

• 综 述 •

逆境出质量：从种质与环境的相互作用探讨道地药材的质量形成机制

黄姚姚¹, 申俊龙^{1,2}, 李 洁^{1,2*}

1. 南京中医药大学, 江苏 南京 210023

2. 江苏省中药资源产业化过程协同创新中心, 江苏 南京 210023

摘 要: 在生态变迁和商业化背景下, 道地药材的质量问题近年来受到质疑。探究道地药材高质量的成因, 是恢复其历史名誉与提升中药材整体质量的重要课题。以韧性理论与生态胁迫理论为依据, 深入分析了种质与环境之间的相互作用对道地药材质量的影响。研究结果表明, 不同程度的逆境会促使植物在生长过程中发生适应性变化, 进而对其有效成分的积累、药理特性等质量相关因素产生影响。在逆境中, 中药植物展现出抵抗力、适应力和修复力 3 种韧性, 韧性是药材质量提升的核心要素。研究进一步发现, 适度逆境在药材质量形成中具有正向促进作用, 而轻度逆境对药材质量的影响相对有限, 重度逆境则可能导致质量下降。此外, 药材种质的优劣也决定了其在不同逆境程度下质量变化的幅度。为了全面理解和把握道地药材的质量问题, 必须深入解析种质与逆境的相互作用机制。

关键词: 道地药材; 韧性理论; 逆境; 种质; 相互作用

中图分类号: R282 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2670(2025)08-2945-09

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2025.08.028

Adversity breeds quality: Exploring quality formation mechanism of genuine medicinal materials from interaction between germplasm and environmentHUANG Yaoyao¹, SHEN Junlong^{1,2}, LI Jie^{1,2}

1. Nanjing University of Chinese Medicine, Nanjing 210023, China

2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Chinese Medicinal Resources Industrialization, Nanjing 210023, China

Abstract: Under the background of ecological changes and commercialization, the quality of genuine medicinal materials has been questioned in recent years. Investigating the causes of high quality in genuine medicinal materials is an important issue for restoring their historical reputation and improving the overall quality of traditional Chinese medicinal materials. Based on resilience theory and ecological stress theory, this study thoroughly analyzes the interaction between germplasm and environment and its impact on quality of genuine medicinal materials. The results show that different levels of adversity induce adaptive changes in plants during their growth, thereby affecting the accumulation of active ingredients, pharmacological properties, and other quality-related factors. In adverse conditions, Chinese medicinal plants exhibit three types of resilience: resistance, adaptability, and reparability, which are core elements in the enhancement of medicinal quality. The study further reveals that moderate adversity has a positive promoting effect on the formation of medicinal quality, while mild adversity has a relatively limited impact, and severe adversity may lead to a decline in quality. In addition, the quality change in medicinal materials under different adversity levels is also determined by the quality of their germplasm. Therefore, to comprehensively understand and grasp the quality issues of genuine medicinal materials, it is essential to deeply analyze the interaction mechanism between germplasm and adversity.

Key words: genuine medicinal materials; resilience theory; adversity; germplasm; interaction

收稿日期: 2025-01-12

基金项目: 江苏省教育厅哲学社会科学重点研究基地基金资助项目 (JKFXFK-001); 南京市医疗保障局委托课题 (JSDY-2024F014)

作者简介: 黄姚姚, 硕士研究生, 研究方向为中医药管理、中药质量评价。E-mail: yy0517th@163.com

*通信作者: 李 洁, 博士, 硕士生导师, 副教授, 从事中医药管理、中药质量评价研究。E-mail: li_li_2013@126.com

道地药材指具有特定产地、悠久历史、品质上乘、疗效显著的药材。这些药材的形成受到特定生态环境、土壤和气候等多种因素的共同影响，具有鲜明的地域特色和卓越品质^[1]。道地药材不仅主要有效成分含量较高，高活性成分含量也较高，从而保证了其出色疗效^[2]，道地药材与我国特有的生态地理环境、传统文化背景及古代中医药理论息息相关^[3]。其产区通常位于特定的地理区域，这些区域因其独特的自然环境和历史条件，成为某些药材生长的最佳地点，如安徽亳州、浙江杭州等是白芍的道地药材产区^[4]。随着中医药的发展和栽培技术的进步，道地药材的产区已远远超过原有的分布区，产地变迁具有普遍性。尽管，人们已经意识到种质资源质量、生态环境、生产措施等对中药材质量具有重要影响^[5]，但如何认知中药材的种质与环境的相互作用机制，以及这种作用机制对中药材有效化学成分的形成、增加或减少的影响依然是一大难题，道地药材产区变迁对中药材质量的影响也鲜有深入研究。

道地药材的概念与其质量形成具有多维特征，以往研究者从不同的视角进行了解读。由道地的区域特征含义来理解，刘彩霞等^[6]通过对四川道地药材川芎的研究，认为道地药材是在产地独特的气候、土壤下形成了较高质量的药材。也有研究者认为社会环境是道地药材质量形成的重要因素。如梁飞等^[7]通过对明清时期的历史分析，认为药材市场的兴盛、药邦会的出现、栽培及炮制加工技术的成熟等市场与人文因素，造就了道地药材更符合临床应用需求与在市场上更具竞争力的好质量。药材本身的种质资源特征也是质量的关键决定因素。赵露颖等^[8]通过对以往相关文献的总结，发现道地药材与非道地药材的遗传特征存在差异性，道地药材的种质具有遗传多样性，这保证了药效的稳定遗传。此外，分子标记等现代技术的发展也为道地药材质量的控制提供了新的手段^[9]。

综上，研究者对道地药材的质量研究进行了一定的探索，但仍有待进一步深入研究：（1）药材种质在环境胁迫下如何通过适应性调节和遗传机制来影响药材质量；（2）药材种质和环境因素之间相互塑造的作用机制；（3）逆境胁迫程度划分的标准及不同胁迫程度对药材质量的具体影响。

因此，在前人研究的基础上，本研究主要从以下 4 方面进行探讨：（1）总结“种质”与“环境”

的相互塑造作用机制对道地药材质量的影响，系统探讨了逆境与种质的相互依赖关系，明确道地药材的好品质源于 2 个因素相互塑造机制的共同作用；（2）关注到种质抗逆力对药材质量的重要影响，并基于生态韧性理论解释中药植物逆境出质量的原因与韧性构成部分；（3）对生态环境胁迫程度，即基于道地药材的韧性对逆境的程度进行轻度、适度、重度的划分与界定，提出逆境需适度，解释中药植物在不同等级逆境下的生理状态与次生代谢产物的形成及含量变化。最后，为药材质量与产量均衡的总体质量提升，本研究还补充讨论了道地药材的种质、逆境、药材质量与产量之间的平衡关系，并建立“种质+区域气候+小生境”的道地药材现代栽培管理模式，为道地药材的科学种植提供实际参考意义。

1 种质对道地药材可遗传品质的稳定性作用

1.1 中药材种质的内涵

中药材种质，又称中药材遗传质，指的是决定中药材生物遗传性状并将其遗传信息从亲代传给子代的遗传物质的总称^[10-11]。这一定义涵盖了中药材从基因到整个生物体的各种遗传资料，包括但不限于种子、花粉、茎尖和芽。就中药材而言，种质不仅可决定其遗传性状，还能决定其对环境条件的适应能力、抗病虫害能力等。道地药材的种质，是决定药材质量的遗传物质基础，是道地药材质量形成的关键因素之一。种质资源包含了特定基因，这些基因是药材道地性形成的核心^[12]。具体而言，优良的种质资源是道地药材形成的遗传因素，种质资源中的特定基因对于药材的质量和疗效具有决定性作用。因此，种质是道地药材生物学基础的重要组成部分，直接影响着道地药材的药用成分含量和最终临床效果。

1.2 不同种质对道地药材质量的影响

中药材种质是道地药材质量的根本品质保证，是中药材适应环境的能力和进化的基础。不同种质在基因和染色体水平上的丰富变异，导致各种质在形态结构、生长发育、生理代谢等方面产生丰富的变异，这些变异直接或间接作用于药材质量形成，造成种质的质量差异。以黄芪为例，不同品系的黄芪在抗病性和有效成分含量上表现出显著的差异性，蒙古黄芪对白粉病有强抗性，而晚花型膜荚黄芪有较高黄芪皂苷^[13]。这种种质差异性在其他道地药材中也同样显著。如金银花的不同种质在超高效液相色谱

法多指标含量测定和指纹图谱建立下,显示出有效成分含量的明显差异^[14]。差异不仅存在于不同产区之间,即使是同一产区内,不同品种和类群的地黄也表现出药用成分含量的差异^[15]。这些案例证实了中药材种质在道地药材药用成分含量上的遗传作用。种质的遗传多样性为药材提供了丰富的遗传背景,这些遗传背景在不同的环境条件下,通过自然选择和人工选择,形成了具有特定药用价值的药材。这种选择过程不仅涉及抗病性、生长速度等表型特征,还包括中药材中药用成分的合成和积累。

1.3 不同种质对道地药材产量的影响

中药材产量也受到遗传特性的影响,种质的优劣对中药材产量具有显著影响。对黄芩产量的研究表明,不同种源黄芩的花期、株高、分枝数等存在差异^[16]。优质种质在保持高产量的同时,也能保证其品质不显著受损。如一级甘草苗和二级甘草苗比三级甘草苗的产量更高,质量更稳定,还易获高产、优质的甘草药材^[17]。以上研究表明种质资源的优化选择对道地药材质量和产量的影响至关重要。

2 环境对道地药材质量提升的影响分析

2.1 环境的内涵

“道地”药材一词中,“道”源于古代的行政区划,“地”为“道”下的具体产地。因此,地为环境,即道地药材所处的生长环境,通常认为环境仅含地形、土壤、气候等自然因素,实际上这一概念包含了宏观、微观和人文生态环境^[18]。宏观生态环境主要指的是较大地理区域内的自然环境条件,如气候、土壤类型、山川河流地形等。这些因素对道地药材的生长发育和化学成分的积累有重要影响。如苍术道地药材原产地的生境特征包括年均温、冷月平均最低温度、热月平均最高温度、极端低温、旱季长度和年降水量等^[19]。微观生态环境指更具体的地理环境条件,如山水形成的微气候、不同区域土壤微生物群落、土壤类型及化学性质等。中药微生物生态研究表明这些微观生态因素直接或间接参与药材的生长发育和代谢过程,对药材的品质形成具有重要影响^[20]。人文生态环境是人类活动对药材生长的影响,如中药材保护利用的历史实践、野生中药材的驯化种植、采集加工存储方法、中医药文化传统等,人文生态环境不仅影响药材生长的条件,还会通过改变自然环境影响药材品质。

2.2 不同环境对道地药材质量的塑造作用

我国传统中医药早在“道地药材”这一概念提

出之前,就已经认识到环境对中药材质量的影响,这一观点在多本医药学著作中有所体现。秦汉时期,《神农本草经》言:“土地所出,真伪新陈,并各有法”,强调了药材产地对药效的影响。南北朝时期,《本草经集注》记载:“诸药所生,皆有境界”,意指药材的生长离不开所处天地的滋养。此后的《新修本草》《千金翼方》等也延续了这一思想。至明代,“道地药材”的称谓正式提出。“道地”一词最早出现在明代《本草品汇精要》,用于说明中药材的最佳产地,该书对五味子的记载为:“五味子,高丽建平者佳。”说明五味子以建平产为佳。后“道地药材”一词在明末汤显祖所著《牡丹亭》中记载为:“好道地药材”,表明道地药材已经成为中药材好质量的广泛认知术语。环境对道地药材质量的塑造可以从道地药材有效成分的产生过程来理解。

首先,宏观生态环境提供了药材生长发育和有效成分合成的基本条件。温度、湿度、光照和降雨量等宏观环境因子是道地药材生长的根本要素,也是“道地性”的由来,这些因子直接影响着药材的生长周期和次生代谢产物的积累。如苍术的生长发育受到高温和降雨量的影响,年均温高于 15℃,冷月平均最低温度为-2~-1℃,热月平均最高温度在 32℃左右,极端低温在-17~-15℃,年降水量为 1 000~1 160 mm 的气候条件有助于苍术挥发油含量的形成,从而影响其质量^[19]。产于茅山地区的苍术自古质量上乘,因有“茅苍术”的称谓而区别于其他地区的苍术。茅山为亚热带季风气候,有气候温暖、雨量充沛、光照充足等特点,从现代研究来看,正是适合苍术生长的产区。

其次,微观生态环境在道地药材的生长过程中直接影响着次生代谢产物的形成。根际土壤中微生物通过与中药植物根系的互作,可以产生植物生长调节剂和抗生素等物质,直接或间接影响药材的生长、发育、性状和代谢^[20]。微生物能够帮助植物吸收土壤中的养分,提高植物的抗逆性,从而保证药材基本生存和高品质的形成^[21]。根际微生物还可以通过抑制病原菌的生长来保护植物免受病害侵袭。如在使用生物有机肥料的情况下,微生物群落结构的变化有助于降低根腐病的发生率,并提高药材的质量和产量^[22]。微生物还可以通过分解有机物质,增加土壤中的有机质含量,从而提高土壤肥力^[23]。

最后,传统种植、采集和加工方法对道地药材的药效成分保留或增强具有重要影响。栽培技术的

规范化、区域化是保证药材质量的关键,栽培技术和采集加工方法可以有效提高药材中主要成分和高活性成分的含量^[24],如在霜后采集的霜桑叶其黄酮含量更高^[25]。适当的干燥和储存条件可以防止中药材活性成分的降解,以及特定的加工技术则可以更好地保留药材中的有效成分^[26],如黄精需要九蒸九晒增其疗效^[27]。

2.3 不同环境对道地药材产量的影响

环境因素对道地药材产量的影响具有多重性,涉及气候条件、土壤特性和根际微生物等因素。这些因素共同作用于药材生长过程中,不仅影响药材的生长质量,还直接影响其产量。如温郁金的产量受 5~6 月的均温、8~10 月高温天数及降雨量的影响^[28],大枸杞受气候变化导致其种植面积缩小、产量减少^[29]。根际微生物通过提高植物的养分吸收效率,促进了药材产量^[21],而土壤退化、酸化和重金属污染等不良环境则导致药材产量下降^[30]。然而,在最适生长条件下,虽然药材的产量较高,但缺乏逆境胁迫和过多营养供应从而导致植物的次生代谢产物积累不足,造成高产低质的现象。相比之下,适度的逆境条件能够激发植物的防御机制,促进次生代谢产物的积累,在不影响产量的情况下,提升药材质量。因此,优质种质与适度逆境的匹配,是道地药材质量和产量平衡的关键。

3 逆境与中药材种质的相互塑造作用是道地药材质量形成的核心机制

3.1 逆境的内涵

逆境指对植物生长发育不利的影响因素,可分为非生物胁迫(干旱、盐碱、低温、高温等)和生物胁迫(病虫害等)2 种类型^[31]。逆境会影响中药植物的生理生化过程,导致中药植物的生长受阻甚至死亡。但现代科学研究发现逆境对中药植物的影响不仅只是负面的,也可以产生积极影响。这是由于中药植物在面对逆境时并非是完全被动的,而是会主动通过复杂的生理和分子机制来适应和缓解逆境的威胁与损害,如持续调节激素水平、增强抗氧化系统等提高对逆境的忍耐力^[32],以及积累糖苷元等保护物质来提高自身抗逆能力^[33]。表明逆境对于植物既是一种外界胁迫因素,也是一种塑造因素,是驱动其增强对环境适应性的重要动力。

3.2 韧性理论视角下逆境对道地药材质量的影响

3.2.1 生态韧性与中药植物韧性理论 韧性又称抗逆力、恢复力。韧性理论最早起源于生态学学科,

生态学家 Holling^[34]提出韧性是生态系统在受到干扰后仍然能够恢复自干扰前的能力,即系统在面对压力、变化时的适应能力或恢复力。后经学界不断研究,又提出了工程韧性和生态韧性。工程韧性仅认为韧性是系统在干扰后恢复原状的能力;生态韧性则意识到韧性除了是系统维持稳态的能力,更是系统在受到冲击后进一步自我更新、自我组织成适应性更强的系统的能力,即系统具有创新和学习能力^[35]。简而言之,韧性不仅是系统的自我修复,也是系统的自我进化。韧性理论在心理学领域也有体现。心理韧性是个体面临逆境、压力下能够维持、恢复和增强心理健康的能力^[36],是个体在外界刺激下不仅未被击垮,甚至还发展出更好心理素质的能力^[37]。从以上理论及视角,本研究认为中药植物作为一种宏观生态环境下的小型系统,与其所处生态环境发生了相互塑造作用。首先,适度的逆境激发了中药材的抗逆性,促进其次生代谢产物的积累,提升药材质量。其次,中药材的生长和适应性又增强了生态环境的抗干扰能力,塑造了局部生态环境的韧性。因此,中药材在逆境条件下展现出明显韧性,这种韧性体现为植物在不利环境中的自我保护与适应能力,也与所处环境相辅相成,彼此相互作用。具体而言,3 种能力共同构成了中药材的植物韧性^[38]:(1)抵抗力,是中药材能够在适度逆境下维持生命稳态、保持基本生理功能的能力;(2)恢复力,是中药材在遭受逆境胁迫后能够自我调节至恢复正常的能力;(3)适应力,是中药材能够在适度逆境下进一步提升抗逆能力并遗传下去的能力。

3.2.2 中药材产生韧性的原因与路径 在中药材韧性中,活性氧起到了关键作用。活性氧是韧性产生的原因,也间接造成了中药材有效成分含量的增加。活性氧是一类由氧气转化而来的自由基和具有高反应活性的离子或分子,这些物质在植物细胞中广泛存在^[39]。尽管,活性氧在高浓度下会对植物细胞造成氧化损伤,但低浓度的活性氧可以作为信号分子,参与调控植物的多种生理过程^[40]。活性氧在植物的生长发育、防御中发挥重要作用,次生代谢产物的积累同样也是防御的一种方式,并且次生代谢产物往往是中药材中的防治疾病有效成分^[2]。除了改变代谢途径和调节抗逆基因表达,中药材还会在逆境中发生表观遗传^[41],即基因表达可遗传,这种遗传让后代同样有能力去适应逆境带来的伤害^[42]。

因此,中药植物通过韧性在逆境下存活甚至发

展出更高质量的路径为中药植物受到干旱、水淹、高温、强光等不同程度的逆境胁迫→逆境胁迫累积到一定程度→足量逆境导致中药植物代谢紊乱,植物体内开始积累活性氧维持自身生命稳态→活性氧作为信号分子调控中药材激活渗透调节物质(如脯氨酸、可溶性糖)和不断合成防御性次生代谢产物,以此消除活性氧对植物本身的伤害→短期处于适度逆境下,中药材被诱导产生更多次生代谢产物,中药材质量得到提高→长期处于适度逆境下,中药材发生固定化及遗传抗逆基因。需要重点强调的是,“适度”是植物韧性存在和中药材质量提升的前提,“度”既包括逆境的胁迫度,也包括植物种质的抗逆度,逆境在不超过种质所能承受的度(温度、光照、水分等)的前提下,植物才能通过韧性抗逆。一旦“逆境”过度,韧性将无法运作。不同种质有不同的度,不同逆境也有不同的度,当种质与逆境的度相匹配、相适应、相配合时,道地药材的高质量在自身种质与外界逆境的作用下产生。

3.3 逆境强度差异与药材质量演变:种质与环境的协同作用

逆境对中药材的生长发育有显著影响。在植物的生长环境中,存在着对植物生长不利的因素,这些因素称为“逆境”。依据道地药材种质的韧性力,逆境可分为轻度、中度和重度。

3.3.1 轻度逆境 种质基础决定的质量平稳态轻度逆境指不利因素对道地药材影响相对较小,不足以造成其生长受限或生理显著变化的环境。轻度逆境对道地药材的影响有限,药材质量并不会因为轻度的不利环境条件而发生较大的改变,药材质量如何主要是取决于其种质的优劣^[43],道地药材种质韧性主要表现为大量抵抗力和少量恢复力。如轻度干旱胁迫下(干旱时间为4~6 d)甘草会通过渗透调节能力减缓组织失水和调整水分状态来抵御轻度的干旱,保证自己的吸水和保水能力^[44]。相较于未经干旱胁迫的小胡杨样本,轻度干旱胁迫下的小胡杨样本发生了调节自身光合机制、调整水分利用效率和气孔导度等适应干旱并保持生长活力,表明道地药材在轻度逆境中以抵抗力(启动防御机制)为主^[45]。也有研究发现黄芩在轻度干旱胁迫下,一方面存在保护机制来抵抗干旱和恢复“活力”^[46],另一方面还积累了少量的黄酮类成分。但轻度逆境的促积累程度是有限的,说明轻度逆境不足以促进次生代谢产物的大量积累。可见,在轻度逆境中,

以抵抗不利因素和修复自身为种质的主要韧性表现,这种少量韧性使中药材的质量趋于稳定和维持现状,质量上未能有明显提升或下降。因此,逆境程度的界定可以由道地药材种质的生理生化指标、化学指标和生长指标来衡量。轻度逆境下,道地药材的生长指标(外部形态、生物量)和化学指标(有效药用成分或活性成分)无显著变化,生理生化指标则变化显著。可能表现为脯氨酸、可溶性糖等的显著增加和超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶(peroxidase, POD)等的活性降低。

3.3.2 中度逆境 种质与逆境协同的质量上升态中度逆境也称适度逆境。对于道地药材而言,中度逆境指适度的生态环境胁迫,如适度的干旱、低温、盐或其他不利环境因素。以干旱为例,“度”可以指干旱天数和干旱强度,适度干旱即干旱持续时间和土壤水分含量、相对湿度等指标是适度的。这些环境压力在与种质的相互作用上,能够刺激植物产生更多的次生代谢产物和有效成分含量积累,并使植物不致于难以存活。在中度逆境中,药材质量会呈上升趋势发展,但质量的上升结果由种质和环境的适配程度高低而决定,这是由于不同种质在遗传差异下对逆境的响应能力和次生代谢产物种类等存在差异^[2]。优质种质的道地药材在适度逆境中表现出更强的抗逆能力,其防御相关基因能够更有效地被激活^[47]。同时,表现出更强的抗氧化能力、更高水平的抗胁迫基因表达。通过抗氧化机制、次生代谢产物积累,为有效成分的合成与积累提供了基础^[47-48]。在生态胁迫的适度刺激与压力的环境下,种质韧性表现为抵抗力、恢复力、适应力的有机结合。并且可以推测,三者有一定的演进顺序,抵抗力、恢复力构成适应力形成的前提,适应力则是抵抗力和恢复力综合作用的最终体现,“逆境胁迫度”的刺激是适应力出现的关键。

道地药材质量正是在这3种韧性能力依次发挥作用的过程中得到优化和提升。如在对北苍术的干旱胁迫实验中发现随着聚乙二醇 6000(polyethylene glycol 6000, PEG-6000)溶液浓度的升高(模拟的干旱胁迫加剧),北苍术中的苍术素、 β -桉叶醇、苍术酮、白术内酯 II 的含量也在增加^[49]。具体而言,20% PEG 处理组在第2天时苍术素提高了51.0%,10% PEG 处理组在第4天时苍术素提高了34.7%。在对垂盆草的低温胁迫和外源过氧化氢(H_2O_2)预处

理中^[50], 也有适度逆境增加药材质量的证明。垂盆草的质量(以黄酮类成分为代表)在低温下与 H_2O_2 呈剂量相关性, 但是黄酮类成分在 H_2O_2 10 mmol/L 达到峰值后下降, 其他研究中有类似证明^[51]。以上结果表明, 在适度逆境中, 道地药材在不断抵抗、防御逆境过程中, 促进了次生代谢产物的合成和积累, 从而显著提高了药材有效成分的含量, 进而提升药材疗效。因此, 道地药材的高品质应为优质种质与适度逆境协同作用的结果。适度逆境下, 植物的生长指标无显著变化, 生理生化指标和化学指标则变化显著。可能表现为脯氨酸、可溶性糖等的显著增加, 有效药用成分或活性成分的增加, 及 SOD、POD 等活性的增强。

3.3.3 重度逆境 基于种质抗逆性的质量下降态重度逆境也称过度逆境, 是道地药材所处的极端环境, 表现为植物种质所受到的环境条件严重超过了该植物种质所能承受的程度, 使植物生长受阻甚至死亡。在重度逆境下, 植物种质的韧性将难以作用, 道地药材的质量会相应降低, 其质量具体下降的幅度受种质抗逆性能力的影响。药材质量下降的原因在于, 虽然植物体内的活性氧具有调控防御的信号作用, 但在逆境过度胁迫的情况下, 植物的氧化还原代谢过程会受到干扰。该种干扰导致活性氧过量积累, 进而从内部产生氧化胁迫^[52], 造成植物脂质、蛋白质和 DNA 损伤^[53]。刘艳等^[44]研究发现在重度的干旱胁迫(干旱时间为 12~14 d)下, 甘草幼苗有外部形态受损、活性氧代谢紊乱等表现, 造成甘草幼苗的功能结构破坏。马生军等^[54]发现甘草在适度锰胁迫下活性氧受到清除, 在高度锰胁迫下活性氧则大量积累产生氧化胁迫, 使植物功能受损。以上研究证实了重度逆境对道地药材的损害, 逆境一旦过度不仅不能产生正向质量影响, 还会对道地药材生存造成死亡威胁。重度逆境下, 道地药材的生长指标、生理生化指标和化学指标均变化显著。可能表现为根长减小、叶片枯黄, 活性氧的大量增加, 有效药用成分或活性成分显著减少, SOD、POD 等活性先增强后因代谢失调而减少, 具体情况取决于胁迫的类型和持续时间。

4 结语

近年来, 学界对道地药材的定义、产地等存在争议, 一些研究者甚至认为“道地药材”只是历史说辞, 不符合现代发展, 并对道地药材的质量存疑。其主要原因是对道地药材质量的复杂形成机制尚

未完全认识。本研究在以往研究的基础上, 将韧性理论用于解释道地药材质量的形成应是“种质+逆境”协同作用下的成果, 并说明道地药材拥有好品质的原因在于其长期在适度逆境(道地产区)下抵抗、恢复和适应生态环境, 产生了较多次生代谢产物, 而次生代谢产物恰好是药材的有效成分。这种韧性还由前代遗传给了后代, 使其在种质上具有抗逆性, 在保护自身的前提下不断产生次生代谢产物。需要注意的是, 药材质量会随着逆境程度的变化而变化, 药材质量与逆境程度为“倒 U 形关系”, 即轻微逆境难以引起药材向更高质量的质变, 重度逆境将降低药材质量, 适度逆境才能使药材质量最佳。因此, 需要认识到“种质”与“逆境”的相互作用, 科学化、有效化、适度化评估道地产区的中药材总质量。

4.1 逆境胁迫下道地药材质量与产量的平衡管理

在道地药材的生长过程中, 适度逆境可以显著提升药材的质量。然而, 逆境利于道地药材形成的机制是逆境促进了次生代谢产物的积累, 次生代谢产物合成需要消耗大量碳源和氮源, 对产量可能有负面影响^[55]。如黄连在干旱胁迫下, 其抗氧化酶活性降低, 生理损伤直接影响根系生长和产量^[56]。桔梗在营养期和果期受重度干旱胁迫后, 初生代谢物受损较大^[57]。干旱胁迫通过影响党参的生理状态和代谢过程, 将破坏其正常生长^[58]。但也有研究发现适度的干旱胁迫可以提升苦荞的产量与质量^[59]。可见, 逆境对道地药材质量和产量的影响是复杂的, 在实际生产过程中, 需要考虑道地药材产量和质量的平衡发展。一方面, 应该基于适度的逆境胁迫, 通过对药材的外源性措施来控制药材产量的减少。如喷施水杨酸可以消除干旱的毒性效应从而提高水稻产量^[60], 外源一氧化氮可以缓解高温胁迫对半夏抗氧化酶活性的影响^[61]。另一方面, 还应该深入探讨不同种质与逆境程度组合下药材质量与产量的变化关系。种质作为道地药材质量和产量变化的内在因素, 逆境作为外部胁迫因素, 将二者综合起来研究有助于发现药材质量与产量的平衡点, 从而在不降低产量的前提下最大化提升药材质量。

4.2 道地药材逆境胁迫诱导技术的创新与应用

道地药材应是在特定逆境区域生长的中药材, 逆境胁迫是道地药材形成优良品质的重要因素。通过研究和模拟自然环境中的逆境条件, 能够极大地维护和传承道地药材的独特性质。现有研究在逆境

对药材的影响机制上存在不足,为提升道地药材的质量和药效,同时更好地维护其产量产出的稳定性,应进一步加强对逆境胁迫条件与药材种质、质量关系的研究,尤其是针对不同逆境条件对不同中药材次生代谢途径的影响,明确干旱、低温、高盐等因素如何促进次生代谢产物的积累。并且推动逆境胁迫技术在人工种植中的应用。通过精细化调节光照、水分、温度或土壤盐度等环境因素,模拟自然胁迫条件,提升非道地产区药材的质量,及减少对天然道地产区的依赖,可以推动中药材产业的可持续发展。尤其在道地产区受到环境破坏或资源限制的情况下,逆境胁迫技术的引入能够有效弥补传统生产模式的不足,保障道地药材的持续供应。同时,可以通过引进适应性强的药材品种及特定种质,并进行驯化改良,使其逐渐适应新的生态环境。采用科学的引种驯化技术,可以实现中药产业的多元化和提高整体产业链的稳定性与可持续性。

4.3 道地药材逆境敏感度的分类与验证

逆境敏感度是中药植物在遭遇逆境时,植物对胁迫的反应强度和适应能力。在某特定胁迫下,高敏感的植物会表现出明显的质量提升或生长受损,而低敏感的植物则不容易受逆境的影响,可能表现为生长平稳或适应性差。因此,理解不同道地药材的逆境敏感度有助于优化栽培管理和提高道地药材产量与质量。逆境敏感度与中药植物的种质相关,基于不同种质,同一品种的植物在同一逆境程度下也会表现出不同的敏感度。目前,学界在对逆境与药材质量的研究中,部分研究者通常以基于某一种质得出的能提升质量的特定“适度逆境”而当作是该类药材的普适化“适度逆境”,这是一种忽视种质影响的片面认识。刘叶等^[62]发现不同种质的穿心莲面对同样的干旱胁迫时药效成分含量呈不同变化。在同样的条件下,于不同种质间,抗旱能力好的穿心莲其药效成分会增加,抗旱能力差的药效成分则会下降。这说明即使是同一种药材,对于不同种质而言,逆境“程度”是因“种质”而异的。

逆境需要“因种定度”,对于种质 A 而言的轻度逆境,可能是种质 B 的适度逆境,也可能是种质 C 的重度逆境。进一步说明了道地药材与非道地药材的质量可能区别不仅在于“区域”环境,更在于种质与环境的相互作用。因此道地药材应是在多年与适度逆境胁迫的抵抗与适应中存活下来并质量较好的高敏感植物。其种质经多年基因积累、传承

而有较强的抗逆性,并与当地环境相互作用,使得该种道地药材的质量比非道地药材更佳。为了更进一步地挖掘道地药材的科学内涵并提升中药材的普遍质量,必须对道地药材的逆境敏感度进行分类验证。首先,需要对不同道地药材的逆境敏感度进行详细的实验分类,确保根据其种质特性,验证不同逆境条件下道地药材的生理生化指标、化学指标等具体变化,进而找到提高药材质量的适度逆境条件。其次,可以通过数据分析和结果验证,识别出特定逆境条件下表现优质的种质,为中药材的种质改良、栽培管理提供有效指导。最后,复合胁迫(如干旱+高温)对植物也能产生独特影响^[63-64],但当前文献更多讨论单一逆境胁迫,复合胁迫的研究或将成为未来深入研究和发展的方向。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 金世元. 论道地药材 [J]. 中药研究与信息, 2001, 3(11): 11-12.
- [2] 孟祥才, 邓代千, 杜虹韦, 等. 高品质道地药材的科学内涵 [J]. 中草药, 2023, 54(3): 939-947.
- [3] 何婷, 巩颖, 刘文亚, 等. 道地药材的特性内涵 [J]. 现代中医临床, 2014, 21(2): 58-60.
- [4] 梁伟龙, 林钦贤, 王斌, 等. 道地与非道地产区白芍药材质量的比较 [J]. 中国现代应用药学, 2020, 37(24): 3000-3004.
- [5] 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.
- [6] 刘彩霞, 廖梦霞, 邓天龙. 川产道地药材川芎的品种和质量 [J]. 中草药, 2004, 35(10): 124-126.
- [7] 梁飞, 李健, 张卫, 等. 谈“道地药材”的形成原因 [J]. 中国中药杂志, 2013, 38(3): 466-468.
- [8] 赵露颖, 施梦瑶, 张巧艳, 等. 道地药材品质特征及形成机制研究进展 [J]. 中草药, 2022, 53(21): 6931-6947.
- [9] 王晶娟, 刘洋, 赵保胜, 等. 质效代关联理论在道地药材质量研究中的应用分析 [J]. 中草药, 2015, 46(2): 157-162.
- [10] 吴裕. 浅论植物种质、种质资源、品系和品种的概念及使用 [J]. 热带农业科技, 2008, 31(2): 45-49.
- [11] 晏景中. 《中华人民共和国种子法》中种质资源保护相关条款解读 [J]. 植物遗传资源学报, 2023, 24(6): 1820-1821.
- [12] 詹海仙, 杜晨晖, 李睿, 等. 药用植物质量性状的分子研究进展 [J]. 世界科学技术—中医药现代化, 2020, 22(8): 2893-2898.

- [13] 曹建军. 中药黄芪种质资源及环境因素对品质的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
- [14] 王淑, 张翠翠, 郭凤丹, 等. 基于 UPLC 多指标含量测定和指纹图谱的不同种质金银花药材质量评价研究 [J]. 中草药, 2024, 55(3): 947-955.
- [15] 马梦雨, 谢小龙, 田梦平, 等. 地黄主要品种的药材品质评价研究 [J]. 时珍国医国药, 2023, 34(4): 983-986.
- [16] 陈君, 杨世林, 程惠珍. 不同种源黄芩生长发育特性初步观察 [J]. 中药材, 2002, 25(11): 777-778.
- [17] 侯嘉, 闫立本, 赵贵亮, 等. 甘草种苗等级与植株生物量积累及药材产量和质量的关系 [J]. 中药材, 2015, 38(2): 221-226.
- [18] 刘付松, 任艳, 吴发明, 等. 中药材“道地论”的生态内涵 [J]. 中华中医药杂志, 2023, 38(11): 5551-5556.
- [19] 郭兰萍, 黄璐琦, 阎洪, 等. 基于地理信息系统的苍术道地药材气候生态特征研究 [J]. 中国中药杂志, 2005, 30(8): 565-569.
- [20] 乔卿梅, 程茂高, 王新民. 根际微生物在克服药用植物连作障碍中的潜力 [J]. 土壤通报, 2009, 40(4): 957-961.
- [21] 冯璞阳, 赵艳妮, 陈卫锋, 等. 药用植物根系分泌物与根际微生物互作研究进展 [J]. 现代农业科技, 2024(17): 159-162.
- [22] Huang B, Chen Y X, Cao Y, *et al.* The structure and function of rhizosphere bacterial communities: Impact of chemical vs. bio-organic fertilizers on root disease, quality, and yield of *Codonopsis pilosula* [J]. *Front Microbiol*, 2024, 15: 1484727.
- [23] Wang G, Ren Y, Bai X J, *et al.* Contributions of beneficial microorganisms in soil remediation and quality improvement of medicinal plants [J]. *Plants*, 2022, 11(23): 3200.
- [24] 张燕, 郝庆秀, 黄璐琦, 等. 道地药材特色栽培和产地加工技术规范 [A] // 第十九届中国科协年会——分 12 标准引领中医药学术创新发展高峰论坛论文集 [C]. 长春: 中国科学技术协会, 2017: 41-42.
- [25] 王丽, 文海朝, 张凌峰, 等. 不同经霜时间霜桑叶品质的变化规律 [J]. 蚕业科学, 2023, 49(4): 299-312.
- [26] 张润, 陈千良, 胡河荷. 干燥方法对秦艽药材中有效成分含量的影响 [J]. 时珍国医国药, 2019, 30(6): 1348-1351.
- [27] 秦宇雯, 张丽萍, 赵祺, 等. 九蒸九晒黄精炮制工艺的研究进展 [J]. 中草药, 2020, 51(21): 5631-5637.
- [28] 吴志刚, 陶正明, 冷春鸿, 等. 基于生态环境因子的温郁金道地性研究 [J]. 中药材, 2010, 33(6): 863-866.
- [29] Li J L, Deng C R, Duan G Z, *et al.* Potentially suitable habitats of *Daodi* goji berry in China under climate change [J]. *Front Plant Sci*, 2024, 14: 1279019.
- [30] 杨晖, 陈四清. 道地药材的环境影响及保护和发展 [J]. 时珍国医国药, 2015, 26(8): 1971-1972.
- [31] 张晶红, 那杰. 植物逆境胁迫耐受性启动子的研究进展 [J]. 植物生理学报, 2014, 50(6): 707-710.
- [32] Seleiman M F, Al-Suhaibani N, Ali N, *et al.* Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects [J]. *Plants*, 2021, 10(2): 259.
- [33] Cisse E H M, Li D D, Zhang J, *et al.* Responses of woody plant *Dalbergia odorifera* treated with glycine betaine to drought and cold stresses: Involvement of the alternative oxidase [J]. *Biologia Plant*, 2022, 66: 56-66.
- [34] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems [J]. *Annu Rev Ecol Syst*, 1973, 4: 1-23.
- [35] Carl F. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses [J]. *Glob Environ Change*, 2006, 16(3): 253-267.
- [36] 席居哲, 桑标, 左志宏. 心理弹性 (Resilience) 研究的回顾与展望 [J]. 心理科学, 2008, 31(4): 995-998.
- [37] 于肖楠, 张建新. 韧性 (resilience): 在压力下复原和成长的心理机制 [J]. 心理科学进展, 2005, 13(5): 658-665.
- [38] 王田野, 王平, 吴泽宁, 等. 干旱胁迫下植被生态韧性研究进展 [J]. 地球科学进展, 2023, 38(8): 790-801.
- [39] 张梦如, 杨玉梅, 成蕴秀, 等. 植物活性氧的产生及其作用和危害 [J]. 西北植物学报, 2014, 34(9): 1916-1926.
- [40] 张怡, 路铁刚. 植物中的活性氧研究概述 [J]. 生物技术进展, 2011, 1(4): 242-248.
- [41] Gayacharan, John Joel A. Epigenetic responses to drought stress in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Physiol Mol Biol Plants*, 2013, 19(3): 379-387.
- [42] 冉莉萍, 孔月琴, 方婷婷, 等. 逆境胁迫下植物表观遗传机制的研究进展 [J]. 生物技术通报, 2014, 30(8): 8-15.
- [43] 杨婷婷, 钟可, 郭茜, 等. 种质与环境对金钗石斛药材品质的影响 [J]. 安徽农业科学, 2022, 50(9): 163-170.
- [44] 刘艳, 陈贵林, 蔡贵芳, 等. 干旱胁迫对甘草幼苗生长和渗透调节物质含量的影响 [J]. 西北植物学报, 2011, 31(11): 2259-2264.
- [45] 齐容镰, 莎仁图雅, 李钢铁, 等. 干旱胁迫对小胡杨 2 号幼苗光合及生理特征的影响 [J]. 干旱区研究, 2020, 37(6): 1552-1561.
- [46] 管仁伟, 郭瑞齐, 林慧彬, 等. 基于植物代谢组学技术的干旱及盐胁迫对黄芩中黄酮类成分影响的研究 [J]. 中草药, 2022, 53(5): 1504-1511.
- [47] 马玲芳. 不同种源银柴胡质量综合评价研究 [D]. 银川: 宁夏大学, 2020.

- [48] 苏文华, 张光飞, 李秀华, 等. 植物药材次生代谢产物的积累与环境的关系 [J]. 中草药, 2005, 36(9): 1415-1418.
- [49] 赵楷, 姚杰, 于鹏程, 等. 干旱提高北苍术药材质量的生物学机制 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2023, 29(13): 180-187.
- [50] 赖秋洁, 崔运启, 朱再标, 等. 外源 H_2O_2 预处理对垂盆草抗寒性及药材产量和品质的影响 [J]. 中草药, 2022, 53(21): 6874-6880.
- [51] 郭慧敏, 丛薇, 付晓莹, 等. $Na_2S_2O_4$ 通过诱导环境胁迫次生代谢提高五味子药材质量机制研究 [J]. 现代中药研究与实践, 2018, 32(3): 1-5.
- [52] 曹家畅, 周倩, 龚明. 细胞氧化还原状态在植物对干旱胁迫响应与适应中的作用 [J]. 安徽农业科学, 2018, 46(28): 6-10.
- [53] 邱振楠. 水稻高温高光敏感突变体 *Is1* 的筛选及基因功能研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [54] 马生军, 王文全, 杜润清, 等. 锰胁迫对甘草生理和生长特性的影响 [J]. 西北药学杂志, 2015, 30(1): 4-8.
- [55] 陈红贤, 于笑笑, 王晨阳, 等. 国槐槐角种胚细胞悬浮培养的动力学研究 [J]. 浙江农林大学学报, 2016, 33(2): 272-279.
- [56] 田桂香. 干旱、盐碱和温光胁迫对黄连 (*Coptis chinensis* Franch) 生理作用的影响 [D]. 重庆: 西南大学, 2006.
- [57] 李敏. 水分生态胁迫对桔梗皂苷生物合成的分子机制研究 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2021.
- [58] 王惠珍, 陆国弟, 陈红刚, 等. 干旱胁迫对成药期党参生理特性的影响 [J]. 中国中医药信息杂志, 2018, 25(3): 72-76.
- [59] 周良. 干旱胁迫对苦荞产量形成和药理活性的影响 [D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2020.
- [60] 刘晴, 孙露宏, 高世伟, 等. 干旱胁迫下水杨酸对不同耐旱性水稻品种生长和生理特性的影响 [J]. 中国稻米, 2025, 31(1): 27-34.
- [61] 王春艳. 外源 NO 对高温胁迫下半夏生长及品质影响的研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- [62] 刘叶, 莫世伦, 何丽燕, 等. 不同种质穿心莲对干旱胁迫的响应情况研究 [J/OL]. 分子植物育种, [2023-03-02].
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.s.20230301.1113.011.html>.
- [63] Hussain H A, Hussain S, Khaliq A, *et al.* Chilling and drought stresses in crop plants: Implications, cross talk, and potential management opportunities [J]. *Front Plant Sci*, 2018, 9: 393.
- [64] Zandalinas S I, Mittler R, Balfagón D, *et al.* Plant adaptations to the combination of drought and high temperatures [J]. *Physiol Plant*, 2018, 162(1): 2-12.

[责任编辑 赵慧亮]