

从生态互作到加工炮制多维度解析黄芪质量的道地性成因与调控

何雯杰¹, 方飞¹, 毛焕云³, 林谅⁴, 张先平², 梁宗锁^{1*}

1. 浙江理工大学生命科学与医药学院, 浙江 杭州 310018

2. 太原学院, 山西 太原 030032

3. 定西中医药科技中等专业学校, 甘肃 定西 748199

4. 甘肃数字本草检验中心有限公司, 甘肃 定西 748100

摘要: 黄芪 *Astragali Radix* 作为传统补气药, 其质量受产区生态、栽培技术和加工工艺影响显著。不同产区黄芪在外观、化学成分及生物活性上差异明显: 山西浑源以毛蕊异黄酮葡萄糖苷丰富为特征, 甘肃陇西黄芪甲苷含量高, 内蒙古则富含异黄酮类化合物。差异源于生态因子与遗传背景的深度耦合, 伴生植物及次生代谢调控网络为关键机制。栽培模式影响显著, 仿野生栽培可接近野生品质; 合理密度、水肥管理及菌根接种可提升有效成分含量。采收和加工环节同样重要, 秋季采收、60 °C 热风干燥及蜜炙炮制可最大化保留活性成分并增强免疫活性。此外, 有学者分析黄芪加工中成分变化, 确立黄芪甲苷和毛蕊异黄酮作为质量标志物, 并建立从原料到产品的质量控制系统。《中国药典》2025 年版标准侧重单一成分, 难以全面反映“成分簇”协同效应, 产区扩张加剧质量波动, 连作障碍引发土壤微生物生态失衡。未来应结合多组学与智能化分析, 建立基于功效物质的动态质量评价体系, 并通过“土壤-气候-品种”匹配模型优化非道地产区种植, 推动黄芪产业高质量发展。

关键词: 黄芪药材; 道地性; 不同产区; 生态种植; 加工炮制

中图分类号: R282 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2026)09-3670-15

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.09.034

Ecological interactions and processing methods: A multidimensional analysis of authenticity and regulation of *Astragalus membranaceus* quality

HE Wenjie¹, FANG Fei¹, MAO Huanyun³, LIN Liang⁴, ZHANG Xianping², LIANG Zongsuo¹

1. College of Life Sciences and Medicine, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China

2. Taiyuan University, Taiyuan 030032, China

3. Dingxi Secondary Vocational School of Traditional Chinese Medicine and Pharmaceutical Technology, Dingxi 748199, China

4. Gansu Digital Materia Medica Testing Center Co., Ltd., Dingxi 748100, China

Abstract: *Astragalus membranaceus*, a traditional *qi*-tonifying herb, exhibits quality that is strongly influenced by ecological factors of the production region, cultivation practices, and processing techniques. Significant differences in morphology, chemical composition, and bioactivity are observed among different production areas: *A. membranaceus* from Hunyuan, Shanxi is characterized by high levels of calycosin-7-*O*- β -*D*-glucoside, that from Longxi, Gansu is enriched in astragaloside, while samples from Inner Mongolia contain higher concentrations of isoflavonoids. These variations arise from the intricate coupling between ecological factors (such as soil elemental composition, climate, and microbial communities) and genetic background, with associated plants and secondary metabolite regulatory networks serving as key mechanisms. Cultivation patterns exert considerable influence, as wild-simulated cultivation can approximate wild-type quality; appropriate planting density, water and nutrient management, and arbuscular mycorrhizal inoculation effectively enhance the accumulation of bioactive constituents. Harvesting and processing are equally critical: autumn harvest, hot air drying at 60 °C, and honey-frying processing maximize retention of active compounds and improve immunomodulatory activity. Additionally, previous studies have examined chemical changes during processing and identified astragaloside and calycosin-7-*O*- β -*D*-glucoside as marker compounds, establishing quality control strategies from raw materials to

收稿日期: 2026-02-02

基金项目: 国家重点研发计划—中医药现代化 (2024YFC3506403)

作者简介: 何雯杰, 硕士研究生, 研究方向为植物次生代谢调控。E-mail: 1070326152@qq.com

*通信作者: 梁宗锁, 教授, 博士生导师, 从事药用植物次生代谢研究。E-mail: liangzs@ms.iswc.ac.cn

final products. The 2025 edition of the *Chinese Pharmacopoeia*, which focus on single constituents, are insufficient to fully reflect the synergistic effects of constituent clusters. Expansion of cultivation areas exacerbates quality variability, and continuous cropping can disrupt soil microbial ecology. Future approaches should integrate multi-omics analyses and intelligent monitoring to develop a dynamic quality evaluation system based on bioactive constituents, and employ “soil-climate-genotype” matching models to optimize cultivation in non-authentic production regions, thereby promoting high-quality development of the *A. membranaceus* industry.

Key words: *Astragali Radix*; authenticity; different production regions; ecological cultivation; processing methods

黄芪 *Astragali Radix* 是我国常用的一种中药材，是豆科黄芪属蒙古黄芪 *Astragalus membranaceus* Bunge var. *mongholicus* (Bunge) Hsiao 或膜荚黄芪 *A. membranaceus* (Fisch.) Bunge 的干燥根，作为“补药之长”，黄芪是我国传统中药材中应用最广泛的品种之一，并且黄芪于 2023 年进入食药物质目录，这对黄芪生产与使用是一个极大的促进。传统中医学认为黄芪具有补气升阳、固表止汗、利水消肿、生津养血、行滞通痹、托毒排脓、敛疮生肌的功效。可用于气虚乏力、食少便溏、中气下陷、久泻脱肛、便血崩漏、表虚自汗、气虚水肿、内热消渴、血虚萎黄、半身不遂、痹痛麻木、痈疽难溃、久溃不敛^[1]。现代药理学研究证实其具有增强免疫力、抗疲劳、抗病毒等多重功效^[2]，在新冠肺炎等重大疫病防治中亦展现出独特价值^[3]。值得注意的是，有学者通过结合网络药理学、色谱指纹图谱和多成分定量分析，系统地评估了黄芪的质量。研究表明，黄芪通过多种靶点和通路发挥协同药理作用，并最终确定了 4 个主要成分，分别是毛蕊异黄酮葡萄糖苷、毛蕊异黄酮、芒柄花苷、芒柄花素作为黄芪的质量标志物，为黄芪的质量控制提供了可靠的方法^[4]。然而，随着科技的进步和人们对药物安全性的日益关注，中药的质量控制也成为当下公众关注的热点问题^[5]。中药质量控制涉及原材料、生产工艺、质量标准、监管等多个环节^[6]，使用到的技术主要有显微鉴定技术、DNA 分子遗传标记技术、电泳技术、仿生、光谱、色谱以及联用技术，通过持续的技术创新和规范化建设，中药质量控制技术将为中药产业的健康发展和人民健康提供更好的服务^[7]。除此之外，中药指纹图谱能够揭示中药材的化学成分信息和特征信息，实现对中药材真伪、优劣的精准鉴别和质量控制，确保中药材的安全性和有效性^[8]，而一测多评法 (quantitative analysis of multi-components by single marker, QAMS) 和质量标志物 (quality marker, Q-marker) 也在中药质量控制中发挥着越来越重要的

作用^[9]，但现有研究多集中在传统的静态质量检验方法上，难以满足现代中药产业高质量发展的需求，基于此，肖伟院士提出了基于功效物质的智能化控制理念，为中药生产过程的质量控制提供了新的思路和方法^[10]。

尽管现代质量控制技术为黄芪品质标准化提供了有力工具，但回归药材本源，其质量优劣始终与道地性这一传统认知紧密交织。中药材的道地性集合了本草考证、药材性状、有效成分及药效成分，生态环境、遗传基因、栽培、采收以及加工技术等方面的影响因素^[11]。道地药材具有明显的地域性，即在特定的地理区域内生长和栽培的药材，这些区域的环境条件（如气候、土壤、水源等）对药材的品质有显著影响，这些地区的药材因其高品质和稳定的药效而被广泛认可和使用^[12]。随着道地产区生态变迁和种植区域扩大化，不同产区黄芪质量参差不齐的问题日益凸显。《中国药典》2025 年版虽已建立黄芪甲苷、毛蕊异黄酮葡萄糖苷等指标成分的质量标准^[1]，但药材道地性与环境互作机制仍不明确，导致临床用药存在同药不同效现象。

近年研究显示，山西浑源等传统道地产区的黄芪中活性成分含量普遍高于新兴产区。如山西产黄芪的毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量普遍较高，而甘肃产黄芪甲苷含量较高^[13]，而部分引种产区则偏低，这种差异或与道地产区特有的土壤元素丰度及长期适生驯化形成的遗传稳定性密切相关，这种差异不仅体现在化学成分层面，在显微特征^[14]、DNA 条形码^[15]、指纹图谱^[16]等鉴别指标上也具有显著区分度，更值得关注的是，同一产区不同种植模式下（如仿野生栽培与常规种植）的药材质量也具有差异^[17-18]，这提示了栽培方式的关键作用以及成分的可变性。

不同产区黄芪质量差异的物质基础及其形成机制尚不明确。当前研究多聚焦单一产区或个别成分的分析，缺乏多产区系统性比较研究。影响因素的探讨往往割裂环境因子与人为干预的关联性，对

土壤微生物组、次生代谢调控网络等深层机制研究不足。从大量文献中聚焦于不同地理区域所产黄芪在活性成分、显微特征、DNA 条形码、指纹图谱等指标上的差异，当前对黄芪质量差异的认识不足，主要源于对其成因中环境因素、遗传背景及栽培模式等关键因子的综合作用缺乏系统总结；这些因子通过调控次生代谢途径、土壤微生物群落及基因表达网络等生态互作过程影响药材品质，但该机制尚未被充分揭示。本文对此进行系统分析，最终阐明形成质量差异的互作机制，以期对黄芪道地性的形成机制与质量控制提供理论依据与技术突破。

1 不同产区黄芪质量表征差异

目前对不同产区黄芪的研究主要围绕外观特性，比如根形、色泽、质地；化学成分含量的差异，比如多糖、皂苷类和黄酮类物质；以及这些成分的活性差异，抗氧化、抗炎及免疫调节等能力，不同产区的黄芪在外观特性、化学成分含量及活性方面均表现出显著差异。这些差异不仅影响黄芪的药用价值，还可能成为产地溯源和品质评价的重要依据。有学者通过多维度评价方法，系统地表征了不同生长模式和年份黄芪的质量，发现仿野生黄芪和野生黄芪质量相似，而栽培黄芪与其存在显著差异。建议使用仿野生黄芪作为野生黄芪的替代品，并在种植6~8年时收获以提高质量和经济效益^[19]。分别从外观、成分及其活性2方面详细探讨不同产区黄芪的具体区别及其影响因素。

1.1 外观性状特征

黄芪的外观性状主要表现为根形、色泽与质地等，不同产区间存在一定差异，其形成受品种遗传背景以及土壤环境、气候条件和栽培方式的共同影响。作为质量评价中最直观的表型特征，外观性状在一定程度上反映了黄芪生长过程中的生态适应与物质积累特征。已有研究表明，不同产区和栽培方式的黄芪在根系形态与内部结构上存在明显差异：甘肃和内蒙古多采用育苗移栽，黄芪根部分支较多，而山西、陕西多采用直播方式，根形较直、分支较少；浑源和子洲黄芪断面“金井玉栏”“菊花心”等传统特征较为明显，甘肃黄芪质地相对紧实^[19]；仿野生黄芪因生长环境复杂，常表现为表皮粗糙、断面疏松、木心发黄甚至空洞，而常规栽培黄芪则外观较为规整、质地致密^[20]；在显微层面，叶飞等^[21]对宁夏和山西产黄芪的横截面进行综合分析发现，两者在显微结构上差异

不显著，表明单一外观或解剖指标难以实现跨产区的稳定区分。王振恒发现甘肃产黄芪的木质部宽度、木栓层宽度、木射线数等解剖学特征与其活性成分含量显著相关^[14]，这提示外观性状可能通过组织结构影响物质积累。

黄芪外观性状是遗传基础与生态环境共同作用的综合表型。尽管已有研究关注不同生产模式和生长年限对性状形成的影响，并开始从代谢调控角度探讨其机制^[22]，但外观特征、组织结构与次生代谢产物积累之间尚未建立清晰的定量关联。黄芪的外观性状差异是生态条件与栽培模式长期作用形成的综合表型，在一定程度上可用于产区与栽培方式的经验性判别。然而，现有研究多停留在描述层面，“金井玉栏”“菊花心”等传统特征尚未与解剖结构参数和活性成分含量建立定量关联，制约其在现代质量评价中的应用。未来需要在多产区尺度上整合植物解剖学、代谢组学与分子生物学方法，构建“形态特征-显微结构-活性成分”关联模型，为黄芪质量评价与规范化生产提供科学依据。

1.2 不同产区黄芪化学成分差异

黄芪的主要活性成分包含多糖、皂苷类和黄酮类，这些活性成分都是在体内能够发挥药效的关键物质，如黄芪多糖可通过调节肠道微生物群恢复短链脂肪酸（short-chain fatty acids, SCFAs）生成，缓解硫酸葡聚糖钠诱导的小鼠溃疡性结肠炎^[23]，并可通过激活 Sirt1/FoxO1 通路在高糖状态下改善糖尿病肾病^[24]，黄芪甲苷作为代表性成分，可调控 PTEN/AKT 信号促进神经元存活^[25]，可通过影响亚油酸、鞘脂及甘油磷脂代谢缓解酒精性肝损伤^[26]，并通过改善线粒体功能与抑制铁死亡发挥肾脏保护作用^[27]，同时抑制脂肪酸转运蛋白 2（fatty acid transport protein 2, FATP2）介导的脂肪酸转运以减轻肾小管损伤^[28]，亦可抑制炎症介质产生缓解血管紧张素II诱导的炎症反应^[29]。

黄芪总黄酮在抗炎、抗氧化及代谢保护方面同样发挥重要作用，如抑制泡沫细胞形成从而改善动脉粥样硬化进程^[30]，毛蕊异黄酮葡萄糖苷通过调控去乙酰化酶（sirtuin 1, SIRT1）、过氧化物酶体增殖物激活受体 γ 共激活因子 1 α （peroxisome proliferator-activated receptor gamma coactivator 1-alpha, PGC-1 α ）和 AMP 活化蛋白激酶（AMP-activated protein Kinase, AMPK）通路表现出明确的神经保护和抗脂肪沉积功能^[31-32]，芒柄花素则可通过抑制磷脂酰肌

醇 3-激酶/蛋白激酶 B (phosphoinositide 3-kinase/protein kinase B, PI3K/AKT) 通路改善慢性肾衰竭相关炎症反应^[33]。

尽管这些药理学研究为理解黄芪活性物质奠定了坚实基础, 本文重点讨论上述成分在不同产区间的含量差异及其形成机制。《中国药典》2025 年版将黄芪甲苷和毛蕊异黄酮葡萄糖苷列为质量评价的重要指标, 而这些成分在不同产区之间存在显著差异。研究表明, 山西黄芪中毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量最高, 而黑龙江地区的最低^[34-35], 内蒙古产区的总皂苷含量整体偏高^[36], 在甘肃省内部, 不同地区之间亦存在差异, 其中宕昌产区的总皂苷含量最高^[37], 此外, 栽培方式同样影响成分积累: 传统栽培黄芪中毛蕊异黄酮葡萄糖苷、芒柄花苷和黄芪皂苷III含量高于移栽黄芪, 而后者中黄芪皂苷I含量更高, 总黄酮含量亦以传统栽培为优^[38], 值得注意的是, 山西和甘肃部分地区黄芪有效成分含量较高, 但对应重金属含量也普遍较高^[13], 但山西产黄芪的芒柄花苷含量相对较低^[39], 这表明生态压力可能会诱导特定的次生代谢途径增强, 从而呈现“药效成分提高-资源安全性下降”并存的现象, 这为产地选择和加工监管提供了新的思考维度。功能评价方面, 不同产区的总黄酮在清除羟自由基、超氧阴离子、过氧化氢和 2,2-二苯基-1-苦基肼基 (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl, DPPH) 自由基的能力不同, 其中对羟自由基的清除

能力普遍较弱^[40], 其差异来源于黄酮和皂苷中酚羟基结构的变化, 而这一结构差异又受产地环境影响^[41]; 3 波长融合指纹图谱结合电化学指纹特征的系统研究进一步表明, 野生与栽培黄芪在化学成分和抗氧化活性上具有显著差异, 可作为质量综合评价的重要工具^[42], 液相色谱-质谱连用 (liquid chromatography-mass spectrometry, LC-MS) 化学指纹与 DNA 条形码亦已被证明可用于不同产地黄芪的质量控制与溯源^[43], 综上所述, 黄芪的主要产区包括山西、甘肃和内蒙古, 此外黄芪在陕西、新疆和宁夏也有大量产出。不同产区的黄芪在多个维度上存在显著质量差异, 包括外观性状、化学成分及其活性。外观性状差异主要体现在根形、色泽和质地; 化学成分差异表现为多糖、皂苷和黄酮等成分的含量及比例不同; 成分活性差异则反映在部分成分的抗氧化和抗炎等药理效应上。不同产区黄芪的成分差异是遗传基础、生态环境与栽培方式的综合结果: 一是遗传背景差异决定了关键代谢通路的潜在表达能力; 二是生态与土壤因子 (温湿度、逆境强度、矿物元素组成等) 调控黄酮、皂苷等代谢通路的的方向与强度; 三是栽培方式及根际环境影响根系结构与代谢分布。这些因素通过调控次生代谢网络最终构成产区特异性的化学成分格局, 为黄芪产区质量评价和资源甄别提供了科学依据。黄芪多维度质量差异示意图见图 1。

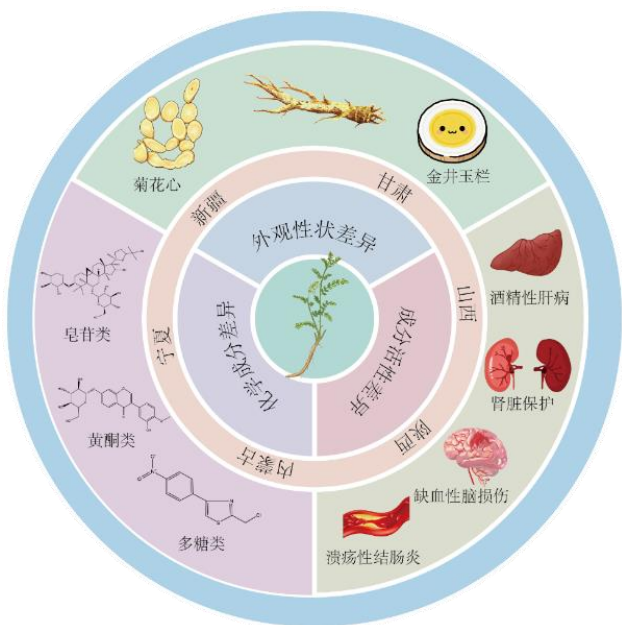


图 1 黄芪多维度质量差异

Fig. 1 Multidimensional quality differences of *A. membranaceus*

现有研究虽已揭示黄芪主要化学成分分布特征与药理作用,但对不同产区黄芪质量差异的物质基础仍缺乏系统概括。综合当前研究成果,产区差异主要由以下3类机制共同调控:第一,种质资源与遗传背景差异奠定了代谢潜能基础。不同产区常采用来源不一的黄芪种质,其基因型差异将直接影响黄酮类、皂苷类、多糖等关键次生代谢途径的调控,从而使不同地区黄芪在固有代谢潜力上产生分化。基因表达差异使产区黄芪在固有代谢潜能上存在分化,为后续生态环境作用下的成分差异奠定了基础。第二,生态环境与土壤微生物会影响次生代谢方向。土壤理化性质、根际微生物组、海拔、气温、光照、水分条件等生态因子共同构成影响黄芪化学成分积累的外界因素。例如,低温、干旱等逆境通常促进黄芪黄酮及皂苷类防御物质的累积;部分产区土壤中重金属含量偏高,因此黄芪可能通过增强抗氧化或应激相关代谢途径来提升苷类与黄酮类含量。生态因子的差异使得不同产区黄芪在次生代谢方向和积累及限速步骤调控上呈现显著差异,从而形成产区特异性。第三,栽培模式与生长方式引起黄芪结构及代谢积累差异。直播、育苗移栽、仿野生等栽培方式会导致根系结构、水分代谢及组织发育存在差异,从而影响次生代谢物的空间分布与含量。例如,仿野生栽培使黄芪根部受更多生态压力,其皮层、木质部及维管组织的发育特征与常规栽培黄芪差异显著,而这些解剖差异与皂苷、黄酮的积累量呈相关性,这提示组织结构也是化学成分差异的重要物质基础。

综上,不同产区黄芪质量差异的形成,本质上源于“遗传基础-生态因子-栽培方式”三者互作下的次生代谢网络重塑,从而导致多糖、皂苷、黄酮等关键活性成分含量差异,并最终反映在外观性状与药效活性上。尽管已有研究为产区差异提供了化学与药理层面的基础认识,但仍存在若干关键科学问题。其一,现有研究多聚焦单一成分的药效验证,对不同类别活性成分的协同作用缺乏系统解析。其二,产区差异研究仍偏向成分定量比较,对土壤微生物组、代谢调控网络等深层机制探讨不足,难以解释同一产区不同地块之间的显著波动。其三,重金属胁迫与药效成分提升的关联性提示生态适应性具有双刃剑效应,如何在保持药效的前提下降低有害元素累积仍需探索。未来,通过代谢组、转录组、单细胞解析和根际微生物组学等多组学整合,有望进一步阐明不

同产区黄芪质量形成的底层机制,为品质精准调控与产区质量评价提供科学依据。

2 黄芪质量差异的影响因素

黄芪作为传统中药材的代表性物种,其质量直接关联临床疗效与药用价值。现代研究表明,黄芪中黄芪甲苷、毛蕊异黄酮葡萄糖苷等核心有效成分的含量差异可达3~5倍,这种显著的质量波动根植于药材形成的全生命周期过程。系统梳理了影响黄芪质量的3大关键维度:自然生态系统的本源塑造、人工干预的技术调控以及采后管理的品质维系,共同构成解析黄芪质量形成机制的完整框架。

2.1 自然因素

黄芪作为一种重要的中药材,其质量差异受到多种自然因素的影响。这些因素包括地理气候条件、土壤特性、生长年限、环境因子以及伴生植物等。植物不同发育阶段和昼夜节律调控、生物因子和非生物因子诱导都会对有效成分的合成与积累造成影响^[44]。总结分析了这些自然因素对黄芪的质量差异造成的影响,以期黄芪的种植和生产提供理论依据。

2.1.1 地理气候条件 地理与气候因子是驱动不同产区黄芪质量差异的核心环境变量,温度、光照、降水和海拔均能通过调控生长过程和次生代谢网络而显著影响黄芪活性成分的积累^[45]。研究表明,气温、海拔、降水量和空气湿度等参数与黄芪中黄酮、多糖和皂苷的含量呈显著相关性^[46]。例如,经度和季节性气候对成分分布具有方向性影响:高经度地区更有利于皂苷和黄酮苷类成分的积累,而低经度地区更有利于黄酮苷元类成分生成;9月较高的太阳辐射以及4月偏低的降水量,会促进黄酮苷的生物合成^[47];温度是影响黄芪代谢的关键因子,适宜的温度范围有利于生物量形成及关键成分的积累^[48];而正昼夜温差($\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$)不仅增强光合作用相关基因表达,还能促进次生代谢产物的富集,显著提升幼苗质量^[49],从生态适应性看,黄芪耐旱耐寒但不耐高温与水涝,其生长适宜于温和或温凉半干旱气候,气候变暖可能造成生育期缩短,从而影响产量及品质稳定性^[50];光照强度和时长同样决定了有机物与次生代谢物的积累模式,不同光照组合可导致有效成分变化具有明显差异^[48]。此外,降水量、海拔梯度和日照时数等复合气候因子对黄芪生长指标及化学成分也具有显著调控作用。例如,

随海拔升高,毛蕊异黄酮和总黄酮含量呈上升趋势,而芒柄花素含量则与经度增加呈正相关^[51]。总体来看,这些气候因子通过影响黄芪的光合效率、碳氮代谢、逆境响应途径与次生代谢基因表达,最终造成了不同产区之间的化学成分格局与质量差异。

2.1.2 土壤特性 土壤是黄芪生长的基础,土壤的理化性质和养分含量对黄芪的质量有显著影响。研究表明,土壤 pH 值、有机质含量、土壤微生物、矿物质元素含量等因素对黄芪的生长和品质有重要影响。不同黄芪产区在土壤元素分布特点和根际土壤真菌群落方面存在较大差异,土壤 pH 值是影响黄芪根际微生物群落结构和真菌多样性的主要因素之一^[52],根际微生物群落对蒙古黄芪的生长和品质有显著影响^[53],特定微生物(如 *Stenotrophomonas* 和 *Phyllobacterium*)可能通过促进植物代谢或共生关系间接调控生物活性成分的积累^[54],进而影响黄芪的活性成分积累,长期连作导致蒙古黄芪根际和内生微生物群落结构失衡,潜在病原菌富集^[55],细菌可以降解土壤中自毒物质,从而缓解连作障碍,提高黄芪的产量和品质^[56],研究表明野生环境更有利于蒙古黄芪代谢物积累,关键基因表达和根际微生物群落协同作用可以提升其药用品质^[57]。土壤中的有机质和矿物质元素含量直接影响黄芪的营养吸收和生理代谢,从而影响其化学成分的积累^[45],土壤质量与黄芪质量呈显著正相关,土壤有机质(soil organic matter, SOM)、总钙(soil total calcium, STCa)和 pH 值是影响蒙古黄芪有效成分积累的关键土壤因子^[58]。例如,铁、锰、锌配施对黄芪抗氧化酶活性及产量质量具有显著促进作用,尤其是铁锰互作对其抗氧化酶及产量质量的作用最佳;单独施用锌肥对其抗氧化酶及产量质量影响最佳^[59]。此外,河滩地的黄芪在形态指标上表现最好,坡地的黄芪在药效成分上表现最佳,平地的黄芪在甲苷含量上最高,水浇地的黄芪产量最高,且随生长年限的增加而增加^[60]。

总体而言,现有研究从土壤理化性质、矿质元素供给及根际微生物调控等方面,揭示了土壤环境在不同产区黄芪质量差异形成中的重要作用。然而,多数研究仍以单因子或相关性分析为主,对不同土壤因子之间的协同作用、关键限制因子的识别以及其对次生代谢通路的调控机制认识不足。未来有必要在系统比较不同产区土壤特征的基础上,进

一步结合根际微生物功能解析与代谢调控研究,从土壤层面深入阐明不同产区黄芪质量差异的物质基础及其形成机制。

2.1.3 生长年限 黄芪的生长年限对其质量有显著影响。研究表明,随着生长年限的增加,黄芪的根部直径和长度会逐渐增加,显微结构也会随着生长年限发生变化,1~5年内黄酮类化合物含量低,6~20年生长稳定,黄酮和皂苷类化合物含量较高,品质较佳^[22]。三年生黄芪单株根鲜质量、根干质量、毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量、黄芪甲苷和毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量及有效成分总量均高于二年生黄芪^[61]。黄芪的皂苷类成分含量在生长初期较低,随着生长年限的增加而逐渐升高,但达到一定年限后开始下降,黄酮类成分含量则随生长年限的增加而逐渐升高^[45]。这种变化趋势可能与黄芪在不同生长阶段的生理代谢和次生代谢产物的积累有关。因此,在实际生产中,应根据应用需求确定合理的采收年限,以确保黄芪的高质量。

不同产区在栽培制度、生长周期控制及采收年限选择上的差异,可能进一步放大上述代谢阶段性特征,是造成产区黄芪质量差异的重要人为因素之一。因此,在生产实践中,应结合目标用途与主要评价成分,优化采收年限:以提高黄酮和皂苷类成分为目标时,应避免过早采收;同时,通过分用途分年限管理,可在一定程度上降低产区因生长阶段不一致所带来的质量波动。

2.1.4 伴生植物 伴生植物是指在特定生态系统中与某一主要植物(通常称为优势种或目标种)共同生长、相互作用的植物种类。这些植物通常在同一生境中共存,并可能在生态、生理或营养等方面与主要植物存在某种联系^[62]。伴生植物能够改善连作土壤的理化性质、抑制土传病原菌、促进植物生长、增加土壤微生物多样性^[63]。伴生植物通过调节土壤理化特性并优化微生物群落结构,能够有效促进浑源仿野生黄芪的生长进程,同时提升其有效成分含量与整体品质^[64]。

2.1.5 小结 黄芪的质量差异受多种自然因素的影响。地理气候条件、土壤特性、生长年限、环境因子和伴生植物等因素共同作用于黄芪的生长和品质。为了提高黄芪的质量,应综合考虑这些自然因素,采取科学的种植和管理措施,确保黄芪的高质量和高效生产。未来的研究应进一步深入探讨这些因素对黄芪质量的具体影响机制,为黄芪的优质

栽培提供理论支持和实践指导。

从生态系统视角看,不同自然因子之间并非线性叠加关系,而是通过复杂的互作过程共同调控黄芪的生长发育与次生代谢过程。气候条件可通过改变土壤水分状态、养分有效性及根际微生物活性,间接放大或削弱土壤因子对活性成分积累的影响;同时,生长年限与栽培方式的差异,又会进一步改变根系结构和根际环境稳定性,从而影响植物对生态信号的响应强度。在这一过程中,伴生植物通过调节群落结构、改善土壤理化性质及重塑微生物网络,与气候和土壤因子共同构成多层次生态调控体系。这些生态互作最终体现在次生代谢网络的系统性响应上。一方面,多种生态胁迫或适应性刺激可诱导防御相关代谢通路协同激活,促进黄酮、皂苷等抗逆性次生代谢物的累积;另一方面,资源供给条件(如水分、矿质元素和光能)又通过影响初级代谢水平,间接制约次生代谢底物供给与能量分配。不同产区生态因子组合差异,可能导致代谢网络中关键节点的调控方式不同,使黄芪在整体成分谱、成分比例及药效潜力上呈现出显著的区域特征。这表明,黄芪质量差异的形成并非由某一单一生态因子主导,而是多生态因子在时间和空间尺度上持续互作、共同塑造的结果。然而,现有研究多侧重单一因子的相关性分析,对多生态因子协同作用及其在代谢层面的整合机制认识仍不充分。未来有必要在产区比较的基础上,加强对生态因子互作及其对次生代谢通路系统调控的研究,以更准确阐明不同产区黄芪质量差异的形成机制。

2.2 黄芪的栽培技术体系

黄芪作为中国传统中药材,具有广泛的药理作用和应用价值。近年来,随着市场对黄芪需求的不断增加,蒙古黄芪的栽培技术及其影响因素成为了研究的热点。蒙古黄芪栽培过程中涉及的多种技术和管理措施,包括土壤管理、施肥、灌溉、种植密度、杂草防控、栽培模式等,我们将对这些栽培措施进行总结分析,以期对蒙古黄芪的高效栽培提供理论依据和技术支持。

2.2.1 土壤管理与施肥 土壤管理是蒙古黄芪栽培过程中影响产量与质量形成的关键人为因素,其核心作用在于调控根际微生态环境与养分供给模式。研究表明,黄芪连作易导致根际微生物多样性下降,从而引起产量和品质降低,而通过合理间作、科学施肥及适度灌水等措施,可有效缓解连作障碍

并改善黄芪生长状况^[65],粉垄耕作通过改善土壤结构、提高有机质和速效养分含量,为根系发育及次生代谢物积累提供良好物质基础,进而促进黄芪产量提升^[66]。有机肥和微生物菌剂的施用是改善土壤生态功能、提升黄芪品质的重要途径^[67-68],例如,接种丛枝菌根真菌 *Funneliformis mosseae* 可提高黄芪光合效率,显著促进黄芪甲苷、毛蕊异黄酮葡萄糖苷、多糖及硒等成分的积累^[69],混合固氮菌剂则通过调节根际微生物群落结构和植物代谢过程,促进黄芪生长及黄酮类活性成分富集^[70]。在养分管理方面,合理的氮、磷、钾配施对黄芪产量和有效成分积累具有显著促进作用^[71],其中高磷高钾、相对低氮的施肥模式更有利于蒙古黄芪生长^[72],有机肥和菌肥在提升产量与品质方面整体优于单一化肥投入^[73-74]。

土壤管理措施并不能直接决定黄芪化学成分类型,是通过调控土壤理化性质、养分供给方式及根际微生物网络,间接影响次生代谢通路的活化程度与代谢物积累方向,是不同产区及不同栽培条件下黄芪质量差异形成的重要人为干预环节。然而,现有研究多集中于单一管理措施的效果评估,对不同土壤管理措施之间的协同作用及其对次生代谢网络的系统性影响缺乏深入解析。未来有必要在产区尺度上,结合根际微生物功能与代谢调控研究,构建以土壤生态优化为核心的黄芪品质调控策略。

2.2.2 灌溉与水分管理 水分管理是影响蒙古黄芪生长发育及有效成分积累的重要生态调控因子。研究表明,适宜的灌溉量和合理的灌溉方式能够通过改善土壤水分状况,促进黄芪生物量形成并显著提高其有效成分含量^[75]。同时,水肥一体化技术通过协同调控水分与养分供给,提高水分和肥料利用效率,有利于黄芪生长及品质提升^[76]。

2.2.3 种植密度与杂草防控 种植密度和杂草防控通过调节群体结构和资源竞争强度,影响蒙古黄芪的生长发育及有效成分积累。合理的种植密度有利于改善群体通风透光条件,促进个体生长和产量形成,而过高密度会加剧植株间对水分、养分和光照的竞争,抑制生长并降低产量和品质^[77-78]。同时,科学的杂草防控措施可有效减少杂草对养分和空间资源的竞争,从而促进黄芪正常生长并提高其产量和品质^[79]。

2.2.4 栽培模式与生长环境 不同栽培模式通过改变黄芪的生长环境和生态胁迫模式,进而调控其

次生代谢物的合成与积累,是影响蒙古黄芪质量差异的重要人为因素。研究表明,种子直播与育苗移栽在活性成分积累上存在显著差异,种子直播黄芪中黄芪甲苷和总黄酮含量较高^[80],仿野生及野生/半野生栽培条件下,黄芪中丙二酰基取代黄酮类及多种活性成分含量显著高于常规栽培^[17,57,81],基于快速蒸发电离质谱(rapid evaporative ionization mass spectrometry, REIMS)和二维液相色谱-质谱联用(two-dimensional liquid chromatography-mass spectrometry, 2DLC-MS)的研究进一步筛选出45种差异化合物,证实野生黄芪整体成分水平更高^[80]。轮作栽培可有效缓解连作障碍,提高产量和品质^[82];在特定生态条件下,林下种植、覆膜栽培及分级苗移栽等措施,通过改善土壤水热条件和群体结构,显著促进黄芪生长并提升药材质量^[6,83-84],此外,光照、温度、湿度及基质和营养条件的精细化调控,对蒙古黄芪种苗产量和品质具有显著影响^[85]。近年来,分子生物学和生物技术研究进一步揭示了栽培措施调控黄芪品质的内在机制。转录组学分析表明,沼液施用可通过调控生物量、生理特性及有效成分生物合成相关基因表达,影响蒙古黄芪品质^[86];适宜的沼液浓度和施用方式不仅促进幼苗生长和抗逆性,可诱导无机元素富集并增强次生代谢物的合成与积累^[87-88];除常规栽培管理外,环境诱导措施同样能够显著调控黄芪活性成分积累。低温处理可诱导毛蕊异黄酮及其苷类在不同组织中的富集^[89],中波紫外线(ultraviolet B, UV-B)辐射促进初生代谢向酚类及异黄酮途径转化^[90-91],不同光质(白光、红光)可选择性提高特定异黄酮含量^[92],植物激素和物理刺激亦通过调节代谢通路影响成分构成,如矮壮素和乙烯利可显著改变皂苷与黄酮类比例并提高黄芪甲苷含量^[93-94],但需控制用量以避免残留风险,适度剪切刺激可促进根系长及黄酮和三萜类成分积累^[95]。除此之外,膜际栽培在土壤温度、土壤含水量、农艺性状、干物质量和产量方面表现优异,能够为黄芪提供适宜的生长环境,促进其生长和产量提升^[83],还可以通过分级苗移栽,可以显著提高黄芪的生长速度、根部厚度和药材产量^[84]。

除上述管理措施外,低温可以诱导蒙古黄芪幼苗中毛蕊异黄酮及毛蕊异黄酮葡萄糖苷在不同组织中的积累^[89],UV-B处理可以促进黄芪幼苗中的初生代谢物向酚类物质的转化^[90],能够显著诱导异黄酮的积累^[91],白光和红光可以分别增加黄芪芽苗中

的芒柄花素和毛蕊异黄酮含量^[92],在栽培中可以对黄芪苗覆白膜和红膜,以此来增加黄芪中活性成分的含量,喷施植物激素也可导致黄芪根提取物中各种治疗化合物的比例发生变化,例如施用矮壮素可以使黄芪中的皂苷类物质含量升高,黄酮类成分含量降低,其残留量与使用量呈正相关,在实践中当适量使用^[93],外源乙烯利显著促进基因表达和抑制竞争性代谢途径基因,最终提高黄芪甲苷含量^[94],剪切能显著促进根系生长以及黄酮类和三萜类成分的积累^[95]。

现有研究从栽培模式、环境调控及人为干预等层面,揭示了不同生态条件下蒙古黄芪活性成分含量与组成的显著差异,其本质在于外界生态因子通过改变生长环境和胁迫强度,协同调控光合碳流分配、初生代谢到次生代谢转化及关键生物合成通路的表达,从而塑造不同产区黄芪的次生代谢物的表达谱,即其质量差异的物质基础。然而,目前相关研究仍以单一栽培措施或单一环境因子的效应分析为主,对多种生态因子之间的交互作用及其对关键次生代谢通路的协同调控机制认识不足,难以系统解释不同产区黄芪质量差异的形成过程。未来研究亟需以“成分谱-生态因子-代谢通路”为核心框架,结合多组学手段与生态因子综合调控试验,识别影响黄芪品质形成的关键限制因子与核心调控节点,并据此构建分产区、分用途的精准栽培与生态调控策略,从机制层面阐明不同产区黄芪质量差异的形成机制。

2.3 采收和加工

2.3.1 采收 采收时间是影响黄芪质量及其活性成分积累的重要环节。传统经验认为秋季为黄芪适宜采收期,此时地上部衰退、根部营养物质和次生代谢产物积累较为充分。研究表明,不同产区和不同成分的峰值出现时间存在明显差异:陇西黄芪根干重和毛蕊异黄酮葡萄糖苷在9月达到高值^[65],黄芪多糖在10~11月含量最高,而总黄酮在8月上旬较高,总皂苷在7~9月处于高水平^[96],青海黄芪秋季采收黄酮类含量高于春季,而黄芪甲苷则呈现春高秋低特征^[97],在9月末至10月中上旬采收时,黄芪根重及黄芪甲苷、毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量较高^[61,98],内蒙古产区黄芪于11月初采挖时其主要活性成分达到峰值^[99],此外,采挖方式与加工环节同样影响质量,其中晴天深挖全根及水枪清洗可有效降低黄芪甲苷和毛蕊异黄酮葡萄糖苷的损

耗^[100]。

总体上看,采收时间通过影响黄芪不同生长阶段的碳分配与次生代谢通量,决定了多糖、黄酮和皂苷等关键活性成分的相对丰度,是不同产区黄芪质量差异形成的重要时间维度因素。然而,现有研究多集中于单一产区或单一成分的峰值比较,对多成分协同变化及其与气候、土壤等生态因子的耦合关系缺乏系统分析,导致采收标准仍具有经验性和区域局限性。我们应以目标成分为导向,结合多产区动态监测数据,明确不同用途黄芪的最优采收窗口,并将采收与清洗等关键加工环节纳入规范化生产体系,从机制层面提升黄芪质量的稳定性与可控性。

2.3.2 干燥 干燥工艺是影响黄芪活性成分稳定性及最终质量形成的关键加工环节。不当干燥条件易导致黄芪甲苷、多糖等热敏性成分氧化或降解,从而降低药效。研究表明,在多种干燥方式中,60℃热风干燥可显著提高黄芪甲苷、毛蕊异黄酮葡萄糖苷及黄芪多糖含量,综合效果优于晒干和阴干,适用于对质量要求较高的产品;而晒干虽能较好保持外观色泽和浸出物含量,但活性成分损耗风险较高,主要适用于大规模、低成本生产^[101],在感官品质和结构保持方面,真空冷冻干燥与真空干燥可有效减少组织收缩和结构破坏,复水性良好,且黄芪甲苷损失较少^[102]。此外,微波真空干燥和热风-真空组合干燥在提高干燥效率的同时兼顾低温控损需求,有助于减少药效成分流失^[103-104],热泵变温干燥亦被证实能够更好地保留有效成分并提升干燥效率^[105]。

总体而言,干燥工艺通过调控脱水速率、温度梯度与氧暴露程度,影响黄芪组织结构完整性及次生代谢物的热稳定性,是产后加工阶段塑造黄芪质量差异的重要技术因素。但当前研究多聚焦单一成分或单一干燥条件,对不同干燥参数组合下多类活性成分协同变化规律认识不足,且缺乏与产区原料特性相结合的系统评价,制约了干燥工艺的标准化应用。同时,干燥后黄芪的储藏条件及其对成分稳定性的影响研究相对匮乏。可以从“原料差异-干燥过程-成分演变-储藏稳定性”的整体链条出发,构建多目标优化的加工调控体系,以进一步阐明不同产区黄芪质量差异在加工环节中的形成机制,并为分级利用和精细化生产提供技术支撑。

2.3.3 加工和炮制 黄芪作为传统补气要药,其

临床疗效高度依赖于药材质量,而从采收到炮制的全流程加工环节是影响多糖、皂苷和黄酮类等药效物质保留与转化的关键阶段。在产业化加工背景下,干燥温度、切制方式及炮制参数差异,均可显著改变黄芪质量标志物的含量与组成,进而影响制剂稳定性与临床疗效。已有研究表明,清洗和热风干燥可能降低毛蕊异黄酮葡萄糖苷和芒柄花素含量^[106],鲜切工艺较传统干切饮片能更好地保持活性成分水平^[107],趁鲜切制的产地加工与炮制一体化不仅提高了主要成分含量,还显著增强了抗氧化活性^[108],其工艺优化可在简化流程的同时降低药材损耗、提升饮片质量^[109]。

黄芪炮制历史悠久,不同炮制方法通过改变热作用、辅料介入及反应环境,对其化学成分构成产生显著影响^[110],研究表明,不同炮制品在糖类、氨基酸及黄酮类成分含量上存在明显差异:生黄芪水溶性糖和氨基酸含量较高,酒黄芪多糖或黄酮类含量较高,炒黄芪更有利于糖类成分的保留^[111-113]盐制处理可显著降低总多糖、总皂苷和总黄酮质量分数,从而影响药效表达^[114],蜜制黄芪在免疫调节、抗氧化及抗炎方面表现更优,其机制可能与多糖分子量、单糖组成及结构分支度改变有关^[115-116],上述差异表明炮制方式通过调控成分比例与结构特征,塑造了黄芪不同炮制品的功能指向性。

加工与炮制环节是黄芪质量差异形成的重要因素,其本质在于对药效物质组成、比例及结构的再塑造。然而,现有研究结果在不同炮制品成分变化趋势上仍存在不一致性,主要受原料来源、加工条件及评价指标差异影响,限制了结论的可比性与应用推广。可以以质量标志物为核心,系统整合加工参数、成分谱变化与药效关联,结合指纹图谱与化学计量学方法^[117]。建立可区分不同炮制品特征的质量评价体系,并明确毛蕊异黄酮葡萄糖苷、5-羟甲基糠醛和芒柄花素等关键标志物在炮制质量控制中的指示意义^[118],从而为不同产区黄芪的标准化加工与精准利用提供机制依据。

3 结语

不同产区黄芪质量差异并非由单一环境或管理因素决定,而是遗传背景、生态因子、栽培管理及产后加工等多层面因素共同作用的综合结果,其物质基础本质上体现为多糖、皂苷和黄酮类等关键次生代谢物在含量、比例及结构层面的系统性重塑。从自然生态层面看,地理气候、土壤理化性质及根际微生物通

过调控光合效率、营养吸收、逆境响应与代谢通路活性，共同塑造了不同产区黄芪的基础代谢模型；在生长发育层面，生长年限及群体结构差异进一步影响次生代谢物的阶段性积累；而在栽培与管理层面，种植模式、水肥调控、密度配置及生态互作则对代谢网络调控产生显著的效应；最终，采收时机、干燥方式及炮制工艺通过对成分稳定性和结构特征的再塑造，决定了药材品质的最终呈现形式。

然而，现有研究仍以单一成分或单一生态因子的相关性分析为主，缺乏对“多因子互作-代谢网络调控-质量表型形成”这一完整链条的系统解析，难以从机制层面解释同一产区、不同地块或不同管理条件

下黄芪质量波动的根本原因。针对上述问题，未来研究需从3个方面深化：其一，在产区比较研究中引入多组学联合分析，揭示气候-土壤-微生物-代谢通路之间的耦合关系，明确不同产区质量差异的关键限制因子；其二，在生产实践中推进分用途、成分导向的栽培与采收策略，通过生态调控与管理优化实现质量的可控化；其三，在加工与炮制环节建立以质量标志物为核心的标准化技术体系，减少人为操作对产区差异的非理性放大。通过上述路径，有望从机制层面阐明不同产区黄芪质量差异的物质基础，并为黄芪道地性评价与区域化质量控制提供科学支撑。黄芪质量差异的多重影响因素分析示意图见图2。

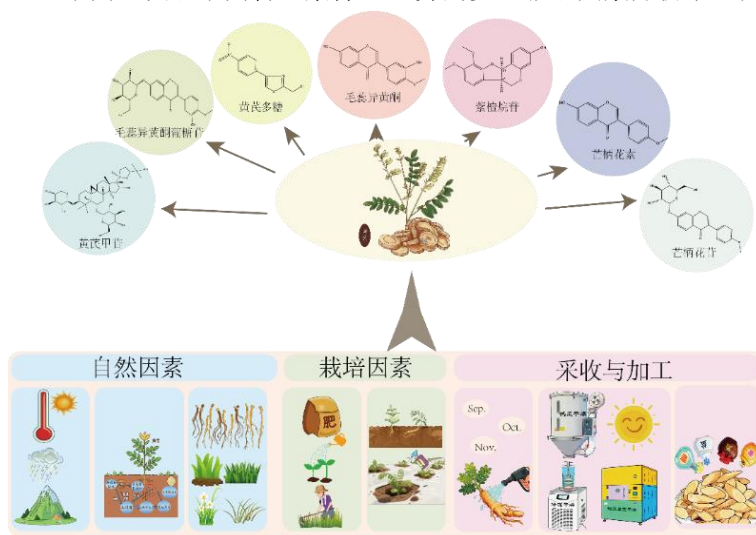


图2 黄芪质量差异的多重影响因素分析

Fig. 2 Analysis of multiple factors influencing quality differences of *A. membranaceus*

尽管现行《中国药典》2025年版^[1]已对黄芪甲苷和毛蕊异黄酮葡萄糖苷等指标成分设定含量下限，但本研究及既往研究表明，不同产区黄芪在化学成分组成和代谢谱上存在系统性且稳定的差异，且已明显超出单一指标评价所能反映的范围。该差异不仅体现在个别成分含量高低上，更表现为次生代谢产物整体谱系的结构性偏移：如山西浑源黄芪以黄芪甲苷I、II、III和IV和脯氨酸含量较高为特征，甘肃陇西样品中葫芦巴碱和蔗糖含量较高，内蒙古样品富集异黄酮类化合物，而陕西样品则以多种氨基酸和有机酸为主要特征^[119]。上述结果表明，不同产区黄芪已形成具有相对稳定性的“代谢型”，从物质基础层面支持了道地性存在的客观性。

除有机成分外，不同产区黄芪在微量元素组成上亦呈现出明显区域差异。内蒙古和山西样品在硒含量上具有优势，而黑龙江样品中砷和镍含量相对

较高^[120]，基于电感耦合等离子体光学发射光谱（inductively coupled plasma optical emission spectrometry, ICP-OES）结合主成分分析（principal component analysis, PCA）和多元线性回归（multiple linear regression, MLR）构建的判别模型，可实现道地产区与非道地产区样品的有效区分，并筛选出铁、硼、铝等关键指示元素^[121]。进一步结合代谢组学与机器学习方法，可识别黄芪产地、生长方式、品种和等级的可靠化学标志物，构建初级高精度分类模型^[122]，电子鼻、超高效液相色谱（ultra high performance liquid chromatography, UHPLC）、电化学指纹及高光谱成像等多技术联用方法，也在黄芪产地鉴别和质量控制中展现出良好应用前景^[123-126]，然而，现有研究多集中于“差异识别”，对差异形成的动态机制阐释仍显不足。

从形成机制看，道地性并非单一环境因子或遗

传因素作用的结果，而是遗传背景与生态因子长期耦合选择的综合体现。正如黄璐琦院士所指出，遗传-环境互作是道地药材品质形成的重要生态生物学基础^[127]。已有研究表明，硒、铁、锌等微量元素在适宜浓度范围内可促进黄芪根系生长及次生代谢物积累，低浓度硒有利于糖类积累，而较高浓度硒则促进芒柄花素和毛蕊异黄酮葡萄糖苷等成分的合成^[128-129]。同时，不同根部表型的蒙古黄芪在黄芪甲苷和异黄酮合成通路相关基因表达上存在显著差异^[130]。经度通过调控降水和光照条件，进一步影响活性成分的积累方向^[47]。这些证据共同说明，道地性本质上是“遗传-环境-代谢调控网络”协同作用的结果。

然而加工与炮制环节并非质量差异的被动延伸，而是影响黄芪质量表达的重要调控阶段。已有研究从加工过程中化学成分动态变化的角度出发，筛选出以黄芪甲苷和毛蕊异黄酮为代表的质量标志物，并据此构建了覆盖原料、加工过程及成品的质量控制思路^[131]。这进一步说明，黄芪质量差异不仅在田间形成，也在加工过程中被重塑，其物质基础具有全过程演化特征。

然而，目前关于黄芪道地性和质量形成机制的研究仍以单因子分析、相关性研究或少数标志物比较为主，尚不足以系统揭示不同生态因子间的协同效应及其对代谢网络的整体调控规律^[132]，也缺乏能够直观反映“环境-基因-代谢-质量”关系的综合模型。这在一定程度上限制了研究结论向精准种植、分区评价和质量预测的转化应用。

基于此，未来黄芪质量研究有必要从“指标控制”向“系统认知”转变：一是构建以代谢组学为核心、融合元素组学、转录组学和表型数据的多维数据库，系统刻画不同产区黄芪的成分特征图谱；二是引入机器学习与智能分析方法，建立黄芪质量形成的可视化模型，解析关键生态因子组合对核心代谢通路的调控路径；三是结合全国多年度检测数据与产地环境信息，实现黄芪质量动态监测与趋势预测。上述研究策略将为深入阐明不同产区黄芪质量差异的形成机制、完善道地性评价体系以及推动黄芪产业的精准化和标准化发展提供重要理论支撑。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

[1] 中国药典 [S]. 三部. 2025: 265.

- [2] 吴舒灵, 朱宇, 郑丹丹, 等. 中医药在新型冠状病毒肺炎治疗中的研究进展 [J]. 药学研究, 2022, 41(9): 588-594.
- [3] 于莹, 张功, 刘晶, 等. 基于网络药理学和分子对接方法探析黄芪预防新型冠状病毒肺炎的潜在作用机制 [J]. 山东大学学报: 医学版, 2021, 59(4): 6-16.
- [4] Li X H, Guo X H, Sha M, *et al.* Combining network pharmacology with chromatographic fingerprinting and multicomponent quantitative analysis for the quality evaluation of *Astragali Radix* [J]. *Biomed Chromatogr*, 2022, 36(4): e5319.
- [5] 药监局. 国家药监局关于印发进一步加强中药科学监管促进中药传承创新发展若干措施的通知: 国药监注(2023)1号[A]. (2023-01-03).
- [6] 张娜. 中药质量控制研究进展 [J]. 内蒙古中医药, 2024, 43(9): 160-162.
- [7] 黄志端. 中药质量控制技术的发展与应用 [J]. 当代化工研究, 2024(13): 102-104.
- [8] 王明明, 刘春辉, 朱莉, 等. 中药指纹图谱技术在中药材质量控制中的应用研究 [J]. 质量与市场, 2024(9): 30-32.
- [9] 熊贤招, 祝瑶露, 汪新婵, 等. 中药质量分析方法研究进展 [J]. 中国医药科学, 2025, 15(1): 35-38.
- [10] 肖伟, 张欣, 徐芳芳, 等. 以功效物质为质量目标的中药生产过程质量控制研究与实践 [J]. 南京中医药大学学报, 2024, 40(10): 1030-1038.
- [11] 黄璐琦, 陈美兰, 肖培根. 中药材道地性研究的现代生物学基础及模式假说 [J]. 中国中药杂志, 2004, 29(6): 494-496.
- [12] 杨铁钢, 张芳, 腊贵晓, 等. 基于历史传承和科学内涵的植物药材道地性综合评价 [J]. 中草药, 2025, 56(2): 377-388.
- [13] 邹瀚霖, 汪弟, 饶必轩, 等. 基于有效成分和金属元素探讨不同产地黄芪的差异 [J]. 中药材, 2021, 44(4): 905-911.
- [14] 王振恒, 马定财, 邵晶, 等. 甘肃栽培蒙古黄芪横切面组织显微定量与质量标志物含量的相关性研究 [J]. 中国现代应用药学, 2024, 41(6): 767-776.
- [15] 常晶茹, 姚萱航, 张雪薇, 等. 黄芪属植物 DNA 条形码与聚类分析的研究 [J]. 中草药, 2022, 53(22): 7201-7206.
- [16] 姚静, 杨晓宁, 朱平, 等. HPLC-CAD 指纹图谱结合化学计量学评价不同产地黄芪质量 [J]. 中成药, 2022, 44(10): 3214-3219.
- [17] Zhang F S, Zhang X, Luo Y Y, *et al.* Biosynthetic mechanisms of isoflavone accumulation affected by different growth patterns in *Astragalus mongholicus* products [J]. *BMC Plant Biol*, 2022, 22(1): 410.

- [18] Han X J, Yin M Z, Fang Q Y, *et al.* Nutritional ingredients and functional components of cultivated and wild-simulated *Astragali Radix* using widely targeted metabolomics [J]. *LWT*, 2023, 185: 115186.
- [19] 高巍, 王志强, 刘鸣. 优质黄芪的外观性状与内在质量特征分析 [J]. 中南农业科技, 2024, 45(4): 35-39.
- [20] 杨一丹. 基于外观性状与内在指标相结合的黄芪质量等级标准研究 [D]. 太原: 山西大学, 2023.
- [21] 叶飞, 王颖莉, 张志峰, 等. 宁夏六盘山区黄芪鉴别及其二氧化硫残留量测定 [J]. 广州化工, 2019, 47(22): 117-119.
- [22] 王亚鹏. 不同生产模式及生长年限黄芪的品质评价及其差异形成的分子机制研究 [D]. 北京: 中国中医科学院, 2024.
- [23] Zhang Y, Ji W T, Qin H L, *et al.* *Astragalus* polysaccharides alleviate DSS-induced ulcerative colitis in mice by restoring SCFA production and regulating Th17/Treg cell homeostasis in a microbiota-dependent manner [J]. *Carbohydr Polym*, 2025, 349: 122829.
- [24] Xu Y M, Xu C, Huang J, *et al.* *Astragalus* polysaccharide attenuates diabetic nephropathy by reducing apoptosis and enhancing autophagy through activation of Sirt1/FoxO1 pathway [J]. *Int Urol Nephrol*, 2024, 56(9): 3067-3078.
- [25] Lin L N, Zhao C Y, Lv H J, *et al.* Astragaloside IV promotes neuronal axon regeneration by inhibiting the PTEN/AKT pathway [J]. *Brain Res*, 2025, 1850: 149451.
- [26] Hao J F, Hu R X, Zhao J M, *et al.* Metabolomics combined with network pharmacology reveals the protective effect of astragaloside IV on alcoholic liver disease [J]. *Phytomedicine*, 2024, 135: 156032.
- [27] Liu J, Yang K, Zhou L L, *et al.* A new strategy for Astragaloside IV in the treatment of diabetic kidney disease: Analyzing the regulation of ferroptosis and mitochondrial function of renal tubular epithelial cells [J]. *Int Immunopharmacol*, 2024, 141: 112794.
- [28] Wang J, Wang L C, Feng X X, *et al.* Astragaloside IV attenuates fatty acid-induced renal tubular injury in diabetic kidney disease by inhibiting fatty acid transport protein-2 [J]. *Phytomedicine*, 2024, 134: 155991.
- [29] Zhang S Y, Li S J, Xie S Y, *et al.* The role of Ca²⁺/PI3K/Akt/ENOS/NO pathway in astragaloside IV-induced inhibition of endothelial inflammation triggered by angiotensin II [J]. *Mediat Inflamm*, 2024, 2024(1): 3193950.
- [30] Ma C R, Zhang J, Yang S, *et al.* *Astragalus* flavone ameliorates atherosclerosis and hepatic steatosis via inhibiting lipid-disorder and inflammation in apoE (-/-) mice [J]. *Front Pharmacol*, 2020, 11: 610550.
- [31] Yan X L, Quan S Q, Guo R J, *et al.* Calycosin-7-O- β -D-glucoside downregulates mitophagy by mitigating mitochondrial fission to protect HT22 cells from oxygen-glucose deprivation/reperfusion-induced injury [J]. *Mol Med Rep*, 2025, 31(3): 71.
- [32] Xu W, Zhou F Y, Zhu Q, *et al.* Calycosin-7-O- β -D-glucoside attenuates palmitate-induced lipid accumulation in hepatocytes through AMPK activation [J]. *Eur J Pharmacol*, 2022, 925: 174988.
- [33] Luo H Y, Yang S X, Deng P, *et al.* Network pharmacology combined with transcriptomics reveals that formononetin, a biologically component of *Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bunge, inhibits the PI3K/AKT signaling pathway to improve chronic renal failure [J]. *J Ethnopharmacol*, 2025, 338(Pt 1): 119041.
- [34] 滕红梅, 咎亚玲, 贾鹏, 等. 不同产地黄芪药材中毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量的比较 [J]. 江苏农业科学, 2016, 44(4): 226-228.
- [35] 周鹏, 胡明勋, 李浩飞, 等. 不同品种、产地和种植方式黄芪药材中黄酮类成分的质量分析 [J]. 中国药房, 2016, 27(18): 2575-2578.
- [36] 邵杰敏, 连玉菲, 阎乐浩, 等. 不同产地黄芪中的黄芪总皂苷含量对比分析 [J]. 陕西中医, 2018, 39(2): 268-270.
- [37] 叶迎, 包强, 王瑞海, 等. 甘肃黄芪和红芪中总皂苷含量测定对比研究 [J]. 环球中医药, 2016, 9(10): 256-263.
- [38] 熊一峰, 万燕晴, 李科, 等. 山西恒山地区蒙古传统黄芪和移栽黄芪的质量差异研究 [J]. 中草药, 2017, 48(8): 1635-1643.
- [39] 姚雪莲, 裴彩云, 王宗权. 不同产地、不同采收期黄芪药材及饮片中毛蕊异黄酮葡萄糖苷及芒柄花素含量测定 [J]. 药物分析杂志, 2012, 32(5): 797-801.
- [40] 聂静苑, 刘应蛟, 雷德卿, 等. 不同来源黄芪总黄酮含量测定及其抗氧化活性研究 [J]. 赣南医学院学报, 2018, 38(6): 534-537.
- [41] 段琦梅, 梁宗锁, 聂小妮, 等. 黄芪和党参提取物的抗氧化活性研究 [J]. 西北植物学报, 2010, 30(10): 2123-2127.
- [42] Liu M J, Lan L L, Li G, *et al.* Multi-dimensional profiles combined with antioxidant activity and fingerprint-efficacy relationship to analyze the quality of *Astragali Radix* from different sources [J]. *Food Chem*, 2024, 461: 140848.
- [43] Xiao W L, Motley T J, Unachukwu U J, *et al.* Chemical and genetic assessment of variability in commercial *Radix Astragali* (*Astragalus* spp.) by ion trap LC-MS and nuclear ribosomal DNA barcoding sequence analyses [J]. *J Agric*

- Food Chem*, 2011, 59(5): 1548-1556.
- [44] 梁宗锁, 方誉民, 杨东风. 植物萜类化合物生物合成与调控及其代谢工程研究进展 [J]. 浙江理工大学学报: 自然科学版, 2017, 37(2): 255-264.
- [45] 辛博. 产地气候、土壤因子及生长年限对黄芪药材质量的影响研究 [D]. 北京: 北京中医药大学, 2015.
- [46] 李欣, 卓冰雨, 祁晓娟, 等. 黄芪异黄酮含量与气候因子的灰色关联度和通径分析 [J]. 中国中药杂志, 2020, 45(14): 3407-3413.
- [47] 李新星, 刘凤波, 王雅净, 等. 不同产地蒙古黄芪中 12 种药效成分含量差异及其与地理分布和气候因子相关性分析 [J]. 中草药, 2024, 55(20): 7085-7092.
- [48] 王祥, 安佳, 王七龙, 等. 环境因素对黄芪药材生长及品质的影响 [J]. 浙江中医药大学学报, 2023, 47(10): 56-75.
- [49] Liu Y, Ren X X, Jeong B R. Manipulating the difference between the day and night temperatures can enhance the quality of *Astragalus membranaceus* and *Codonopsis lanceolata* plug seedlings [J]. *Agronomy*, 2019, 9(10): 654.
- [50] 夏权. 气候生态条件对甘肃省 3 种特色中药材种植的影响 [J]. 南方农业, 2022, 16(15): 189-191.
- [51] 李光跃. 黄芪有效成分与生态因子相关性及早旱胁迫对黄芪黄酮类成分积累的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2017.
- [52] 丛悦, 李莉, 关佳莉, 等. 不同产地蒙古黄芪土壤元素和根际土壤真菌群落结构变化研究 [J]. 现代中药研究与实践, 2023, 37(1): 10-16.
- [53] Li B Z, Zhang Q Q, Liu Z H, *et al.* Root-associated microbiomes are influenced by multiple factors and regulate the growth and quality of *Astragalus membranaceus* (Fisch) Bge. var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao [J]. *Rhizosphere*, 2022, 24: 100609.
- [54] Li Y M, Liu Y, Zhang H, *et al.* The composition of root-associated bacteria and fungi of *Astragalus mongholicus* and their relationship with the bioactive ingredients [J]. *Front Microbiol*, 2021, 12: 642730.
- [55] Zhou Q, Wang Y, Yue L, *et al.* Impacts of continuous cropping on the rhizospheric and endospheric microbial communities and root exudates of *Astragalus mongholicus* [J]. *BMC Plant Biol*, 2024, 24(1): 340.
- [56] 金娟. 土壤细菌多样性对自毒物质对羟基苯甲酸降解及黄芪生长的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- [57] Dong M Y, Su H Y, Li J J, *et al.* Multi-omics reveal wild habitat is more favorable for the metabolite accumulation in *Astragalus mongolicus* [J]. *Ind Crops Prod*, 2024, 222: 119953.
- [58] Sun H, Jin Q, Wang Q X, *et al.* Effects of soil quality on effective ingredients of *Astragalus mongholicus* from the main cultivation regions in China [J]. *Ecol Indic*, 2020, 114: 106296.
- [59] 刘鑫钰, 晋小军, 毛耀杰, 等. 铁锰锌对黄芪抗氧化酶及产量质量的影响 [J]. 热带农业工程, 2024, 48(1): 92-98.
- [60] 蒲雅鑫. 不同土壤条件仿野生栽培对黄芪产量及药效成分的影响 [D]. 太谷: 山西农业大学, 2022.
- [61] 邵财, 孙海, 王秋霞, 等. 不同栽培年限和采收期对蒙古黄芪根重及有效成分含量的影响 [J]. 中药材, 2025, 48(1): 30-34.
- [62] 慎佳泓. 西湖风景名胜区森林植被多样性及人为干扰的影响研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [63] 苗馨月. 伴生植物及常见轮作作物发酵产物在人参连作障碍上的应用研究 [D]. 长春: 长春中医药大学, 2024.
- [64] 渠红. 浑源仿野生黄芪伴生植物与其土壤环境因子的相关性及其对黄芪有效成分的影响 [D]. 太原: 山西大学, 2023.
- [65] 李冰圳, 李国斌, 苏优拉, 等. 蒙古黄芪不同生育期黄酮类成分积累及其根际微生物多样性研究 [J]. 西北植物学报, 2020, 40(5): 828-837.
- [66] 张天赐, 李思璇, 陈彦云. 粉垄耕作对黄芪土壤养分及生长的影响 [J]. 中国农学通报, 2024, 40(35): 43-48.
- [67] 常佳钰, 陈婕, 赵博荣, 等. 光合细菌菌剂对黄芪品质和土壤肥力的影响 [J]. 时珍国医国药, 2023, 34(11): 2740-2744.
- [68] 蔡萌. 化肥减量配施微生物菌剂对蒙古黄芪生长发育及土壤养分特性的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024.
- [69] Liu J Q, Cai J, He R L, *et al.* Influences of *Funneliformis mosseae* on the photosynthetic parameters and active secondary metabolites contents of *Astragalus membranaceus* and *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* [J]. *Science Asia*, 2019, 45(4): 324.
- [70] Shi Z Y, Guo Y X, Wang Y Y, *et al.* Nitrogen-fixing bacteria promote growth and bioactive components accumulation of *Astragalus mongholicus* by regulating plant metabolism and rhizosphere microbiota [J]. *BMC Microbiol*, 2024, 24(1): 261.
- [71] 陆国弟, 侯嘉, 杜弢, 等. 肥料类型对黄芪产量和品质影响的研究进展 [J]. 草原与草坪, 2024, 44(4): 252-260.
- [72] 高青鸽. 施肥及采收期对蒙古黄芪生长和次生代谢的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [73] Wang L L, Yang L C, Xiong F, *et al.* Nitrogen fertilizer levels affect the growth and quality parameters of *Astragalus mongolica* [J]. *Molecules*, 2020, 25(2): 381.

- [74] 刘杰, 张雄杰, 盛晋华, 等. 肥料类型对盐碱地蒙古黄芪生长与光合特征及药材产量和品质的影响 [J]. 西北植物学报, 2021, 41(6): 1012-1018.
- [75] 胡力文, 纪晓玲, 韩翠, 等. 不同灌溉量对蒙古黄芪土壤水分、生长发育及产量品质的影响 [J]. 山西农业科学, 2024, 52(5): 44-51.
- [76] 乌日古木拉, 赵巴音那木拉, 兰天, 等. 水肥一体化技术促进黄芪减氮增效及养分需求规律研究 [J]. 中国土壤与肥料, 2024(10): 161-171.
- [77] 王晓飞, 魏国江, 关向军, 等. 密度与环境因子对蒙古黄芪育苗影响研究 [J]. 中国农学通报, 2020, 36(15): 43-47.
- [78] 樊良帅, 李进瞳, 曾燕, 等. 不同密度对山西北部黄芪生长发育与产量的影响 [J]. 安徽农业科学, 2024, 52(1): 164-167.
- [79] 李雪. 不同杂草防控技术对蒙古黄芪药材产量和品质的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [80] Chen S J, Li X S, Shi D S, *et al.* Identification strategy of wild and cultivated *Astragali Radix* based on REIMS combined with two-dimensional LC-MS [J]. *NPJ Sci Food*, 2024, 8(1): 91.
- [81] Guo Y X, Li Z Y, Qin X M. Quality assessment of *Astragali Radix* based on pseudo-targeted metabolomics and chemometric approach [J]. *J Sep Sci*, 2023, 46(11): 2200985.
- [82] 周易, 李新星, 邹宇轩, 等. 不同种植模式黄芪药材质量与综合效益评价 [J]. 中国现代中药, 2025, 27(2): 296-303.
- [83] 纪晓玲, 毛端, 唐明辉, 等. 不同覆膜栽培方式对黄芪产量的影响研究 [J]. 榆林学院学报, 2024, 34(2): 41-45.
- [84] Li X J, Mu Y T, Zhang X M, *et al.* Effects of graded seedling transplanting on growth, yield and medicinal materials quality of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* [J]. *Legume Res Int J*, 2023: 212-223.
- [85] 盛晋华, 刘杰, 张雄杰. 不同基质比例和营养液浓度对蒙古黄芪种苗产质量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2022(6): 167-172.
- [86] 陆国弟, 杨扶德, 陈正君, 等. 沼液施用对蒙古黄芪品质影响的转录组学分析研究 [J]. 天然产物研究与开发, 2025, 37(10): 1914-1925.
- [87] 陆国弟, 杨扶德, 郑健, 等. 沼液对蒙古黄芪抗逆生理指标及药用活性成分含量的影响 [J]. 西北植物学报, 2019, 39(12): 2235-2243.
- [88] 陆国弟, 杨扶德, 侯嘉, 等. 沼液施用对蒙古黄芪根无机元素及有效成分积累的影响 [J]. 草原与草坪, 2024, 44(5): 190-199.
- [89] Pan H Y, Fang C M, Zhou T S, *et al.* Accumulation of calycosin and its 7-*O*- β -*D*-glucoside and related gene expression in seedlings of *Astragalus membranaceus* Bge. var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao induced by low temperature stress [J]. *Plant Cell Rep*, 2007, 26(7): 1111-1120.
- [90] Liu Y, Liu J, Abozeid A, *et al.* UV-B radiation largely promoted the transformation of primary metabolites to phenols in *Astragalus mongholicus* seedlings [J]. *Biomolecules*, 2020, 10(4): 504.
- [91] Liu Y, Liu J, Wang Y, *et al.* The different resistance of two *Astragalus* Plants to UV-B stress is tightly associated with the organ-specific isoflavone metabolism [J]. *Photochem Photobiol*, 2018, 94(1): 115-125.
- [92] Seo J W, Lee J G, Yoo J H, *et al.* Cellular morphology and transcriptome comparative analysis of *Astragalus membranaceus* Bunge sprouts cultured *in vitro* under different LED light [J]. *Plants*, 2023, 12(9): 1914.
- [93] Qin H H, Xie L, Zang Y M, *et al.* Residue of chlormequat and regulatory effects on the specialized metabolites of astragali *Radix* [J]. *Molecules*, 2023, 28(19): 6754.
- [94] Wu H N, Cui H, Tian Y, *et al.* Exogenous ethephon treatment on the biosynthesis and accumulation of astragaloside IV in *Astragalus membranaceus* Bge. var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao [J]. *Bot Stud*, 2024, 65(1): 16.
- [95] Guo X, Yan X, Wang Y Y, *et al.* Integrated transcriptomics and metabolomics analysis reveals the effects of cutting on the synthesis of flavonoids and saponins in Chinese herbal medicine *Astragalus mongholicus* [J]. *Metabolites*, 2024, 14(2): 97.
- [96] 唐文文, 李国琴, 晋小军. 黄芪不同采收期有效成分含量比较 [J]. 北方园艺, 2015(7): 138-141.
- [97] 王玲玲, 杨路存, 熊丰, 等. 青海省东部不同产地和春秋季节蒙古黄芪化学成分差异性 [J]. 分子植物育种, 2021, 19(10): 158-163.
- [98] 王玲玲, 杨路存, 熊丰, 等. 不同栽培密度和采收期对蒙古黄芪生长发育和产量的影响 [J]. 分子植物育种, 2019, 17(23): 258-268.
- [99] Li X J, Mu Y T, Wang J J, *et al.* Weighted correlation network analysis mining key metabolites and genes for regulation of root growth and secondary metabolism of *Astragalus membranaceus mongholicus* [J]. *Legume Res Int J*, 2025, 48(1): 47-56.
- [100] 唐正兴. 不同采收期和不同清洗方法对黄芪质量的影响 [J]. 农业科技与信息, 2022, 19(4): 57-60.
- [101] 路莎莎, 王凝, 王黎, 等. 基于主成分分析法研究干燥方法对黄芪药材质量的影响 [J]. 亚太传统医药, 2024, 20(1): 45-50.
- [102] 张燕青, 崔清亮, 魏庆霞, 等. 不同干燥方式对黄芪感官品质及功能成分的影响 [J]. 农产品加工: 上半月,

- 2021(12): 30-34.
- [103] 郑岳. 基于气味在线反馈的黄芪微波真空干燥过程品质优化 [D]. 无锡: 江南大学, 2024.
- [104] 袁越锦, 邹娜, 徐英英, 等. 热风真空组合干燥对黄芪品质的影响及工艺优化研究 [J]. 真空科学与技术学报, 2023, 43(10): 879-889.
- [105] 赵雅婷. 鲜湿切片黄芪热泵干燥特性及品质变化研究 [D]. 郑州: 河南工业大学, 2024.
- [106] 孙玉平, 龚苏晓, 曹煌, 等. 不同加工方法的蒙古黄芪药材中毛蕊异黄酮苷和芒柄花素定量分析 [J]. 中草药, 2015, 46(11): 1678-1681.
- [107] 李晶. 蒙古黄芪采收、产地加工规范与质量标准的研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古医科大学, 2024.
- [108] 张婕, 董安东, 谢允东, 等. 产地加工炮制一体化对黄芪质量的影响研究 [J]. 时珍国医国药, 2024, 35(15): 3397-3404.
- [109] 吴红伟, 李东辉, 边甜甜, 等. 基于响应面法结合熵权法多指标优选黄芪药材产地加工炮制一体化工艺 [J]. 中草药, 2021, 52(19): 5854-5861.
- [110] 邵长鑫, 林欢欢, 靳晓杰, 等. 黄芪的炮制历史沿革及现代研究进展 [J]. 中草药, 2023, 54(15): 5057-5074.
- [111] 江国荣, 禡雪梅, 刘肖林, 等. 不同炮制方法对中药黄芪中糖类和氨基酸类成分含量的影响 [J]. 医学理论与实践, 2019, 32(18): 2992-2994.
- [112] 李曼曼, 刘永. 不同炮制方法对中药黄芪化学成分的影响 [J]. 中西医结合研究, 2020, 12(1): 17-19.
- [113] 余文强. 不同炮制方法对黄芪中糖类及黄酮类成分的影响 [J]. 临床医学研究与实践, 2017, 2(31): 114-115.
- [114] 王日明. 不同炮制方法对黄芪化学成分变化及黄芪主要成分对黑色素瘤细胞影响研究 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2020.
- [115] 赵婷婷, 裴科, 于子涵, 等. 蜜炙对黄芪成分、药效及应用的影响研究进展 [J]. 中国医院药学杂志, 2024, 44(1): 113-122.
- [116] Wu J C, Li C Y, Bai L S, *et al.* Structural differences of polysaccharides from *Astragalus* before and after honey processing and their effects on colitis mice [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 182: 815-824.
- [117] 徐畅. 黄芪炮制工艺及质量控制研究 [D]. 长春: 吉林化工学院, 2024.
- [118] 周晶晶, 周洁, 张红伟, 等. 基于 HPLC 指纹图谱结合化学模式识别法对黄芪不同炮制品多指标成分分析研究 [J]. 天然产物研究与开发, 2024, 36(6): 993-1003.
- [119] Zheng L, Wang M, Ibarra-Estrada E, *et al.* Investigation of chemomarkers of *Astragali Radix* of different ages and geographical origin by NMR profiling [J]. *Molecules*, 2015, 20(2): 3389-3405.
- [120] 韩义军, 贺学杰, 杨艳春, 等. 基于多元统计分析黄芪道地与非道地产区判别研究 [J]. 农产品加工, 2024(10): 94-98.
- [121] Li L, Zheng S H, Yang Q Z, *et al.* Distinguishing *Astragalus mongholicus* and its planting soil samples from different regions by ICP-AES [J]. *Molecules*, 2016, 21(4): 482.
- [122] Wu J, Deng S Q, Yu X Y, *et al.* Identify production area, growth mode, species, and grade of *Astragali Radix* using metabolomics “big data” and machine learning [J]. *Phytomedicine*, 2024, 123: 155201.
- [123] Wei W L, Li J H, Huang L F. Discrimination of producing areas of *Astragalus membranaceus* using electronic nose and UHPLC-PDA combined with chemometrics [J]. *Czech J Food Sci*, 2017, 35(1): 40-47.
- [124] Liu X, Yan Z. Identification of geographical origins of *Astragalus membranaceus* in China using electrochemical fingerprinting [J]. *Int J Electrochem Sci*, 2023, 18(7): 100183.
- [125] Li K, Zhang R, Li S Y, *et al.* Potential quality evaluation approach for the absolute growth years' wild and transplanted *Astragali Radix* based on anti-heart failure efficacy [J]. *Chin J Nat Med*, 2020, 18(6): 460-471.
- [126] Xiao Q L, Bai X L, Gao P, *et al.* Application of convolutional neural network-based feature extraction and data fusion for geographical origin identification of *Radix Astragali* by visible/short-wave near-infrared and near infrared hyperspectral imaging [J]. *Sensors*, 2020, 20(17): 4940.
- [127] 黄璐琦, 郭兰萍, 胡娟, 等. 道地药材形成的分子机制及其遗传基础 [J]. 中国中药杂志, 2008, 33(20): 2303-2308.
- [128] 姜婉婷, 杨楠, 陈晨, 等. 硒处理对斜茎黄芪生长生理和初生代谢的影响 [J]. 植物研究, 2022, 42(6): 1062-1069.
- [129] 郭瑜瑞, 王渭玲, 杨祎辰, 等. 4 种微量元素对蒙古黄芪幼苗形态建成及抗逆性的影响 [J]. 西北农业学报, 2014, 23(6): 172-179.
- [130] 李晓杰. 蒙古黄芪高产及高活性成分含量种质鉴定评价与筛选 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [131] Dai Y T, Wang D B, Zhao M J, *et al.* Quality markers for *Astragali Radix* and its products based on process analysis [J]. *Front Pharmacol*, 2020, 11: 554777.
- [132] 张靖才. 靖远县黄芪生产现状及建议 [J]. 农业科技与信息, 2023, 20(8): 165-167.

[责任编辑 时圣明]