

刺五加全球产地生态适宜性及品质生态学研究

徐 燃^{1,2#}, 吴 杰^{2#}, 董林林², 徐 江², 陈 平¹, 刘 淼^{2,3},
黄林芳⁴, 陈士林^{2*}

(1. 武汉轻工大学生物与制药工程学院, 湖北 武汉 430023; 2. 中国中医科学院中药研究所, 北京 100700;
3. 吉林农业大学中药材学院, 吉林 长春 130118; 4. 中国医学科学院、北京协和医学院药用植物研究所, 北京 100193)

摘要: 采用药用植物全球产地适宜性信息系统 (geographic information system for global medicinal plants, GMPGIS) 结合最大熵模型 (maximum entropy model, MaxEnt) 软件对渐危药用植物刺五加进行全球产地适宜区分析, 依据刺五加主要生态因子年均温、最热季均温、最冷季均温、年降水量、年平均湿度、年均日照的阈值范围, 结合冗余分析 RDA 评估主产区刺五加紫丁香苷含量与主要生态因子之间的关联性, 综合得出与刺五加有效成分含量紧密相关的生态因子。中国、俄罗斯、日本、朝鲜为刺五加的主产区, 该药用植物在全球潜在适宜区分布于美国、加拿大、乌克兰、罗马尼亚、匈牙利和德国等 22 个国家; 在中国境内, 黑龙江、吉林、辽宁为刺五加原主产区, 河北、山西、陕西及四川等省区可考虑引种扩种; RDA 分析结果表明年均湿度、降水、温度为影响刺五加紫丁香苷含量的主要生态因子, 并且在一定范围与含量呈正相关。本研究结果为刺五加适宜区的合理规划与资源再生提供参考依据。

关键词: 刺五加; 区划; 生态因子; RDA 分析; 资源再生

中图分类号: R931 文献标识码: A 文章编号: 0513-4870 (2018) 02-0313-08

Analysis of global ecology of *Acanthopanax senticosus* in suitability and quality

XU Ran^{1,2#}, WU Jie^{2#}, DONG Lin-lin², XU Jiang², CHEN Ping¹, LIU Miao^{2,3},
HUANG Lin-fang⁴, CHEN Shi-lin^{2*}

(1. College of Biology and Pharmaceutical Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;
2. Institute of Chinese Materia Medica, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100700, China;
3. College of Chinese Medicine, Jilin Agricultural University, Changchun 130118; 4. Institute of Medicinal Plant Development, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Beijing 100193, China)

Abstract: Geographic information system for global medicinal plants (GMPGIS) and MaxEnt modeling are adopted to analyze the ecological suitability of the endangered plant *Acanthopanax senticosus*. Response curves were created by the raster data of 6 ecological factors, including mean annual temperature, mean temperature of warmest quarter, mean temperature of coldest quarter, mean annual precipitation, mean annual humidity, and mean annual radiation. The relationship between the syringin content of this plant and these ecological factors was analyzed using a redundancy analysis method (RDA), which could be used to predict the most relevant ecological factors influencing the active constituents of *Acanthopanax senticosus* plants.

收稿日期: 2017-10-27; 修回日期: 2017-12-25.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (81603238); 湖北省教育厅中青年人才项目 (20171705).

#同等贡献.

*通讯作者 Tel / Fax: 86-10-57203877, E-mail: slchen@icmm.ac.cn

DOI: 10.16438/j.0513-4870.2017-1062

GMPGIS and MaxEnt results suggest that China, Russia, Japan, and North Korea, are the main producing areas in the world for *Acanthopanax senticosus*, while there are also other potential areas with maximum similarities of ecological distribution in the United States, Canada, Ukraine, Romania, Hungary, Germany and 22 other countries. In addition, the genuine producing areas in China mainly include Heilongjiang, Jilin and Liaoning, while there are the maximum similarities of ecological distribution of *Acanthopanax senticosus* in Hebei, Shanxi, Shaanxi and Sichuan. RDA results suggest that the mean annual humidity, precipitation, temperature are the most important eco-factors positively affecting the content of syringin in *Acanthopanax senticosus*. Our research provides scientific support to the utilization of ecological suitability areas for endangered plant *Acanthopanax senticosus* and the resource regeneration.

Key words: *Acanthopanax senticosus*; regionalization; ecological factor; redundancy analysis; resources regeneration

刺五加来源于五加科植物刺五加 *Acanthopanax senticosus* (Rupr. et Maxim.) Harms, 又名一百针、坎拐棒子、老虎潦、西伯利亚人参等, 以干燥根、根茎或茎入药。刺五加作为独立的中药材收载于 1977 年版《中国药典》^[1]。其味辛、微苦, 性温, 归脾、肾、心经, 具有益气健脾, 补肾安神的功效^[2]。野生刺五加原主产于我国小兴安岭、长白山、大兴安岭、燕山山脉、太行山和秦岭山脉^[3], 是我国东北林区珍贵的中药资源。随着以刺五加为原料的产品日益受国内外欢迎, 尤其是近年来发现其药效与人参相似后^[4], 刺五加全面开发利用的速度迅速加快, 现已经研发出多种以刺五加为原料的药品、保健品和食品: 如刺五加注射液、刺五加片、安神补脑胶囊、刺五加茶、刺五加酒等^[5], 产品远销日本、韩国、东南亚地区, 以及俄罗斯、欧洲、北美洲等一些国家, 是我国重要的出口创汇商品, 具有较高的经济价值。

目前, 市场上刺五加的供应绝大部分依赖野生, 由于巨大的消费需求, 很多商家在刺五加产区建立了加工基地, 大量采收刺五加野生品制备产品, 导致其自然资源遭到毁灭性破坏, 蕴藏量大幅度下降, 分布面积急剧缩减^[6]。再加上野生刺五加适生环境的生态幅较窄, 有性繁殖率低, 无胚种子较多, 天然更新较为困难, 使刺五加野生资源枯竭。1992 年公布的《中国植物红皮书—稀有濒危植物 (第一册)》中, 刺五加被列为渐危物种^[7]。2008 年又被列入北京市政府批准公布的《北京市重点保护野生植物名录》的二级保护植物, 属于濒危和需要特别关注的野生药用植物^[8–10]。为了保护这一珍稀药用植物物种并对其进行合理的开发利用, 近年来已开始开展人工繁育栽培, 但目前刺五加栽培引种的存活率和产量极低, 供需矛盾仍在不断扩大。为此, 科学分析刺五加的适生区域, 并充分了解与其品质密切相关的生态因子影响规律,

是有效进行资源再生的前提。本项工作采用药用植物全球生态适宜性分析系统 (geographic information system for global medicinal plants, GMPGIS) 结合最大熵模型 (maximum entropy model, MaxEnt) 软件, 对渐危药用植物刺五加在全球的潜在适宜区进行了分析, 并探讨了主要适宜区的气候生态因子: 年均温、最热季均温、最冷季均温、年降水量、年平均湿度、年均日照的范围及土壤类型, 以及各生态因子与刺五加有效成分紫丁香苷 (2015 版药典收载的含量测定项) 含量积累的相关性, 揭示刺五加对环境因子的适应策略, 为刺五加在适宜区推广人工栽培及野生抚育提供科学依据。

数据与方法

刺五加分布空间数据库 在全国中药材原植物野生分布和产地数据分析基础上, 参考第三次全国资源普查结果数据与基础地理信息数据 (省区划、县区划和乡镇区划) 进行整理和集成, 构成了中药材分布空间数据库。结合中国数字植物标本馆 (Chinese virtual herbarium, CVH)、全球生物多样性信息数据库网络 (global biodiversity information facility, GBIF)、《中国植物志》、Flora of China 及相关文献报道。通过标本记录和 GPS 定位等方法确定物种及标本点、经度和纬度等准确信息, 去重、验证、备用。

GMPGIS 分析数据来源 GMPGIS 是由中国中医科学院中药研究所自主研发的全球药用植物适宜产区的分析系统, 根据影响药用植物资源分布的主要生态因子 (表 1), 整合包括土壤、基础地理信息数据库和药用植物空间分布等类型的多种数据库: 基础地理信息数据库, 包括矢量国界区划、省界区划等数据库; 全球生物气候学建模数据库 (ClimMond: global climatologies for bioclimatic modeling)^[11, 12]; 全球土

壤数据库 (harmonized world soil database, HWSD, 由联合国教科文组织和国际应用系统分析研究所共同组建), 全球气候数据库 (WorldClim-global climate date, 由美国加州大学伯克利分校研发建立^[13, 14])。

Table 1 The information of 7 ecological factors

Database	No.	Ecological factor	Unit
WorldClim	BIO1	Mean annual temperature	$\times 10^{\circ}\text{C}$
	BIO10	Mean temperature of warmest quarter	$\times 10^{\circ}\text{C}$
	BIO11	Mean temperature of coldest quarter	$\times 10^{\circ}\text{C}$
	BIO12	Mean annual precipitation	mm
	BIO19	Mean annual humidity	%
CliMond	BIO20	Mean annual radiation	$\text{w}\cdot\text{m}^{-2}$
HWSD		Landuse type	-

分析方法 GMPGIS 方法参见《三七全球产地生态适宜性及品质生态学研究》^[15], 包括数据标准化、相似性聚类分析和栅格重分类。最大信息熵模型方法参见《基于MaxEnt模型的当归全球生态适宜区和生态特征研究》^[16], 包括最大熵的可能分布空间等。

生态因子响应曲线模型建立 将刺五加地理分布点数据和环境变量数据导入 MaxEnt 3.3.3 中, 经过调整参数后的 MaxEnt 模型, 最后得到模拟预测结果^[17]。

主产地刺五加化学成分含量与生态因子 RDA 冗余分析 用 Canoco5.0 软件对刺五加活性成分紫丁香苷含量数据进行去趋势对应分析 (DCA), 观察模型的整体情况, 并将环境因子数据和成分含量数据加到排序图上, 进行 RDA 分析^[18]。结合化学数据进行主相关性分析, 找出具有代表性的因子, 规划最优产地^[19]。

结果

1 刺五加生态适宜性分析流程

对刺五加的调查样点、数字标本信息等 GPS 实地定位, 结合相关文献资料分析刺五加药材道地产区、主产区及野生分布区域, 得出刺五加药用植物在全球自然分布的经度、纬度数据。将此药用植物空间分布的经纬度表格导入 GMPGIS 系统中, 系统整合成气候、土壤、基础地理信息等基础数据, 进行生态因子归一化计算、相似性聚类及适宜产区分析, 最终获得刺五加的生态环境阈值和全球潜在适宜分布区。并结合 RDA 解读双向排序图, 分析主成分含量与主要气候生态因子之间的相关性, 综合得出刺五加适宜产区的主要生态因子条件和产区引种扩种的规划。详细流程图如图 1 所示。

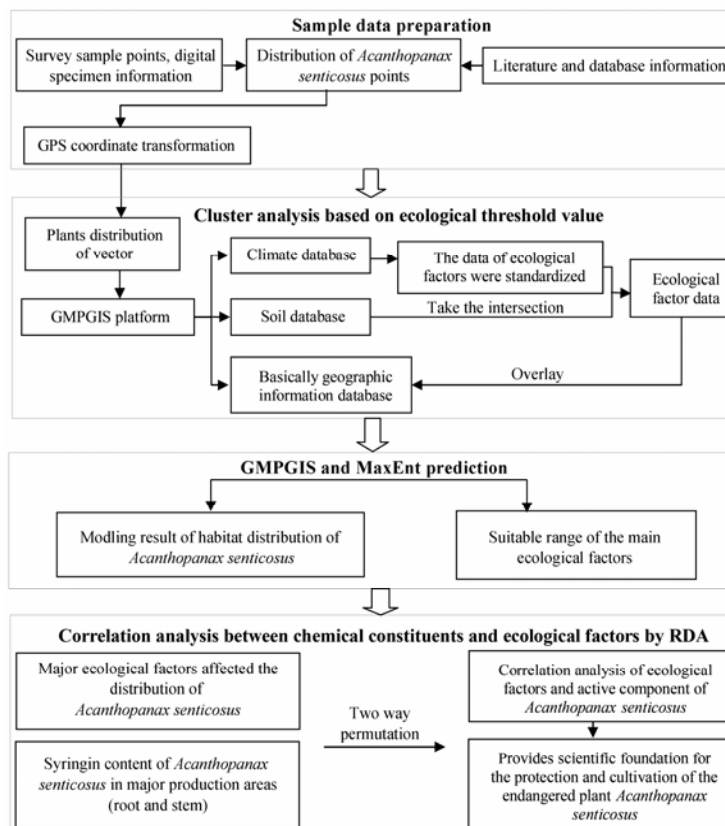


Figure 1 The flow-chart of the ecological suitability analysis for *Acanthopanax senticosus*

2 刺五加全球潜在适宜区分析

基于刺五加在全球分布区的样点信息, 通过 GMPGIS 系统的生态阈值聚类和分析, 获得刺五加在全球最大生态相似度适宜产区分布图, 刺五加主要集中生长在寒温带的中国大陆东北及俄罗斯远东, 向南往西可经我国长白山、雾灵山到太行山, 向北往东可达朝鲜和日本北海道, 喜湿润一半湿润季风气候。GMPGIS 平台分析结果显示, 刺五加在全球的潜在适宜区域还包含北美洲中部及偏东的美国与加拿大交界的五大湖范围区域、美国西北部、加拿大西南部, 欧洲东部、东南及中部的乌克兰、罗马尼亚、匈牙利和德国等区域, 以及中亚内陆国家哈萨克斯坦与中国新疆交界地带、俄罗斯西南部等零星区域 (图 2a1)。基于 MaxEnt 软件中的最大信息熵模型算法对

刺五加在全球的分布区域及面积进行分析, 结果表明, 当 MaxEnt 适宜性指数 > 20% 时, 其适宜区域分布面积与 GMPGIS 平台分析结果最为接近 (图 2b1)。在全球范围内, 刺五加主要分布于中国、美国、俄罗斯和加拿大 4 国, 其中 GMPGIS 平台分析该 4 国的最大适生面积约占刺五加全球潜在适生分布区总面积的 85%, MaxEnt 分析其主要适生 4 国适宜区总面积约占全球潜在适生分布区面积的 87%, 2 种软件分析得出的刺五加全球潜在总适生面积结果较为一致。但 GMPGIS 与 MaxEnt 方法分析得出的各国适生面积并不完全相同, 例如通过 2 种软件分析的俄罗斯的适生面积结果有一定差异 (图 2a2、2b2)。

3 刺五加国内产地生态适宜性分析

GMPGIS 与 MaxEnt 分析结果均表明 (图 3a、3b),

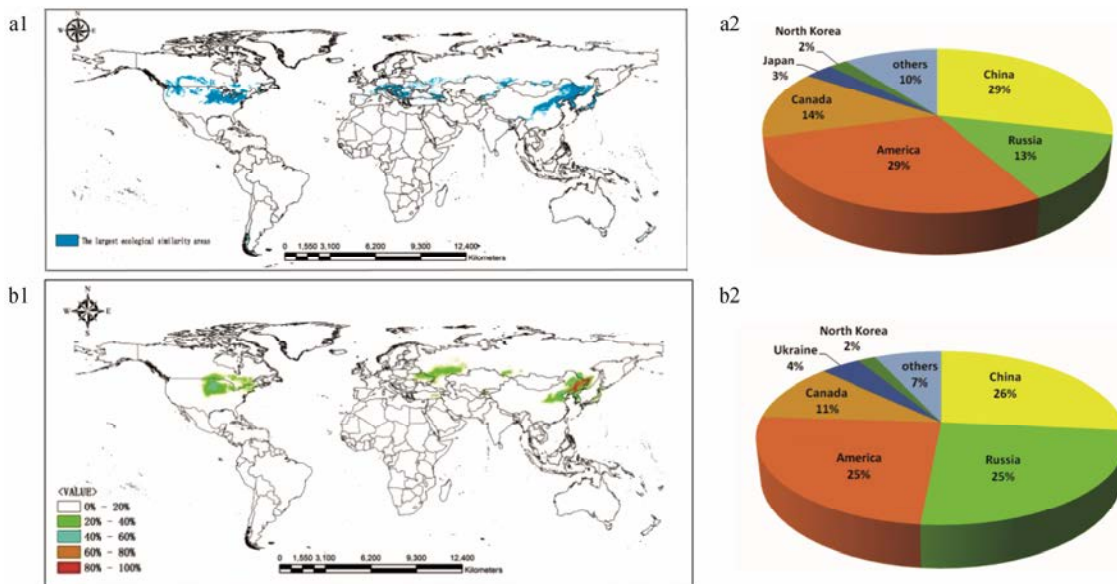


Figure 2 Maximum similarities of the ecological distribution of *Acanthopanax senticosus* in regions worldwide. 2a1: Maximum similarities of the ecological distribution of *Acanthopanax senticosus* in regions worldwide analyzed by GMPGIS; 2a2: Maximum ecological similarity proportional graphs areas of *Acanthopanax senticosus* in the global scale analyzed by GMPGIS. 2b1: Maximum similarities of the ecological distribution of *Acanthopanax senticosus* in regions worldwide analyzed by MaxEnt; 2b2: Maximum ecological similarity proportional graphs areas of *Acanthopanax senticosus* in the global scale analyzed by MaxEnt

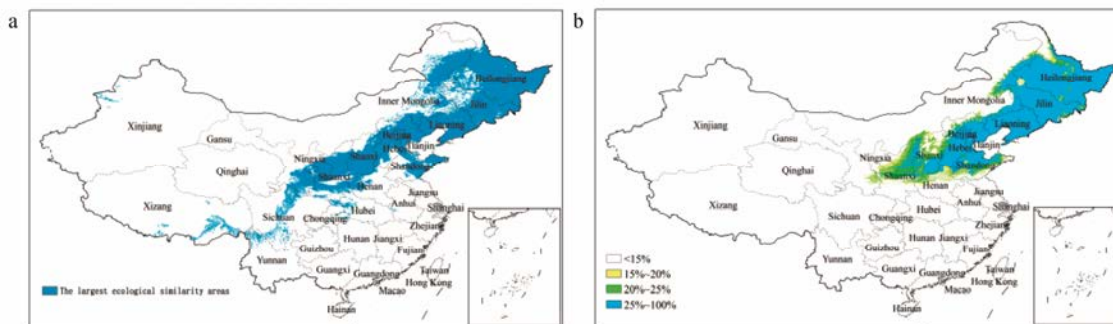


Figure 3 Maximum similarities of the ecological utilization of *Acanthopanax senticosus* in areas in China. a: Maximum similarities of the ecological utilization of *Acanthopanax senticosus* in areas in China analyzed by GMPGIS; b: Maximum similarities of the ecological utilization of *Acanthopanax senticosus* in areas in China analyzed by MaxEnt

刺五加药用植物原主产区位于我国东北地区, 主要分布在黑龙江、内蒙古、吉林、辽宁等地, 其中小兴安岭及长白山北部蕴藏量较大。该区域多属于温带季风气候, 四季分明、雨热同期, 刺五加在该区的分布面积占全国总分布面积的 50% 以上。该地区环境与刺五加喜温湿-半温湿生长习性的条件要求相吻合。而河北、山西、陕西 3 省适宜栽种面积均大于 100 000 km² 以上, 是刺五加在国内具有潜在扩种价值的适生省份。近年来, 在山西省交城、兴县、离石等地发现了越来越多的野生刺五加资源, 主要可能与山西省的地形多样有关。以上 3 个县位于山西省中部西侧吕梁地区, 地形具有明显的垂直变化, 平均海拔在 1 000 m 以上, 属大陆暖温带季风气候, 提供了刺五加较适宜生长的生态环境。

基于 GMPGIS 系统的分析结果表明 (图 3a), 在四川大凉山与小相岭间、重庆南山区延伸至云南东南边缘横断山地向云贵高原过渡的衔接地段具有刺五加的潜在分布区域。通过更全面的样点采集调查, 也发现了少量有野生刺五加标本采样点 (标本采集地: 四川凉山彝族自治州、涪陵地区南川、若尔盖县、天全县; 云南省彝良县、玉龙县; 馆藏单位: 青海生物研究所植物标本室、中国科学院昆明植物研究所、中国科学院成都生物研究所标本室、四川省草原研究所标本馆、中国科学院西双版纳热带植物标本馆; 鉴定人: 李雅茹、杨少华、杨丽云等)。这可能是由于该地区气候属低纬度高原季风气候, 具温凉之更迭, 降水较为丰富的特点, 给刺五加提供了较为合适的生长环境, 说明该地区具有一定的引种潜力。故四川盆

地东南边缘与云贵高原过渡地带也可考虑规划成为刺五加的资源再生区域。而基于 MaxEnt 概率论和机器学习理论模型的分析结果遗漏了该区域。

4 刺五加分布区的生态特征

基于选取的 228 个刺五加自然分布样点信息, 提取 GMPGIS 中生态因子数据 (图 4), 刺五加在不同适宜生长分布区域最冷季均温为 -23~1 °C, 最热季节均温 9~26 °C, 年均温 -7~13 °C, 年均降水量 405~1 571 mm, 年均相对湿度 52%~73%, 年均日照 111~260 W·m⁻², 适宜刺五加生长的土壤类型以暗色土、人为土、始成土、冲积土、潜育土等为主。通过综合分析得出, 气候因子对刺五加分布起主要作用, 将采样点的地理分布和气候因子数据导入 MaxEnt 3.3.3 中, 分析得出了该药用植物的主要气候生态因子响应曲线。一般认为, 刺五加分布概率 > 0.5, 其对应的生态因子的值适合刺五加生长^[20]。由图 4 可以看出, 随着年均温度数值增加, 当年均温 > -7 °C 时刺五加的分布概率急剧上升, 7 °C 左右达到刺五加最适宜生长的年均温度条件, 随后下降, 在年均温为 20 °C 时, 其分布概率几乎为零, 故刺五加年均温的适宜范围为 7~7 °C, 最冷季均温适宜范围为 -14~-1 °C, 最热季均温适宜范围为 17~22 °C, 年均湿度的分布概率幅度较为集中, 湿度在 40% 以下, 分布概率几乎为零, 年均湿度范围在 40%~78% 为刺五加最适宜的生长条件, 最适宜年降水量范围在 500~850 mm, 年均日照范围在 130~165 W·m⁻²。该结果表明, 适宜的刺五加生长的生态幅度较窄, 其典型生境主要分布在大陆兼海洋性气候区域, 地处山的北坡、西北坡和东北坡的

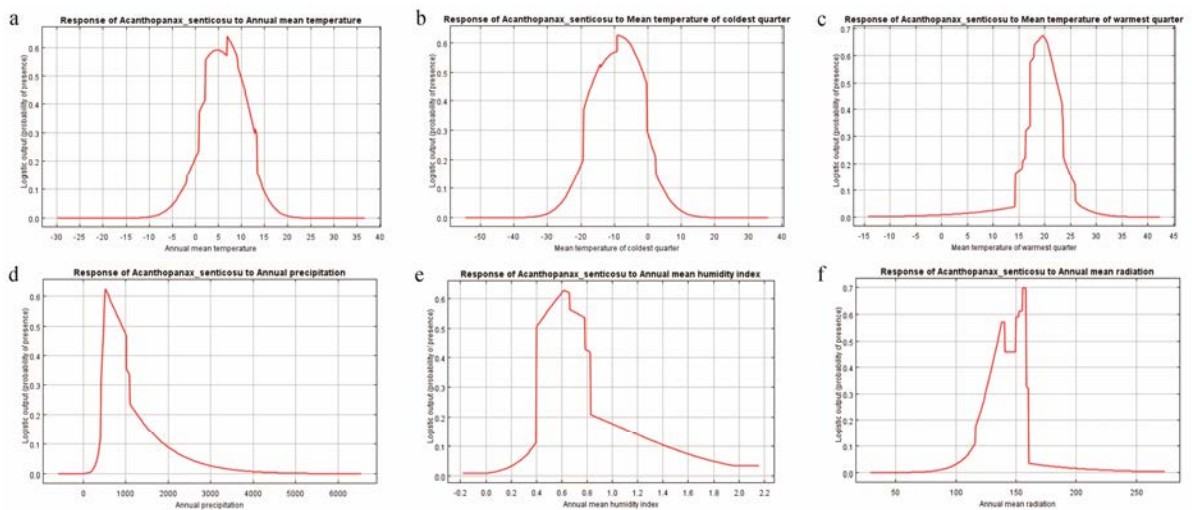


Figure 4 Response curves of main climate factors affecting the growth of *Acanthopanax senticosus*. a: Mean annual temperature; b: Mean temperature of warmest quarter; c: Mean temperature of coldest quarter; d: Mean annual precipitation; e: Mean annual humidity; f: Mean annual radiation

阴凉湿润地带, 南坡高温干燥分布稀少。

5 主产区刺五加(根和茎)紫丁香苷含量与生态因子关系排序分析

图5是刺五加在我国东北产区26个样点^[21-23]的RDA双向排序图, 采样点与环境因子箭头方向共同反映出样点的分布沿每个环境因子的变化特征。将筛选得到的6个生态因子值提取到采样点信息表中。采用CanoDraw 5.0相关性系数对提取的生态因子与26份刺五加样品(根和茎)总紫丁香苷(2015版药典收载刺五加的测定项)成分含量进行相关性分析。蓝色箭头代表刺五加(根和茎)中紫丁香苷有效成分的含量, 红色箭头分别代表不同的生态因子。从RAD图可以看出, 年均湿度对刺五加根和茎中紫丁香苷含量的影响最为显著, 呈正相关性。除此以外, 对于刺五加根部, 在一定范围之内, 最冷季均温、年均温、年均降水量、最热季均温与刺五加根中紫丁香苷的含量也具有一定的正相关性, 年均日照与根中紫丁香苷含量的累积呈微弱的负相关; 而对于刺五加的茎部, 最冷季均温、年均温、年降水量、最热季均温、年均日照与刺五加茎中紫丁香苷的含量积累均呈正相关。

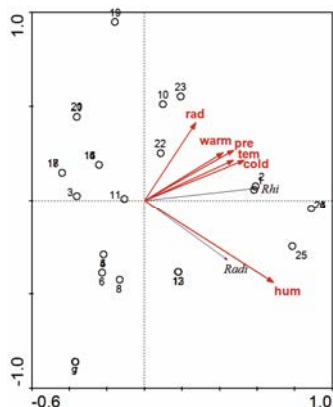


Figure 5 The redundancy analysis (RDA) of syringin content of *Acanthopanax senticosus* (root and stem) and ecological factors

讨论

产地环境是药材引种栽培和品质保证的重要因素, 直接影响到药材的产量和质量^[24]。尤其是对于刺五加这种适生幅度狭窄、生长周期长的药用植物资源^[25], 如果盲目引种, 不仅存活率低, 见效慢, 还会导致药材品质严重下降, 影响中药的有效性甚至安全性, 也会极大损害药农的经济利益和种植积极性。

“药用植物全球产地生态适宜性区划信息系统”(GMPGIS), 能够对中药材产地的适宜性进行多生态

因子、多统计方法的定量化与空间化分析, 进而综合确定中药材产地生态适宜性区划, 已逐渐推广应用于药用植物潜在分布适宜区的分析研究^[26]; Shen等^[27]已通过该系统得出了当前时期全球范围的人参适宜产区, 并在此基础上制定了农田栽参选地标准, 为人参农田规模化种植提供了指导。Meng等^[15]通过生态相似性分析获得三七在全球范围内的最适生区域, 表明中国最适宜产区超过全球最适栽培区面积的70%, 并且中国三七的最适栽培区主要为云南、广西等省, 分析结果符合近年来三七引种扩种趋势, 进一步验证了GMPGIS系统的科学性与准确性。在本研究中, 基于刺五加228个样点开展GMPGIS分析结果与MaxEnt分析结果较为一致: 分析刺五加在全球潜在适宜产区主要分布在北半球中高纬度区的东亚, 以中国较为集中, 我国东北地区为刺五加的主要道地产区, 这可能是由多重环境生态因子条件综合所致^[28, 29]。GMPGIS结果显示, 四川及云南高原过度地带也为刺五加的相似适生区。这是由于GMPGIS与MaxEnt相比, 所有样点在分析潜在适生区分布中均起决定作用, 采样点均被适宜区覆盖, 不存在离群采样点。在全球范围内, 北美洲中部及偏东的美国、加拿大, 欧洲东部、东南及中部乌克兰、罗马尼亚、匈牙利和德国, 以及中亚内陆哈萨克斯坦与中国新疆交界地带和俄罗斯西南部, 由于该区域的环境变量条件适宜, 也可以发展为刺五加引种栽培的区域。因此, 在已发现散在少量野生刺五加的区域, 可以考虑扩大人工栽培区的面积, 对于还未发现刺五加的潜在适生区可以考虑引种及栽培, 由此获得更为丰富的刺五加栽培资源。

随着人们对于药材适宜产区的认识不断加深, 相关研究人员都在不断尝试用更加准确和合理的方法来阐释产地的各种生态因子与引种区域和药材品质的关系及影响。因此, 本研究还通过RDA冗余分析对刺五加(根及茎)紫丁香苷含量与6个生态因子之间的相关性进行双向排序分析, 结果表明, 年均湿度对刺五加根部和茎部紫丁香苷含量的影响最为显著, 呈正相关性。另外, 最冷季均温、年均温、年均降水量、最热季均温也均与刺五加根部及茎部有效成分的积累呈正相关。Li等^[30]研究了不同的生境下刺五加与药用成分含量的关系, 认为湿度与光照是对刺五加影响较为明显和突出的因素(对林下生物来讲即湿度与郁闭度)。Cheng等^[31]研究表明, 年降水量、平均气温是影响刺五加资源分布的主要生态因子, 极端温度及日照时数对刺五加资源分布的影响不显著, 与

本文得到的分析结果基本吻合。综上所述, 气候因子在刺五加资源分布中起到决定性作用。年均湿度、降水、温度构成刺五加产区适应性和品质优劣重要生态因子, 与刺五加引种的产地和品质密切相关, 是刺五加引种、扩种的主要参考指标。半阴生环境, 半阴半阳的针阔叶混交林或阔叶林下为刺五加适宜的日照环境, 在全光条件下栽培适应性存在一些问题^[32, 33]。

基于 GMPGIS 结合 MaxEnt 的分析结果, 通过主要气候生态因子值范围经验阈值, 结合 RDA 双序排序方法对成分含量积累与生态因子之间的关联分析, 对刺五加的引种栽培适宜区进行了合理的规划。既可以避免因为盲目引种造成的不必要的损失, 又可以兼顾到刺五加的产量及有效成分的含量, 对进一步开展刺五加原产地资源保护和野生抚育具有指导作用, 对解决目前刺五加药材资源匮乏和市场需求增加的矛盾具有重要意义。在本研究中所采用的 2 种生态位模型均是基于利用物种已知分布点所关联的环境变量去推算物种的生态需求。二者在模拟过程中, 均需要构建刺五加已知的分布采样地点的经纬表, 并与其他生态因子栅格数据共同计算来分析该物种的分布。GMPGIS 采用的是基于生态因子阈值的欧氏距离优化算法, 潜在分布区域的每一公里均在生态阈值范围内^[34]; MaxEnt 则采用以训练方式进行聚类算法^[35], 且在训练中由于受栅格精度和分布密度的影响, 尚有少量潜在分布地区并未包含在生态阈值范围内。故二者所分析得出的潜在适宜分布地区结果略有差异^[36-38]。但两种模型分析的主产区的总体引种趋势与适生区域基本一致, 共同分析得出的潜在分布区具有较高的可信性。但仍不能排除由于某些地区生态环境复杂, 导致两种软件的分析结果与实际存在偏差。在这种情况下, 可根据药用植物种类的实际分布情况与生态环境, 结合当地种质、资源、经济、人文等因素, 先进行试验种植, 再进行规模性引种。随着全球物种分布数据的共享和 GMPGIS 系统的不断改进, 以及 MaxEnt 生态阈值评估体系的进一步完善, 可为全球药用植物种植的合理规划与资源再生提供参考依据。在本研究中, 这两种系统的分析结果都未考虑影响刺五加分布的植物种内的遗传变异、种群平衡状态、本土地理分布范围及种群历史等方面的因素^[39]。因此, 在此后的研究中, 综合 GMPGIS 和 MaxEnt 分析结果, 将在分析所得的适生区进行实际的引种栽培实验, 与实际栽培经验相结合, 可进一步综合得出刺五加最适合的引种栽培区域。

References

- [1] Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China (中华人民共和国药典) [S]. 1977 ed. Beijing: People's Medical Publishing House, 1977: 336.
- [2] Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China (中华人民共和国药典) [S]. 2015 ed. Beijing: China Medical Science Press, 2015: 206-207.
- [3] Huang L, Chen WR, Lin L, et al. Discussion on development of endangered *Eleutherococcus senticosus* [J]. South Hortic (南方园艺), 2012, 23: 41-43.
- [4] Li T, Kelsey F, Yan ZQ. *Acanthopanax senticosus*: photochemistry and anticancer potential [J]. Am J Chin Med, 2016, 44: 1543-1558.
- [5] Cheng KM. The Study of Chemical Composition of *Acanthopanax senticosus* (刺五加化学成分的研究) [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2017: 1-2.
- [6] Fan RQ. Study the Preparation and Quality Standard of Total Saponin Tablets of *Acanthopanax senticosus* (刺五加总苷片的制备及其质量研究) [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2014: 10-12.
- [7] Kang YH, Wang ZQ. Estimate the quality of wild and cultivated Radix Caulis *Acanthopanax senticosi* leaves [J]. Heilongjiang Med J (黑龙江医药), 2005, 18: 400-402.
- [8] Xiang FY, Lun XB, Sun JX. Survey of medicinal herbs of Heilongjiang Xiaobeihu National Nature Reserve [J]. J Anhui Agric (安徽农业科学), 2017, 45: 7-9.
- [9] Zhang YQ, Song JL. Cultivation techniques of *Acanthopanax senticosus* [J]. Chin Wild Plant Resour (中国野生植物资源), 2004, 23: 57-58.
- [10] Zhu N, Zang RG. Population ecology of *Acanthopanax senticosus* I. Population structure [J]. Chin J Appl Ecol (应用生态学报), 1993, 4: 113-119.
- [11] Kriticos DJ, Webber BL, Leriche A, et al. CliMond: global high-resolution historical and future scenario climate surfaces for bioclimatic modeling [J]. Methods Ecol Evol, 2012, 3: 53-64.
- [12] Kearney MR, Isaac AP, Porter WP. Microclim: global estimates of hourly microclimate based on long-term monthly climate averages [J]. Sci Data, 2014, 1: 140006.
- [13] Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas [J]. Int J Climatol, 2005, 25: 1965-1978.
- [14] Delgado-Baquerizo M, Reich PB, Garcia-Palacios P, et al. Biogeographic bases for a shift in crop C: N: P stoichiometries

- during domestication [J]. *Ecol Lett*, 2016, 19: 564–575.
- [15] Meng XX, Huang LF, Chen SL, et al. Analysis of global ecology of *Panax notoginseng* in suitability and quality [J]. *Acta Pharm Sin* (药学报), 2016, 51: 1483–1493.
- [16] Zhang DF, Zhang Q, Guo J, et al. Research on the global ecological suitability and characteristics of regions with *Angelica sinensis* based on the MaxEnt model [J]. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2017, 37: 1–9.
- [17] Zhu GP, Qiao HJ. Effect of the MaxEnt model's complexity on the prediction of species potential distributions [J]. *Biodivers Sci* (生物多样性), 2016, 24: 1189–1196.
- [18] Zhang SZ, Li M, Zhang SB, et al. Factors affecting natural regeneration of *Larix principis-rupprechtii* plantations in Saihanba of Hebei [J]. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2015, 35: 5404–5411.
- [19] Huang LF, Li WT, Wang Z, et al. Correlative study between chemical constituents and ecological factors of *Notopterygii Rhizoma Et Radix* of endangered plateau plant [J]. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2013, 33: 7668–7677.
- [20] Guo J, Liu XP, Zhang Q, et al. Prediction for the potential distribution area of *Codonopsis pilosula* at global scale based on MaxEnt model [J]. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2017, 28: 992–1005.
- [21] Wang P. Study on Quality Value of Radix *Acanthopanaxenticosii*-Effective Constituent and Content Assay (刺五加质量评价研究-有效成分及含量测定) [D]. Harbin: Heilongjiang University of Chinese Medicine, 2001: 22–28.
- [22] Yu DM. Research the Impact Factors on the Quality of *Acanthopanaxenticosii* (影响刺五加质量因素的研究) [D]. Harbin: Heilongjiang University of Chinese Medicine, 2011: 29–32.
- [23] Zhang J, Liu FF, Chen YC. Progress in the research of chemical constituents and biological activities in *Acanthopanaxenticosii* plants. [J]. *Chin Wild Plant Resour* (中国野生植物资源), 2008, 27: 6–10.
- [24] Shen L, Meng XX, Huang LF. Research strategy on global eco-suitability regionalization for medicinal plants [J]. *World Chin Med* (世界中医药), 2017, 12: 961–973.
- [25] Meng XC, Sun CZ, Chen SL. Study on suitability regionalization producing area of vulnerable species *Acanthopanaxenticosii* based on TCMGIS [J]. *J Med Mater* (中药材), 2009, 32: 1195–1198.
- [26] Chen SL. Chinese Medicinal Herbs Origin Ecological Suitability Numerical Divisions (Second Edition) (中国中药材产地生态适宜性数值区划) [M]. Beijing: Sciences Press, 2017: 1–8.
- [27] Shen L, Wu J, Chen SL, et al. A study of global ecological adaptability and field selection practices of *Panax ginseng* [J]. *China J Chin Mater Med* (中国中药杂志), 2016, 41: 3314–3322.
- [28] Chen XW. Study on the Growth and Forest Edge Distribution of *Eleutherococcus senticosus* and *Aralia elata* in Eastern Liaoning (辽东地区刺五加和辽东楸木生长状况与林缘分布研究) [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016: 3–5.
- [29] Du D. Interspecific Association of Dominant Species and Influence of Environment Factors in *Acanthopanaxenticosii* Communities in Beijing (北京地区刺五加群落间关联及环境因子影响分析) [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016: 1–6.
- [30] Li CY, Ai J, Lei XJ, et al. Research progress on relationship between living area and drug composition content of *Acanthopanaxenticosii* (Rupr. EtMaxim) Harms [J]. *North Hort* (北方园艺), 2009, (12): 140–142.
- [31] Cheng HT, Liu DJ, Luo ZW, et al. Study on the relevance between ecological factor and *Acanthopanaxenticosii* [J]. *Heilongjiang Med Pharm* (黑龙江医药科学), 2012, 35: 8–9.
- [32] Zhang LM, Zen SM, Ji JJ, et al. Characters of regional temperature in east Asia during global warming period [J]. *Acta Geogr Sin* (地理学报), 1996, 51: 518–527.
- [33] Liu ZY, Wang SP, Zhang WQ, et al. Preliminary study on the effects of different habitats on *Acanthopanaxenticosii* [J]. *Jilin J Tradit Chin Med* (吉林中医药), 2013, 33: 391–392.
- [34] Shen L, Meng XX, Huang LF, et al. Research strategy on global eco-suitability regionalization for medicinal plants [J]. *World Chin Med* (世界中医药), 2017, 12: 961–968.
- [35] Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. *Ecol Model*, 2006, 190: 231–259.
- [36] Warren DL, Seifert SN. Ecological niche modeling in MaxEnt: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria [J]. *Ecol Appl*, 2011, 21: 335–342.
- [37] Warren DL, Wright AN, Seifert SN, et al. Incorporating model complexity and spatial sampling bias into ecological niche models of climate change risks faced by 90 California vertebrate species of concern [J]. *Divers Distrib*, 2014, 20: 334–343.
- [38] Herkta KMB, Barnikel G, Skidmore AK, et al. A high-resolution model of bat diversity and endemism for continental Africa [J]. *Ecol Model*, 2016, 320: 9–28.
- [39] Zhu GP, Liu Q, Gao YB. Improving ecological niche model transferability to predict the potential distribution of invasive exotic species [J]. *Biodiv Sci* (生物多样性), 2014, 22: 223–230.