnt 模型评估刺五加在东北地区的空间分布 [J]. *生态学报*, 2019, 39: 3277.
- [15] 代玉烜, 金塘, 徐海霞, 等. 基于 MaxEnt 模型的小黄花茶在中国的适生区域研究 [J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2021, 58: 026002.
- [16] 张飞, 陈随清, 王利丽, 等. 基于 Maxent 和 Arc-GIS 的山茱萸生态适宜性区划研究 [J]. *中国中药杂志*, 2017, 42: 3078.
- [17] Elith J, Leathwick J R. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time [J]. *Annu Rev Ecol Evol S*, 2009, 40: 677.
- [18] 乔慧捷, 胡军华, 黄继红. 生态位模型的理论基础、发展方向与挑战 [J]. *中国科学: 生命科学*, 2013, 43: 915.
- [19] 国家药典委员会. 中国药典 [M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 340.
- [20] Merow C, Smith M J, Silander J A. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter [J]. *Ecography*, 2013, 36: 1058.
- [21] Wisz M S, Hijmans R J, Li J, *et al.* Effects of sample size on the performance of species distribution models [J]. *Divers Distrib*, 2008, 14: 763.
- [22] Phillips S, Anderson R, Schapire R. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. *Ecol Model*, 2006, 190: 231.
- [23] Kokaly R, Clark R. Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption features and stepwise multiple linear regression [J]. *Remote Sens Environ*, 1999, 67: 267.
- [24] Grossiord C, Buckley T N, Cernusak L A, *et al.* Plant responses to rising vapor pressure deficit [J]. *New Phytol*, 2020, 226: 1550.
- [25] Massmann A, Gentine P, Lin C. When does vapor pressure deficit drive or reduce evapotranspiration? [J]. *J Adv Model Earth Sy*, 2019, 11: 3305.

引用本文格式:

中 文: 李云峰, 何平, 孟繁蕴. 基于 MaxEnt 模型的甘肃省南部洮河流域淫羊藿品质变化分析 [J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2023, 60: 026002.

英 文: Li Y F, He P, Meng F Y. Quality change analysis of *Epimedium brevicornu* Maxim. in Taohe River basin in southern Gansu Province based on the MaxEnt model [J]. *J Sichuan Univ: Nat Sci Ed*, 2023, 60: 026002.