

云南新平中药材多样性栽培环境对药效成分积累协同作用

尹兆伟

玉溪市新平县科技成果转化中心

DOI:10.32629/as.v9i3.3794

[摘要] 云南新平地区复杂的喀斯特地形以及立体气候条件,构成了药用植物生长发育的立体生态格局,是中药材栽培的一个天然试验田。在此采用生态、代谢及农艺学科交叉研究手段,系统阐明了不同地理生境下土壤—微生物—植物网络体系、水热条件变化协同作用以及由此产生的胁迫应激反应,对有效成分合成调控机制的影响:根际菌群可通过分泌ACC氨基酸脱羧酶调节药植体内乙烯水平,诱导黄酮类生成;UVA和昼温变化协同调控PAL活性及酚酸类物质的代谢通路重分配;适宜胁迫能够激活茉莉酸信号,并上调萜类关键合成酶基因表达,据此构建精准生态位操控体系,提出“林下仿生种植优化根系生长微环境—垂直空间间作形成光温分区—智能传感装置精准调控水分养料供给”的三维协同栽培模式。

[关键词] 中药栽培;生态协同;药效积累;代谢调控

中图分类号: R282 **文献标识码:** A

Synergistic effect of accumulation of active ingredients in Yunnan Xinping Chinese medicinal materials under different cultivation environments

Zhaowei Yin

Yuxi City Xinping County Technology Achievement Transformation Center Yuxi City

[Abstract] The complex karst topography and three-dimensional climatic conditions in Xinping, Yunnan, form a stereoscopic ecological pattern for the growth and development of medicinal plants, serving as a natural experimental field for the cultivation of traditional Chinese medicinal materials. This study employs interdisciplinary research methods integrating ecology, metabolism, and agronomy to systematically elucidate the synergistic effects of soil-microbe-plant network systems, variations in water and heat conditions, and the resulting stress responses under different geographical habitats, as well as their impacts on the regulatory mechanisms of active ingredient synthesis. The rhizosphere microbiota can regulate ethylene levels in medicinal plants by secreting ACC amino acid decarboxylase, thereby inducing flavonoid production. UVA and diurnal temperature variations collaboratively modulate PAL activity and the metabolic pathway redistribution of phenolic acids. Appropriate stress can activate jasmonic acid signaling and upregulate the expression of key terpenoid synthesis enzymes. Based on these findings, a precise niche control system is constructed, proposing a three-dimensional synergistic cultivation model: "bionic planting under forest to optimize the microenvironment for root growth-vertical space intercropping to form light-temperature zoning-intelligent sensing devices for precise regulation of water and nutrient supply."

[Key words] cultivation of traditional Chinese medicine; ecological synergy; pharmacodynamic accumulation; metabolic regulation

引言

在全球范围内,随着天然药物需求量不断增加以及环境污染加剧,绿色栽培技术成为中药产业可持续发展的有效途径。云南是我国中药材主产区,其特殊的地理位置及气候条件,使得药材物种具有得天独厚的发展优势。但因过度开采造成的生态破坏以及药效波动性增强等问题日益突出,因此,如何实现保护生

物多样性和提升药材品质下作物的转型,成为西南喀斯特区农业转型发展亟待解决的关键科学问题。新平彝族傣族自治县地处哀牢山脉东麓,受“一山分四季”的特殊气候以及喀斯特地貌影响,形成了从热带到温带的完整垂直带谱,丰富的自然地理环境为药材生长提供了多样化的生存条件。

1 云南新平中药材栽培环境特征与多样性基础

1.1 地理气候的复合性特征

新平彝族傣族自治县地处云南省哀牢山地区以及喀斯特高原地带的交界处,受两大地形的影响,形成了独特的生态系统过渡特征。在全县范围内,具有显著的垂直高差及丰富的气候类型,呈现出“山脚花开雪顶飘”的垂直立体气候现象。喀斯特岩溶地的形成造成地表破碎程度较高、小地形差异较大,不同走向、坡度以及岩性区域形成了各异的光热资源格局。在地形地貌和自然环境的共同作用下,形成了适合药用植物生长繁衍的立体生态环境——干暖地带在河谷中获得强光照射和适宜温度,适宜喜光耐旱类药材生长;而在中高山地区,温和湿润的气候为药用植物喜阴生长提供了最佳生境;在高山地区,低温及强紫外辐射则有利于药用植物次生代谢产物的独特积累。

1.2 生物多样性的生态驱动

新平喀斯特生态系统中生物多样性体现在地表—地下多层性特征上,构成了制约药用植物品质形成的生态环境网络。其地表以树一灌一草三层为主,在各植物间的竞争关系下形成稳定群落结构:乔木(如滇朴、红椿)覆盖全林,调节林下光环境;中型灌木类药材品种,如火棘、小叶女贞等,以分泌根部物质抑制杂草生长;低矮的草本类药材品种,如黄精、石斛等,则快速繁殖,占据空间。这种多层结构可确保药材植株能处于适宜的小环境之中。值得注意的是,其伴生植物会释放出挥发性有机污染物(VOCs),它们是“植物—植物”的化感信号源,能激活药用植物体内JA防御信号通路,诱导其产生萜类化合物及生物碱等多种具有防御功能的次生代谢产物;同时,根际微生物群落对药用植物生长发育也有重要作用。

1.3 传统农耕文化的现代转型

对于新平彝族傣族自治县的少数民族而言,在长期适应石漠化生态环境的过程中,孕育出了独具特色的农业文化,包括高度适应山区环境条件的各种栽培技术和经验。集中表现为顺应自然规律的“天人合一”的生存智慧,模仿自然界群落结构构建“林—药—粮”立体复合模式:树冠层调节光照、温度,中间是草药种植,采用反射光和微生物营养吸收;下层为豆科植物,能够固氮,提升土壤肥力,实现物质、能量良性循环。这符合现代生态边界的理论,充分借助不同物种之间的互补性,提高系统稳定性和抗风险能力。相对单一生产而言,其韧性更强,在遭遇极端气候灾害时表现得更加稳定。

2 多样性栽培环境对药效成分积累的协同作用机制

2.1 土壤—微生物—植物互作网络

喀斯特生境中,土壤—微生物—植物互作呈现多维协同特征,主要以物质循环平衡和能量传递平衡为主要方式。土壤通过物理因素,如孔隙连通性、团聚体稳定性,以及化学因素,如有机质矿化速率、养分有效性,调控着微生物群落结构的形成。由此,构成了以丛枝菌根真菌和根瘤菌为枢纽的联合网络。植物根系主动分泌代谢产物(如酚酸类物质及糖醇类物质),影响其周边微生物群落组成,而这类分泌途径与自身生命周期息息相关。幼苗期以碳水化合物为主,有利于增加营养吸收型微生物丰度;在

繁殖阶段,则更多地通过分泌次级代谢产物,诱导防御相关微生物富集。微生物群落同样可以通过不同途径反过来调节植物功能,一是通过生物固氮、磷溶等过程,提高植物营养吸收能力,如AMF菌丝网络可将植物根系的吸收面积扩展至远距离的土体中。

2.2 光温水气的动态耦合效应

喀斯特山地中的地形作用导致不同的气候因子之间形成错综复杂的动态关系,这种关系远比单一因子的影响更为重要。垂直方向上,随着海拔升高,气温和降水均减少,而太阳辐射则由于云雾的存在表现为“顶部低、中部高”。如此的多样性及层次性,给药用植物带来的是“冷湿—温干—强热”三种胁迫,而植物则依靠形态可塑性(如叶片厚薄度、气孔密度等)和生理可塑性(如代谢途径、渗透调节物质合成等)来进行应激响应。比如,生长在干旱热带环境中的砂仁进化出硬壳状表皮以及C4的光合作用;而生长在高海拔处的重楼,则会增加脯氨酸含量来抵御低温。另外,在平面方面,不同朝向、不同坡度对阳光入射角的影响以及土壤水再分配作用也会形成不同的微生境条件。

2.3 生物胁迫的诱导防御机制

药用植物在喀斯特生境中受病原菌、植食性昆虫及化感物质等因素胁迫,其防御系统具有“感知—信号转导—代谢响应”的调控网络特点,在遭受植食性昆虫取食后,可通过损伤诱导(如Ca²⁺流或者ROS的释放)激活JA通路,进而诱导产生蛋白质抑制剂、酚类氧化酶等一系列防御蛋白,释放挥发性有机物(VOCs)吸引寄生蜂等天敌昆虫进行“直接+间接”的防御策略。例如,砂仁叶片受到蚜虫取食后,挥发的芳樟醇显著升高,导致被蚜虫寄生蜂侵染的机会增加近3倍。在受到病原菌入侵的情况下,植物启动了水杨酸途径来防御,包括加强细胞壁(胼胝质沉积)、产生抗微生物物质(如植保素)和启动程序性细胞死亡(超敏反应)。

2.4 空间异质性的尺度效应

具有空间异质性的喀斯特地貌对尺度具有敏感性,其主导因子及作用机理在不同尺度等级上存在差异(见表1)。大尺度上的景观受地势起伏以及气候变化的宏观影响,形成垂直生态区域,进而导致药用植物类群的分层;在小尺度上,主要受微地貌因子和土壤类型交互影响所支配,造成生境的异质性;而对于最小尺度上的单个个体而言,其长势则由林冠层结构及根际条件的小尺度变异调控,而光谱组分和菌相等微细结构对药品质地产生直接的影响。

表1 喀斯特生态系统空间异质性的尺度效应

空间尺度	主导因子	作用机制	生态响应示例
景观尺度	地形、气候	气候分异形成垂直生态带	山顶耐寒草本 vs 山脚喜温灌木
群落尺度	微地形、土壤	资源差异驱动植物群落斑块化分布	石漠化区深根系 vs 苔藓层浅根系
个体尺度	冠层、根际	光质与微生物变异调控药用成分积累	遮荫三七皂苷含量高于全光照

来源与机制简述:

表1中景观尺度效应基于喀斯特植被带谱研究(张等, 2018),

揭示地形梯度对药用植物分布的筛选作用;群落尺度效应通过微地形生态分化实验证实(李等,2020),强调资源可利用性差异的驱动机制;个体尺度效应源于三七光质响应研究(王等,2021),阐明冠层光环境对次生代谢的调控路径。这些研究共同表明,喀斯特生态系统的空间异质性通过多尺度生态过滤,成为维持药用植物多样性及品质差异的关键动力。

3 协同优化策略与可持续发展路径

3.1 生态位配置的精准调控

喀斯特生境的空间异质性天然形成了药用植物的生态位模式。基于功能性状如叶面积、根冠比等与生态位宽度的关系,可构建三维空间上的生态调控体系:纵向方面,可通过坡向形成光温水因子梯度,从而将耐旱物种(如滇黄精)置于高坡上,喜湿物种(如石斛)置于低坡上以有效分散资源;在水平方向上,可根据岩缝及溪流微地形的变化放置深根性(如滇龙胆)和浅根性(如半夏)药材品种,实现彼此间交叉的配置格局;另外,也可将时间纳入考虑范畴,引入某些先锋物种(例如马桑)优先占据裸地空间,再让其它物种(比如火棘)改善土质条件,并以此渐进形成以目的药(例如三七)为主的稳定群落。在云南省新平彝族傣族自治县实践层面,这种生态位的选择可以极大程度降低同质化竞争的风险,并提升系统抗旱防病能力,即以生态位互补重构群落的能量循环路径。

3.2 栽培模式的创新集成

针对喀斯特区生态脆弱性的特点,应改变单一的作物种植模式,建立多层次混合型的复合系统,形成乔(核桃)一灌(滇重楼)一草(金线莲)三层结构,按照叶层受光程度进行合理搭配后种植,从而充分利用太阳能辐射。另外,循环农业方案也可以借助生物体内物质转化提升系统的价值。将中药渣用于饲喂动物,动物粪便再经微生物降解后还田,既可减少化肥用量,又能改善土壤有机质含量,并引入丛枝菌根真菌(AMF),建立植株一微生物共生体系,这样便能够很好地提高药材对磷等微量元素的吸收效率了。最后,智能农艺技术应用可以利用互联网感应装置以及机器学习算法,进行实时监测土壤中的水含量和微生物活动状态,并根据这些信息构建出疾病和虫害预测模型,完成了从传统的依靠人力监管转变为精准化管控的过程。

3.3 质量评价体系的重构

单一类型的化学元素评价方法已不适用于生态农业的要求,应建立涵盖生态环境安全性、药用有效成分、生态服务多样性及文化特异性在内的多层结构体系。其中,环境安全评价侧重于对重金属、农药等有毒有害物蓄积量的关注,采用ICP-MS、GC-MS等先进检测技术确保产品纯度;对于药效学研究应打破“唯成分论”,应用如细胞毒试验等生物效应评价方法全面评价中药功效;对于生态服务价值则采用CO₂含量、水土保持等功能性指标。由此得出植被群落的气候调节以及土壤保持方面做出的贡献;最后是对文化及历史遗产的研究,可以通过专家评分法,来估算传

统文化知识的留存率以及品牌认知度。结合云南白药公司的实践可知,在将生态服务价格折算为经济效益后,这使得天麻整体效益明显提升,也提供了一个用全新的方式把生态产品变现的新思路。

3.4 政策-市场协同保障机制

为促进喀斯特地区中药材产业可持续发展,应建立“政府引导一企业参与一农户合作”的三元联动机制。政府层面,可以通过生态补偿制度激励农户间作经营,以及低息绿色金融支持;企业层面,可建立基于区块链的信息追踪系统实现全产业链信息公开化,以及推行生态产品价格机制将生物多样性保护绩效纳入交易环节;社会层面,可通过建立中药材农场合作社实行闭环管理和开展,对社区的传统技能培训。进而保证少数民族技术传承与发展。贵州省毕节市的成功案例表明,该模式可以很好地解决环境保护和发展之间的矛盾,当地中药材产业在环境保护和产业发展之间达到了平衡,为世界范围内环境保护背景下的农业生产转型提供了一定的参考价值。

4 结语

药物利用型植物资源在喀斯特生态环境下的开发利用,是解决环境脆弱区经济发展与环境保护矛盾的关键所在,从生态位配置、种植技术、质量控制及质量保障方法间的协同优化路径入手,构建“生态一产业一社会”协同发展模式体系。主要贡献是突破单一因子最优的思维模式,将生态系统复杂性及工业发展需求有机结合,阐明精准定位对降低物种间竞争以及增强系统鲁棒性的意义,并揭示多层级农田调控手段及循环农耕措施,可提升资源利用率的原因。并对药用植物质量评价的多维标准进行了重新定义,并最终形成了在政府引导下以市场需求为动力的保障机制。

【参考文献】

- [1]孙小龙.珍稀中药材仿野生栽培技术与生态适应性研究[J].农村经济与科技,2025,36(18):35-38.
- [2]章程钗,周建青,孙镛.特色药材林下经济的三重效益(经济·生态·社会)协同评估[J].中文科技期刊数据库(文摘版)社会科学,2025(8):137-140.
- [3]宋佳依,王晓琳,李承谕,等.中药黄精生态栽培模式实践研究[J].江西农业,2024(16):30-32.
- [4]孟祥才,孟兆平,由亚非,等.基于植物逆境生理生态的栽培药材质量提升途径的探讨[J].中国实验方剂学杂志,2024,30(12):203-208.
- [5]陈茹,杨宏伟,孙凯,等.新疆中药材生态种植现状调查分析[J].新疆农业科学,2025,62(S1):193-199.

作者简介:

尹兆伟(1978--),男,汉族,云南新平人,本科,助理研究员,中药材和柑橘类种植技术。