

土壤健康与药用植物生长及品质形成关系研究进展

刘芯瑜^{1,2}, 李婉云¹, 陈彩霞¹, 贺学礼², 贺超^{1*}, 李先恩^{1*}

1. 中国医学科学院药用植物研究所, 北京 100193

2. 河北大学生命科学学院, 河北 保定 071000

摘要: 土壤环境的健康与否直接决定着药用植物品质。土壤物理、化学和生物性质是评价土壤健康的关键指标, 三者的单独或协同作用对药用植物生长发育、养分吸收与代谢以及活性成分积累具有深远的影响。通过明确土壤健康内涵, 聚焦土壤健康指标(土壤物理、化学和生物性质)对于药用植物品质发育的影响, 系统介绍了药用植物在面对不同土壤条件时, 其形态、生理、生化及活性成分积累方面的响应机制, 同时阐述土壤健康指标间的相互作用对药用植物品质形成的综合影响, 旨在综述土壤环境与药用植物互作对于中药材生长和品质提升的作用机制。为优化药用植物种植环境、提高药用植物产量和质量的技术应用提供坚实的理论依据。

关键词: 土壤性质; 土壤健康; 药用植物; 生长发育; 品质形成

中图分类号: R286.2 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2026)01-0375-15

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.01.034

Research progress on relationship between soil health and growth and quality formation of medicinal plants

LIU Xinyu^{1,2}, LI Wanyun¹, CHEN Caixia¹, HE Xueli², HE Chao¹, LI Xianen¹

1. Institute of Medicinal Plant Development, Chinese Academy of Medical Sciences, Beijing 100193, China

2. College of Life Sciences, Hebei University, Baoding 071000, China

Abstract: The health status of soil environment directly determines the quality of medicinal plants. Soil physical, chemical, and biological properties are key indicators for evaluating soil health. Their individual or synergistic effects exert profound influences on the growth and development, nutrient absorption and metabolism, as well as bioactive component accumulation of medicinal plants. By clarifying the connotation of soil health, this paper focuses on the impacts of soil health indicators (soil physical, chemical, and biological properties) on the quality development of medicinal plants. It systematically reviews the response mechanisms of medicinal plants in terms of morphology, physiology, biochemistry, and bioactive component accumulation under different soil conditions, and expounds the comprehensive effects of the interactions among soil health indicators on the quality formation of medicinal plants. The purpose is to summarize the interaction mechanism between soil environment and medicinal plants for the growth and quality improvement of Chinese medicinal materials, so as to provide a solid theoretical basis for optimizing the cultivation environment of medicinal plants and promoting the technical application of increasing their yield and quality.

Key words: soil properties; soil health; medicinal plants; growth and development; quality formation

在科技迅猛发展的今天, 尽管化学合成药物与生物技术药物广泛传播并在医疗领域占据重要地位, 但作为传统医学的瑰宝, 中草药依然是不可或缺的重要药物来源之一。自古以来, 世界上半以上人口依靠

中草药治疗疾病; 时至今日, 发展中国家 80%人口仍在从传统药物中受益^[2]。随着人们健康意识的提升以及营养保健品市场的蓬勃兴起, 人们对“天然”药物和产品的需求越来越大。药用植物不同部分(根、茎、

收稿日期: 2025-09-02

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3501503)

作者介绍: 刘芯瑜, 男, 硕士研究生, 研究方向为逆境菌根生物学。E-mail: liuxinyu199906@126.com

*通信作者: 贺超, 副研究员, 从事药用植物与土壤微生物互作研究。E-mail: hc891215@126.com

李先恩, 研究员, 博士生导师, 从事药用植物道地性研究。E-mail: xeli@implad.ac.cn

叶、花、果实、种子)含有的天然活性成分(酚类、固醇类、黄酮类等)是其发挥药用价值的关键所在^[3],它们具有抗氧化、抗炎、抗菌、抗肿瘤、调节免疫等多重功能,在预防和治疗各类疾病方面展现出了巨大的潜力与应用前景^[4]。

然而,农业集约化等一系列农业实践活动给土壤环境带来了诸多负面效应,导致土壤出现酸化、干旱化、盐渍化、土壤结构衰退和微生物群落失衡等退化现象^[5],改变了土壤的物理、化学和生物性质,进而导致土壤健康受损^[6]。而土壤作为药用植物的生长基质,土壤健康的损伤会直接或间接影响药用植物对养分和水分吸收、代谢过程以及活性成分的合成^[7],最终会对药用植物品质形成产生不可忽视的影响。

目前对于土壤的物理、化学、生物性质如何单独或协同影响药用植物对养分的吸收和利用,以及如何限制高品质药用植物形成尚未完全明晰。鉴于此,深入研究土壤健康在药用植物品质形成中的作用,对于优化药用植物种植管理、提高药用植物品质、保障药用植物质量以及推动中医药产业可持续发展具有重要意义。因此,本研究着重对土壤健康如何影响植物生长发育和药用成分积累进行梳理,详细阐述土壤健康在药用植物品质形成中的作用,旨在为定向培育高产优质药用植物提供科学支持。

1 土壤健康的内涵及评估指标

1.1 土壤健康的内涵

土壤健康是指土壤在生态系统边界内,具备维持作物和动物生产力、维护或提升环境可持续性以及促进全球人类健康的能力^[8]。对于药用植物而言,可以将土壤健康理解为土壤在支持其生长的同时,不会导致土壤退化或对环境造成危害的适宜性^[9]。自 1910 年学术界首次定义“土壤健康”以来,其内涵不断丰富和拓展,早期定义主要关注与土壤肥力相关的物理和化学性质^[10]。除土壤物理化学性质外,土壤生物性质也是影响土壤健康的重要因素,土壤中的微生物是土壤肥力的重要驱动力,通过参与土壤养分矿化、调节植物激素平衡等过程,对植物生长和健康起着至关重要的作用^[11]。

随着对土壤健康研究的不断深入,生物性质在土壤健康研究中逐渐受重视。2002 年, Carter 认为应该结合物理、化学和生物方法,形成一个综合性的土壤健康评价和管理策略,进而保证植物生长能够长期、稳定地进行^[12]。2023 年首部欧盟土壤监测法中

具体指出“土壤的物理、化学和生物状况,决定其作为重要生命系统发挥功能并提供生态系统服务的能力”,并将土壤健康描述为“土壤支持生态系统服务的持续能力”^[13]。这一定义强调了土壤作为一个动态的生态系统,其物理、化学和生物性质通过相互作用,共同影响着土壤健康和生态功能,进而对植物的生长发育和品质产生深刻影响。综合来看,土壤健康的内涵已从单一的肥力概念发展为涵盖物理、化学、生物多方面且注重生态功能的综合概念,这一演变反映了人们对土壤认识的不断深化,也为药用植物品质研究提供了更全面的理论基础。

1.2 土壤健康的评估指标

土壤健康是药用植物品质形成的基础,其评估指标可以量化为物理性质、化学性质与生物性质的多维度参数。在土壤物理性质中,土壤质地、土壤孔隙度、土壤水分、土壤温度是核心指标,这些指标能够直接影响土壤通气性、持水性与抗侵蚀能力,是衡量土壤物理健康状况的重要依据^[14]。土壤化学性质主要包括土壤 pH、土壤养分、土壤盐分、土壤阳离子交换量(cation exchange capacity, CEC)等,这些指标能够综合反映土壤肥力、养分有效性等土壤化学健康状况。土壤生物性质是土壤健康评估的新兴重点领域,包括土壤微生物、土壤无脊椎动物、土壤酶活性等。土壤微生物多样性与土壤酶活性是土壤生物健康的重要表征参数,微生物作为土壤生态系统的“引擎”参与土壤养分转化、有机物分解等关键过程,其群落结构变化直接反映土壤生态功能的稳定性,而土壤酶活性可指示土壤养分转化与物质循环效率^[8,15]。此外,土壤无脊椎动物指标也能直观反映土壤生态系统健康状况^[16]。当前研究中,土壤物理和化学指标因测定方法成熟,应用较为广泛,但生物指标因其复杂性,对其及三者间相互作用的研究相对滞后。然而,土壤性质的相互作用能更敏感地反映土壤健康的细微变化,未来应加强对其的研究与应用,建立更全面、精准的土壤健康评估体系,以更好地服务于药用植物品质研究。

2 土壤物理性质对药用植物品质形成的影响

土壤物理性质作为土壤健康的重要组成部分,在药用植物品质形成中起着关键作用(图 1)。植物作为自养型生物,其生长和产量的维持依赖于根系从土壤中获取充足的水分和养分,而根系在土壤中的生长以及功能发挥与土壤物理性质存在密切联系^[17]。土壤孔隙度和含水量、土壤温度、土壤质

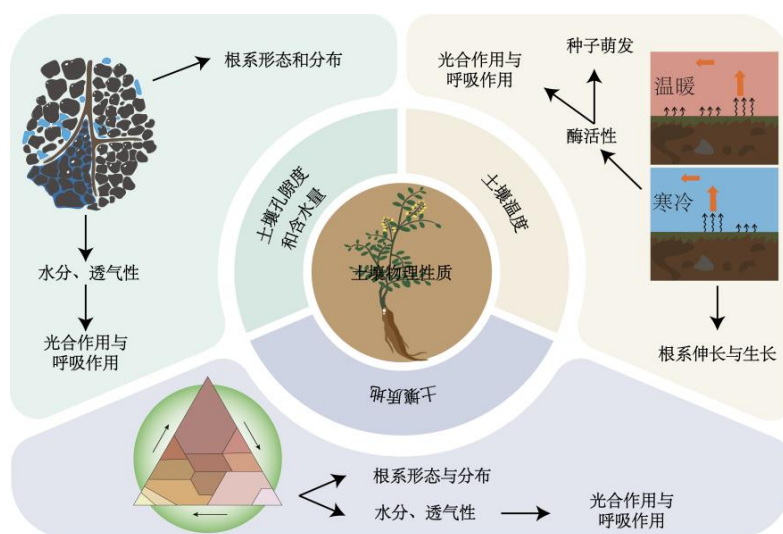


图 1 土壤物理性质在药用植物品质形成中的作用

Fig. 1 Role of soil physical properties in quality formation of medicinal plants

地及其之间的相互作用共同影响药用植物的生长发育和品质形成^[18]。

2.1 土壤质地

土壤质地是土壤最基本的物理性质之一，土壤质地主要分为砂土、壤土、黏土 3 大类别，它对土壤的透气透水以及保水保肥能力起着关键的调控作用^[19]。砂土因孔隙较多而通透性良好，但是容易造成干旱，且保水保肥性能较差；黏土孔隙小，透气透水性能较差，容易造成积水；壤土的性能则位于砂土和黏土之间^[20]。不同的土壤质地能够影响药用植物的根系分布以及对养分的吸收和利用，最终影响药用植物品质形成^[1]。

在药用植物生长发育方面，黏粒占比较高的壤砂土中盐分和电解质浓度较高，为药用植物提供了更多可利用的离子，促进了其酚类化合物合成与积累，而黏粒占比较低的砂质壤土的通气性和透水性较好，为药用植物合成和积累黄酮类化合物提供了适宜条件^[21]。例如，相较于砂土，砂壤土性质的塞拉多土壤中藜香薷 *Ageratum conyzoides* L. 的茎长、根长、干质量、叶面积等指标更高^[22]。此外，土壤质地还能通过影响菌根定殖率和土壤生物间接影响植物生长发育；例如，在砂土中，菌根具有更高的定殖率，能够间接促进植物生长和对磷的吸收^[23]，随着砂土含量增加，土壤中南方根结线虫 *Meloidogyne incognita* Kofoid et White Chitwood 等有害生物的结瘤和繁殖增多，导致植物生长发育和产量降低^[24]。

因不同药用植物的生态学和生物学特性的不

同，对土壤的性状和供肥能力的要求也有所差别，所以在药用植物栽培中要根据栽培措施和药用植物的生物学特性选择适宜的土壤质地。未来应深入探究土壤质地影响药用植物生长和品质形成的内在机制，并加强对不同质地土壤混合比例的研究，探索出针对各类药用植物的最佳土壤质地组合模式。

2.2 土壤孔隙度和含水量

土壤孔隙度是土壤孔隙在土壤中的占比，土壤孔隙为药用植物根系生长提供了空间，其大小和连通性决定着根系形态与分布^[25]，还影响土壤通气性和土壤含水量。通气性能够保证根系有氧呼吸；土壤水分作为溶剂和反应介质，不仅参与土壤中各类物质的溶解、运输以及化学反应，还为土壤生物的生存、代谢和繁殖提供生存环境^[26-27]，进而影响药用植物生长发育。

土壤孔隙度和含水量通过改变药用植物光合作用速率、次生代谢产物合成等生理生化过程，进而影响药用植物品质形成。土壤含水量较低导致的干旱会使植株矮小并显著影响植物体内酚类和黄酮类等抗氧化物的含量^[28]；土壤含水量较高则会破坏植物细胞离子和渗透平衡^[29]，使植物叶片出现坏死斑点甚至变黄脱落。例如，土壤含水量会影响七叶一枝花 *Paris polyphylla* Sm. 生物量和重楼皂苷等次生代谢物合成和积累^[30]。土壤含水量还会通过影响药用植物关键基因的表达来调控活性成分合成。例如土壤含水量会影响朝鲜淫羊藿 *Epimedium koreanum* Nakai 的生长和黄酮类、黄酮醇苷等次生

代谢产物的含量^[31]。

这些研究充分表明,土壤孔隙度和含水量对药用植物品质的影响是多途径的,并且存在一定的阈值范围。当前研究在不同药用植物对土壤孔隙度和含水量响应机制方面的探索尚显不足。未来的研究应当针对不同种类的药用植物,精确定义其最适宜的孔隙度和含水量范围,并深入探究其调控活性成分合成的分子机制。在实际应用中,可借助土壤水分传感器等现代监测技术,实现对土壤孔隙度和含水量的实时精准监测,以便及时调整灌溉策略。

2.3 土壤温度

土壤温度可以直接影响种子萌发和药用植物生长发育。种子萌发阶段,只有在适宜温度下,种子内部的水解酶、呼吸酶等生物酶才能驱动贮藏物质分解转化进程,打破种子休眠,促进胚根和胚芽生长^[32]。根系生长阶段,土壤温度能够调节植物根系细胞分裂与伸长,进而影响植物根系生长发育^[33],还能影响植物对水分和养分的摄取能力^[34]。植物生长阶段,土壤温度显著影响植物体内酶活性,进而影响光合作用、呼吸作用和蒸腾作用等生理代谢过程^[35-36],通过调节二氧化碳同化与有机物质合成过程,最终影响植物生物量^[37]。

土壤温度会通过影响关键基因表达来调控活性成分合成,例如,土壤温度可能影响参与人参皂苷合成途径中关键基因[CYP716A53v2、CYP716A47、 β -香树酯合成酶(β -amyrin synthase, β -AS)、鲨烯合成酶(squalene synthase, SS)、法尼基二磷酸合成酶(farnesyl phosphate synthase, FPS)、白桦环阿奇醇合成酶(dammarenediol synthase, DS)等]的表达水平,间接调控人参皂苷合成;低温环境下,这些基因可能被诱导表达或表达活性增强,促进人参皂苷生物合成,而高温可能抑制相关基因表达,导致人参皂苷积累减少^[38]。土壤温度对药用植物活性成分合成或积累有着不同影响,对于爪哇茶 *Orthosiphon aristatus* Miq. 生长和次生代谢物合成而言,高的土壤温度会降低总酚含量,较低土壤温度会增加总黄酮含量^[39];较高的土壤温度促进了与湿地仙草 *Platostoma palustre* A. J. Paton 品质相关的葡萄糖酸、脱氧核糖、N-乙酰甘露糖胺单糖合成的相关代谢途径,有利于单糖合成和积累^[40]。

这些研究表明,不同药用植物对温度的响应存在明显差异,在实际的药用植物生产过程中,可以对土壤温度进行有效调节,以满足不同药用植物生长以及活性成分积累的需求。当前对于整个调控网

络以及环境因素交互作用的研究较少,后续应加强对温度调控活性成分合成的分子机制研究,尤其是解析温度信号传导途径以及多因素协同作用机制,为实现精准的土壤温度控制提供更为科学、全面的理论支撑。同时,可利用智能温控设备,结合物联网技术,实现对土壤温度的精准调控和智能化管理。

3 土壤化学性质对药用植物品质形成的影响

土壤化学性质作为土壤健康的重要组成部分,对药用植物生长发育、繁殖、分布有直接或间接影响^[41]。植物的新陈代谢、生长和繁衍都高度依赖于土壤所提供的化学环境。土壤酸碱度、土壤盐分、土壤养分、土壤阳离子交换量等土壤化学性质与植物根系生理活动及对养分吸收利用紧密相关(图2)。此外,土壤化学性质的相互交织能够共同影响着药用植物的生长发育和品质形成。

3.1 土壤 pH

土壤 pH 对药用植物品质形成有重要影响。养分吸收方面,土壤 pH 能够直接影响土壤养分存在形态与有效性^[45],进而影响药用植物对 C、Mg、Si 等必需元素的富集系数^[42];例如,土壤 pH 会影响草麻黄 *Ephedra sinica* L. 对 N、K、Cl、Sr、Na、Mn、B、Cu、Mo 等元素的吸收,进而影响草麻黄形态特征以及代谢活动和生理过程^[43]。生长发育方面,土壤 pH 对药用植物根系生长与代谢具有显著影响,适宜的土壤 pH 能为根系营造有利的生长环境,促进根系细胞分裂与伸长,增强根系活力,增强植物对水分和养分的摄取能力^[44];例如, pH 7.0~5.5 的土壤最适宜绣球花 *Hydrangea macrophylla* Ser. 生长,能促进植株增高、叶片增多增重;同时,该 pH 范围利于绣球花积累甜味成分,其叶片中甜茶苷及其糖苷含量更高,所制产品甜度更优^[45]。药用成分合成积累方面,土壤 pH 能够改变植物对养分的吸收效率,影响黄酮、糖苷等活性成分的含量^[45];例如,土壤 pH 与铁皮石斛 *Dendrobium officinale* Kimura & Migo 总黄酮含量正相关,是影响总黄酮的重要生态因子,适宜的土壤 pH 影响着铁皮石斛生长环境和生理过程,进而影响其药用成分合成与积累^[41]。

综合来看,土壤 pH 对药用植物品质的影响是一个连贯的过程,从养分吸收到生长发育,再到药用成分合成,环环相扣。未来研究可进一步探索不同药用植物在不同生长阶段对土壤 pH 的动态需求,以及土壤 pH 与其他土壤因子协同作用对药用

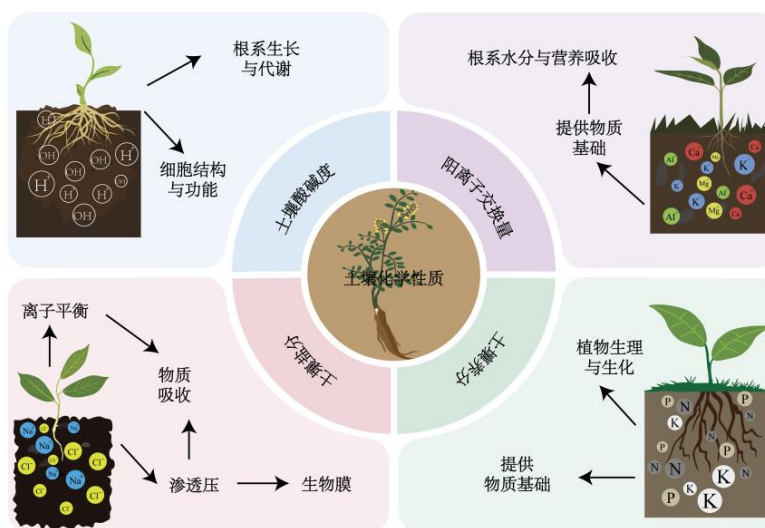


图 2 土壤化学性质在药用植物品质形成中的作用

Fig. 2 Role of soil chemical properties in quality formation of medicinal plants

植物品质的影响机制。

3.2 土壤盐分

土壤盐分通过直接影响土壤中离子平衡与浓度在药用植物从种子萌发到成熟的整个过程中起着重要作用^[46]。适量的盐分能够在一定程度上维持植物细胞渗透压，保证植物正常生理活动，促进植物新陈代谢。而过高的土壤盐分则会给植物带来诸多负面影响，当土壤盐分超标时，会造成土壤溶液渗透压升高，破坏植物离子平衡，破坏细胞器和生物膜结构^[47]，最终通过改变植物光合作用等生理生化进程影响植物生长发育和品质形成^[48]。

土壤盐分对药用植物生长和活性成分含量的影响明显且复杂，一方面，土壤盐分浓度会对药用植物生长发育产生不同影响，低浓度盐分可能成为部分药用植物生长的助力，适度的盐分刺激能够激发植物的生理活性。例如，适度土壤盐分可以增加多裂翅果菊 *Launaea sarmentosa* (Willd.) Merr. & Chun 干质量和鲜质量，但高浓度盐分会抑制植株生长，增加丙二醛 (malondialdehyde, MDA)、过氧化氢 (hydrogen peroxide, H_2O_2) 含量和电解质渗漏 (electrolyte leakage, EL)，使植株遭受氧化应激并损伤膜稳定性^[49]。另一方面，土壤盐分对药用植物活性成分含量的影响不尽相同，适当盐分能够诱导药用植物启动防御机制，促使植物合成更多特定的活性成分以应对胁迫环境，但过高盐分可能超出植物的耐受范围，阻碍活性成分合成，甚至导致已合

成的活性成分分解。例如，适当盐浓度下，黑喉毛蕊花 *Ballota nigra* L. 总酚和类黄酮含量以及 β -紫罗兰酮和石竹烯氧化物等具有抗癌和抗炎活性的代谢物显著增加，但在更高盐浓度下其含量显著降低^[50]。适当盐胁迫能显著提高金银花 *Lonicera japonica* Thunb. 叶片总酚和绿原酸浓度、苯丙氨酸解氨酶 (phenylalanine ammonia-lyase, PAL) 活性和羟基肉桂酰转移酶 (hydroxycinnamoyl transferase, HQT) 基因转录水平^[51]。未来研究可聚焦于不同药用植物对盐分耐受阈值的精确定定，以及盐分影响药用植物活性成分合成的分子调控机制，为盐碱地药用植物种植的盐分管理提供更精准的理论支持。

3.3 土壤养分

土壤养分包括大量元素和中微量元素，是衡量土壤肥力的重要指标^[52-53]，能够影响药用植物根系营养及生理代谢活动，同时也是活性成分的构成因子，进而影响药用植物活性成分的形成和积累^[54]。其中 N、P、K 是对药用的生长和发育具有重大作用的大量元素，氮元素在药用植物代谢过程中起关键作用，是磷脂、蛋白质、核酸的构成要素；磷元素在药用植物抗倒伏和抗病性上发挥重要的作用，能够合成酶等有机化合物；钾元素能够有效提高药用植物的净光合速率，还可以加快代谢产物向组织器官的运输^[55]。

从药用植物生理生化角度看，土壤养分影响药用植物生长态势以及药用成分合成机制。以柔毛淫羊藿 *Epimedium pubescens* Maxim. 为例，氮元素在

促进叶片和茎生长方面发挥着关键作用,磷元素深度参与能量代谢以及细胞信号传导过程,钾元素则对细胞渗透压和气孔开闭起到精准调节作用,这些土壤养分的协同作用,进一步影响了淫羊藿苷类黄酮在柔毛淫羊藿体内的合成与积累,最终对其药品品质形成产生决定性影响^[56]。在代谢层面,土壤养分能够影响药用植物初级和次级代谢产物。例如,土壤有机质和有效磷有助于青蒿 *Artemisia annua* L. 东莨菪内酯的积累,而土壤有效钾有助于多酚和金腰素 D 的积累^[57]。

不同的药用植物对各类元素积累、吸收能力,以及固有的养分吸收分配规律不同,因此配方施肥可以提高药用植物的产量、品质和保护土壤生态环境,同时还可以提高植物的抗逆性。但当前研究虽揭示了土壤养分对药用植物品质的多方面影响,但对于不同养分间协同或拮抗作用的整体调控网络研究尚不充分。未来可加强对土壤养分组合效应的研究,探索针对不同药用植物的最佳养分配比,以实现药用植物品质的最大化提升。

3.4 土壤阳离子交换量

土壤阳离子交换量为土壤在一定 pH 水平下所能吸附或释放阳离子的最大量,CEC 与土壤缓冲能力密切相关^[58],能够反映土壤保肥供肥能力,对药用植物生长和活性成分含量有重要影响^[59]。

从药用植物营养吸收与形态构建角度看,维持 CEC 平衡,能够改善植物对 Ca、Mg、K 等营

养元素的吸收^[59],改变根直径、根体积、根表面积和密度等细根形态^[60],为植物持续生长提供坚实的物质基础。以中麻黄 *Ephedra intermedia* Schrenk ex Mey. 为例,CEC 与中麻黄的 Sr、Fe 和 P 等元素呈显著的正相关,这表明 CEC 能通过影响土壤中这些元素的有效性,进而影响中麻黄对土壤元素的吸收^[61]。从药用植物生理代谢和品质提升角度看,通过平衡 CEC 还能显著提升植物叶片叶绿素 SPAD 值和 N 含量,提升叶片绿原酸和二咖啡酰奎宁酸异构体等酚类化合物含量^[62],对植物光合作用、抗氧化活性及整体生长均具有积极作用。在风险元素管控方面,CEC 同样发挥着重要作用,不同 CEC 土壤中,Cd、Cr、Cu 和 Ni 元素的潜在移动能力也不同,CEC 通过影响这些风险元素在土壤中存在形态和移动能力,进而影响洋甘菊 *Matricaria recutita* L. 对这些元素的吸收以及洋甘菊精油的品质和功效^[63]。综合而言,土壤阳离子交换量通过多种途径影响药用植物生长和品质,但其与其他土壤化学性质的交互作用对药用植物的影响还需进一步研究,未来可深入探索 CEC 在复杂土壤环境中对药用植物品质的综合调控机制。

4 土壤生物性质对药用植物品质形成的影响

土壤生物性质通过土壤微生物、无脊椎动物及酶活性等多维度交互作用,深刻调控药用植物的生长发育与品质形成(图 3)。这一领域的研究近年

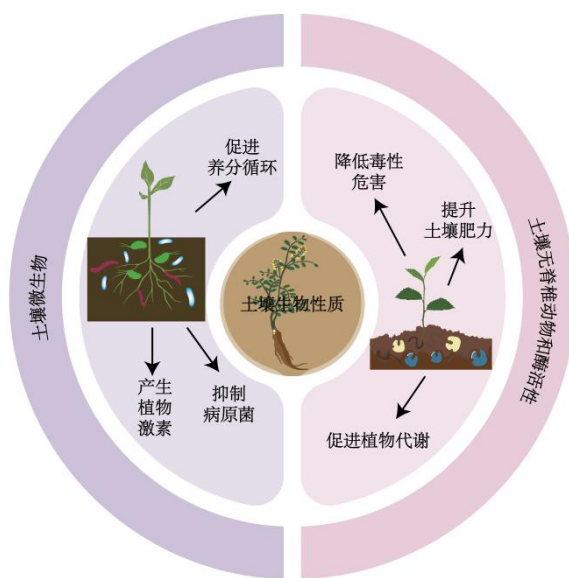


图 3 土壤生物性质在药用植物品质形成中的作用

Fig. 3 Role of soil biological properties in quality formation of medicinal plants

来逐渐从单一生物类群的影响分析转向多组分协同作用机制探索,为理解药用植物品质的生物学调控网络提供了新视角。土壤微生物(细菌、真菌、古菌等)通过有机物分解、养分循环、共生互作等途径,直接影响药用植物营养吸收与抗逆性^[64]。土壤无脊椎动物可破碎消化有机质、调控微生物群落,提高土壤养分含量,改善土壤结构,部分还能降低土壤毒性物质危害^[65],增强植物干旱存活率,直接促进药用植物生长。土壤活性酶则参与元素循环,通过分解有机养分、调控微生物群落,间接影响药用植物次生代谢和品质形成^[57]。三者形成的动态平衡系统,共同决定药用植物的生长态势、抗逆能力及活性成分积累效率,是药用植物品质形成的关键生物学驱动因素。

4.1 土壤微生物

土壤微生物是土壤生物性质中研究最深入的领域,其通过多样化的生态功能参与药用植物品质调控的全过程。细菌、真菌、古菌等类群的作用机制既存在特异性,又通过生态位互补形成协同效应^[66]:细菌通过分解有机物、参与养分循环、与植物共生、抑制病原菌、产生植物激素和改善土壤结构等方式影响植物生长发育^[65];真菌通过分解有机物、转化养分、与植物形成菌根共生、抑制病原菌、分泌植物激素,在植物养分供应、免疫增强等方面作用显著;古菌通过分解有机物、参与元素循环、产生植物激素、激活植物防御机制,对植物生长有着重要影响^[68]。

土壤微生物能够通过固氮、解磷、解钾等作用活化土壤养分,增强土壤团聚体稳定性,改善土壤肥力,促进药用植物生长。例如,土壤有机磷降解细菌能够提高土壤总磷、有效磷和有机磷浓度,进而使滇重楼 *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* (Franch.) Hand.-Mt. 根茎生物量显著增加,并促进根茎中多种甾体皂苷和总皂苷等药用成分积累^[69-70];同时,土壤微生物群落能够通过改变植物养分浓度和碳氮磷比,增加甘草 *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. 叶片叶绿素含量、光合速率和气孔导度,促进植物生长和次生代谢物积累^[71]。这提示未来研究需关注微生物群落的整体功能而非个体效应。

抗逆性调控是微生物影响药用植物品质的另一核心维度。在增强药用植物抵抗非生物胁迫方面,土壤微生物可诱导植物积累脯氨酸等渗透调节物质,促进宿主植物产生总可溶性糖等代谢产物,

提高植物渗透调节能力,缓解渗透胁迫^[72];土壤真菌还可提高植物抗氧化酶活性,诱导产生具有抗氧化作用的次生代谢物,减轻药用植物的氧化损伤^[73]。以盐渍土壤为例,AM 真菌可以通过改善杭白菊 *Chrysanthemum morifolium* Ramat. 对土壤氮吸收、调节离子平衡和提高光合作用等机制促进杭白菊生长,增强其耐盐性^[74];根际假单胞菌 *P. extremorientalis* TSAU20 与根瘤菌 *Mesorhizobium* sp. NWXJ31 还能通过产生植物生长调节剂和酶来促进甘草 *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. 根系扩大和养分吸收,增强甘草抗氧化防御系统,有效减轻了盐胁迫导致的氧化损伤,维持细胞膜正常功能^[75]。此外,土壤丛枝菌根真菌还可有效促进甘草根中甘草酸、甘草苷和总黄酮等次生代谢物的积累,缓解土壤盐分造成的非生物胁迫^[76];对于热胁迫,土壤中类芽孢杆菌属、伯克霍尔德氏菌属的微生物通过改变白术 *Atractylodes lancea* (Thunb.) DC. 生长过程中的资源分配、调节叶绿素含量、增强根系强度来提高白术对热胁迫的耐受性,并通过诱导相关基因表达显著提高白术根中主要药用化合物的产量^[77]。在增强药用植物抵抗生物胁迫方面,土壤微生物可以通过调节植物激素信号通路、诱导系统抗性和招募有益微生物等方式,增强药用植物对病虫害的抵抗能力。例如,土壤细菌能够在米槁 *Cinnamomum migao* H. W. Li 根际中定植,通过增强养分获取、产生抗菌化合物或诱导系统抗性来预防病原体感染,进而促进米槁生长,其中热酸菌属、酸杆菌属能促进米槁中桉烯、柠檬烯和 α -蒎品醇等生物活性成分合成与积累^[78]。在减轻土壤污染物毒性和积累方面,土壤微生物可以通过生物吸附、改变重金属价态等方式降低土壤中重金属毒性,降解土壤中的污染物,减少其在药用植物中的积累,降低对植物的毒性,保障药用植物品质安全^[79]。例如,多变篮状菌 *Talaromyces versatilis* (Vuill.) Samson、构巢裸胞壳菌 *Emmericella nidulans* Eidam、黑曲霉 *Aspergillus niger* Tiegh. 能够通过增强抗氧化防御系统和解毒机制,减轻镉诱导的氧化应激和毒性,提高香叶天竺葵 *Pelargonium graveolens* L'Hér. & Aiton 对镉的耐受性,促进香叶天竺葵生长和精油含量增加^[80]。这些研究揭示了微生物“抗逆-品质提升”的协同机制,为逆境条件下的药用植物栽培提供了生物调控新思路。

在活性成分合成方面,微生物的作用呈现“直

接诱导-间接调控”的多元特征,土壤微生物可通过分泌激发子、促进养分吸收等方式,调节药用植物次生代谢,促进活性成分积累,提高药用植物品质。例如,*Bacillus amyloliquefaciens* RC613、*Bacillus velezensis* RC521、*Bacillus simplex* TE142 等内生细菌能够促进牛至 *Origanum onites* L. 对土壤中养分的吸收,提高其叶绿素和香芹酚、百里酚等药用成分含量,增加牛至产量^[81]; *Enterobacter ludwigii* 35V 等内生细菌能够通过其固氮、溶磷和抗真菌等特性促进芦荟 *Aloe vera* (L.) Burm. f. 生长,并通过吲哚-3-乙酸(indole-3-acetic acid, IAA)的作用来提高芦荟素含量^[82];土壤中 *Tomentella* Persoon ex Patouillard、*Sebacina* Tulasne、*Fusarium* Link 等真菌及 *Steroidobacter* Fahrbach.、RB41 等细菌通过影响土壤物质循环和与植物形成共生关系,影响活血丹 *Glechoma longituba* (Nakai) Kupr. 生长以及乙醇可溶性提取物、总黄酮等生物活性化合物含量;摩西斗管囊霉 *Funneliformis mosseae* (T. H. Nicolson & Gerd.) C. Walker & A. Schüßler 等土壤真菌可通过改善黄芪 *Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bunge 光合代谢、提高光合效率,进而促进黄芪甲苷、毛蕊异黄酮葡萄糖苷、黄芪多糖等活性成分合成和积累^[84-85];此外,土壤中 *Bacillus muralis* Heyndrickx.、*Pseudomonas* sp. 等可通过产生 IAA、水杨酸(salicylic acid, SA)、脱落酸(abscisic acid, ABA)等植物激素调节药用植物激素水平,进而显著影响药用植物多种生物活性次生代谢物的积累^[86]。然而,当前研究多聚焦于单一微生物类群,对复杂群落中“关键物种-代谢通路”的靶向调控机制仍需深入解析。

4.2 土壤无脊椎动物和土壤酶活性

土壤无脊椎动物与酶活性作为生物性质的重要补充,其调控作用近年逐渐受到关注,二者与土壤微生物形成互作关系,是土壤生物学功能的核心载体,对药用植物生长发育和活性成分合成起到重要调控作用。土壤无脊椎动物是生活在土壤中、缺乏脊椎骨的低等动物类群,是土壤生态系统的重要组成部分。土壤无脊椎动物(如线虫、蚯蚓、千足虫等)可直接破碎和消化土壤中有机质,或通过调控微生物群落结构间接影响有机质分解过程,提高土壤中植物可利用氮、磷、钾等养分含量,改善土壤结构,提升土壤肥力,促进植物生长;蚯蚓、等足类、跳虫等物种还能通过特异性解毒器官(如等

足类的肝胰腺)或调控土壤微生物富集、吸收并代谢重金属和有机污染物(如多环芳烃),降低土壤中毒性物质生物有效性,最终降低土壤毒性物质对植物的危害^[66]。蚯蚓和白蚁等土壤无脊椎动物的挖掘活动还能增强土壤团聚体稳定性,提升水分渗透率和持水能力,进而增强植物在干旱条件下的存活率^[87]。例如,蚯蚓可以通过改善土壤通气性、水分渗透、土壤结构等物理性质和土壤养分等化学性质,显著增加金盏菊 *Calendula officinalis* L. 叶长、花茎长度和地上生物量,促进金盏菊营养生长^[88]。但目前针对药用植物的研究多集中于生长指标,其对活性成分的特异性影响仍缺乏系统数据,这是未来需要拓展的方向。

土壤酶活性作为土壤生物学功能的“量化指标”,其与药用植物品质的关联机制研究已取得突破。土壤酶是由土壤微生物(细菌、真菌、放线菌等)、植物根系或土壤动物分泌到胞外的一类生物催化剂,广泛参与土壤碳、氮、磷等元素循环过程。土壤酶活性是连接氮输入与碳循环的关键生物标志物,其中氧化酶能够分解复杂的有机质,驱动 CO₂ 排放;N-乙酰-β-D-葡萄糖苷酶(N-acetyl-β-D-glucosaminidase, NAG)、酸性磷酸酶(acid phosphatase, AP)等水解酶能够通过氮磷代谢、释放简单碳源间接影响微生物竞争,最终对药用植物生长产生重要影响^[89]。例如,土壤酶(脲酶、转化酶、磷酸酶等)活性能够通过分解土壤有机养分(N、P、C)来提升有效性,为酚类合成提供底物,或通过调控微生物群落结构和活性,改变根系-微生物互作模式,影响植物次生代谢信号或资源分配,最终间接调控黄花蒿 *Artemisia annua* L. 酚类物质积累^[57];土壤酶活性对活血丹次生代谢和品质形成具有重要作用,中性磷酸酶对生物活性化合物含量的影响尤为显著^[83]。这提示,未来可通过酶活性反推土壤生物功能状态,为药用植物的精准管理提供新工具。

综合来看,土壤生物性质对药用植物品质的调控是多层次网络效应的结果。当前研究虽揭示了各组分的独立作用,但对“微生物-无脊椎动物-酶”对药用植物协同影响^[90]、以及这些生物因子与土壤理化性质的交互作用解析不足。建议未来结合宏基因组、代谢组等多组学技术,构建“土壤生物因子-药用植物品质”的关联模型,为药用植物的绿色栽培与品质提升提供理论支撑。

5 土壤性质间的相互作用对药用植物品质形成的综合影响

土壤物理性质、化学性质与生物性质的协同作用是驱动药用植物品质形成的核心机制，三者通

过多维度、多层次的复杂互作构建起动态调控网络（图 4）。近年来，该领域研究已从单一性质的独立影响分析转向多因子耦合机制探索，为解析药用植物品质的土壤驱动规律提供了新框架。

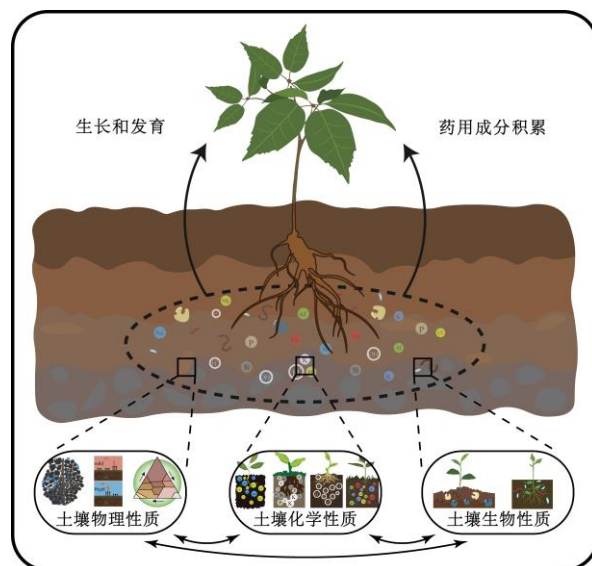


图 4 土壤健康对药用植物品质形成的综合影响

Fig. 4 Comprehensive influence of soil health on quality formation of medicinal plants

5.1 土壤理化性质的交互调控网络

土壤物理性质（如干旱、盐胁迫）与化学性质（如矿物质、重金属）存在交互作用，土壤物理性质可以通过塑造根系微环境与养分运移路径，与化学性质形成“空间-物质”协同效应，共同影响次生代谢产物^[91]。例如，干旱胁迫下，植物对土壤中氮、磷等矿物质的吸收效率可能改变，而矿物质的缺乏或过量会进一步加剧干旱对代谢的影响；盐胁迫则可能通过改变土壤中离子平衡（如 Na^+ 、 K^+ ），与重金属离子（如 Cd^{2+} ）产生协同作用，影响次生代谢通路（如萜类合成）^[92]。细质地土壤因高 CEC 增强养分保持能力，而孔隙度则通过影响水分渗透率调控养分溶解与传输速率^[55]。这种协同关系在滇龙胆 *Gentiana rigescens* Franch. 的研究中得到验证：土壤氮、磷含量直接决定植株生长态势，而碳氮比、氮磷比等化学计量比通过反映养分平衡状态，间接影响植物对资源的吸收效率^[93]。土壤理化性质对滇龙胆质量的影响并非单一因素的作用，而是多种土壤因子间相互协同作用的结果，过氧化氢酶、多酚氧化酶、全钾、有机质等可能是影响滇龙胆有效成分含量积累的关键土壤因子^[94]。值得注意的是，理化性质间存在“双向调控”特征-pH 通过影响颗粒团聚维持土壤结构稳定性，而养分离子浓度则通过改变渗透压反向调节

水分有效性^[53]，这种动态平衡直接关联植物的水分利用效率、光合潜力及次生代谢途径^[95]。

当前研究揭示，理化性质的耦合效应并非简单叠加，而是通过理化性质协同互作发挥作用^[96]。例如，当土壤含水量处于 60%~70% 田间持水量时，氮磷养分的协同吸收效率最高，而超出这一范围，即使单一养分充足也会因渗透失衡导致药用植物品质下降^[97]。这种“理化耦合”现象提示，实际栽培中需针对不同药用植物建立精准的理化参数组合标准，而非单一优化某类指标。

5.2 生物性质与理化性质的耦合强化效应

土壤生物性质通过与理化性质的耦合作用，进一步放大对药用植物品质的调控效能。土壤化学性质可能通过影响土壤生物群落间接作用于植物次生代谢。土壤理化性质的变化会改变土壤微生物的组成，而这些微生物的代谢活动又会与土壤理化因素共同调控药用植物次生代谢产物的合成，如磷胁迫下，内生菌可更显著地促进宿主植物中酚类物质的积累，土壤养分不仅通过直接作用影响植物生长，更通过塑造微生物群落结构间接调控药用成分合成^[92]。在益智 *Alpinia katsumadai* Miq. 和长序砂仁 *Amomum longiligulare* T. L. Wu 的研究中，土壤总钾含量与 pH 值通过调整厚壁菌门等优势菌群的

丰度,形成“化学因子-微生物-植物代谢”的级联效应^[98]。类似地,CEC 通过为微生物提供稳定的生存环境,促进其参与有机物分解与养分转化,最终提升人参 *Panax ginseng* C. A. Mey. 对养分的吸收效率^[99],这揭示了“土壤理化性质-微生物-植物互作”的调控方式^[77]。

生物因子对理化性质的反向塑造是另一重要交互路径。土壤中的细菌可通过调节植物对土壤物理和化学性质的响应影响次生代谢产物合成。例如,具有 ACC 脱氨酶活性的细菌能降低植物体内乙烯水平,增强其对干旱、盐胁迫等物理因素的耐受性,同时可能通过影响土壤中矿物质的吸收,间接促进次生代谢产物(如生物碱、酚类)的积累^[92]。而 AM 真菌通过分泌球囊霉素促进土壤团聚体形成,显著提升持水能力与通气性;同时提高磷酸酶、脲酶等活性,加速碳氮磷循环,最终协同促进丹参酮等萜类化合物积累^[72]。此外,发现深色有隔内生真菌(dark septate endophytes, DSE)接种结合水分条件通过影响土壤 AM 真菌、细菌等微生物群落,调节土壤 pH、速效磷、速效氮等化学指标及缓解土壤干旱等物理因素,经结构方程模型等分析显示,这些因素相互作用,通过改变黑果枸杞 *Lycium ruthenicum* Murr. 的谷胱甘肽(glutathione, GSH)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、IAA 等生理指标和生物量、株高等生长参数影响其品质相关特性^[100]。这种“生物改造理化-理化支撑生物”的正反馈循环,为通过生物措施改良土壤、提升药材品质提供了可行性。此外,土壤微节肢动物通过调控微生物群落结构与碳氮矿化过程,间接改变养分有效性^[101],进一步印证了生物因子在土壤-植物系统中的枢纽作用。

值得注意的是,药用植物连作引发的障碍问题尤为突出——这一既受关注又极具挑战性的领域,生动展现了土壤物理、化学与生物性质的协同作用如何深刻影响药材生长,成为上述机制的典型实践案例,为土壤性质协同作用提供了实践层面的证据^[102-104]。人参、广藿香等药用植物连作时,土壤全氮、有机质等化学性质退化,导致脲酶、多酚氧化酶等生物活性降低,同时优势菌群(如放线菌门)减少而致病菌增殖,形成“理化恶化-生物失调”的恶性循环^[105-106]。相反,间作模式通过提升土壤水分含量、增加有机质与速效养分、丰富微生物多样性与酶活性,实现三者的正向协同,最终促

进植株生长^[107-108]。这提示,优化栽培模式的核心在于维持土壤理化生物性质的动态平衡。

特定功能生物对土壤性质的弥补作用值得关注。假单胞菌等根际细菌通过提升解磷、固氮活性,可缓解土壤养分不足^[109];在盐碱化土壤中,耐盐真菌通过调节 pH 与离子平衡,改善土壤物理结构与化学环境,为药用植物创造适宜条件^[110]。这些发现为极端环境下药用植物的栽培提供了“生物修复-性质协同-品质保障”的技术路径。

土壤物理、化学、生物性质通过“空间塑造-物质供应-生物驱动”的三维协同,从形态建成、生理代谢到次生代谢产物积累等层面系统性调控药用植物品质。当前研究虽揭示了部分互作机制,但对“关键阈值-调控节点-网络响应”的定量解析仍显不足。未来可结合物联网监测与多组学技术,构建土壤性质协同作用的预测模型,实现理化与生物性质的最优耦合,最终推动药用植物产业的高质量发展。

6 结语与展望

土壤健康作为药用植物生长的核心载体,其物理、化学与生物性质通过多维度协同作用,构建了药用植物品质形成的基础生态调控网络。土壤物理性质不仅通过塑造根系生长的微环境直接影响养分吸收效率,还能够间接调控内生微生物群落结构,进而影响植物次生代谢路径;土壤化学性质则通过调控养分有效性、维持离子平衡及驱动酶促反应,为药用植物活性成分合成提供物质与能量基础;而土壤生物性质(尤其是根际微生物群落)作为“土壤-植物”互作的核心枢纽,通过代谢物交换、信号传导及养分活化,深度参与药用植物品质的精细化调控。三者的动态平衡构成了药用植物品质形成的关键基础,其协同作用的强度与稳定性直接决定药材质量的优劣。

近年来,土壤健康与药用植物品质的研究已从早期的“单一因子-品质指标”相关性分析,逐步向“多因子互作”机制探索演进。例如,在土壤物理-生物互作领域,发现砂壤土的高孔隙度可促进 AM 真菌定殖,进而提高黄芪甲苷含量;在化学-生物耦合研究中,证实中性 pH 条件下,根际细菌的解磷活性与土壤有效磷含量呈正协同,显著提升滇重楼的甾体皂苷积累。这些研究揭示了土壤性质间的“交叉调控”特征,但整体仍存在以下瓶颈:(1)多因子协同的系统性解析缺失。当前研究多聚焦于

“物理-化学”或“化学-生物”的二元互作，缺乏对“物理-化学-生物”三维网络的整合分析。例如，土壤质地通过影响 CEC（化学性质）调控微生物群落结构，进而影响药用植物代谢的级联效应，对“土壤性质波动→植物基因表达→代谢物积累”的动态关联解析不足，导致无法精准定位关键调控节点。

（2）土壤健康阈值的量化关联薄弱。现有研究多通过“适宜或不适宜”的定性描述，缺乏土壤健康指标与药用成分含量的定量阈值关联。例如，土壤酶活性与黄酮类成分的剂量效应曲线研究不足，导致生产中难以制定基于土壤健康的精准调控方案。

（3）理论向实践转化的桥梁断裂。实验室条件下的盆栽试验与田间实际环境存在显著差异，导致“土壤健康调控措施”的田间验证率不足。

针对上述局限，未来研究需从以下四维度实现突破，推动土壤健康理论与药用植物产业的深度融合：（1）多组学驱动的多因子互作网络构建。借助宏基因组、代谢组、转录组的多组学联用技术，解析“土壤物理-化学-生物”的协同作用对药用植物代谢的调控网络。例如，通过宏基因组测序筛选对土壤质地与盐分变化敏感的功能菌群，结合转录组分析植物中响应菌群信号的基因模块；利用代谢流分析追踪土壤碳氮比通过微生物转化影响药用植物生物碱合成的路径，明确“土壤碳库→微生物代谢物→植物前体物质”的定量关系。最终构建“土壤健康因子波动-植物品质响应”的动态模型，实现从“现象描述”到“机制预测”的跨越。（2）土壤健康阈值的精准量化与分级。基于“土壤-植物”系统的临界响应理论，建立不同药用植物的土壤健康指标阈值体系。针对道地药材，通过机器学习算法（如随机森林）筛选影响其核心成分的土壤健康关键因子；然后结合田间定位试验，验证不同土壤健康等级对应的药用成分含量区间，形成“土壤健康指数-药材品质等级”的对应标准，为规范化种植提供量化依据。（3）交叉学科技术的融合应用。推动土壤学、植物生理学、微生物学与信息技术的交叉创新，开发药用植物土壤健康调控的新技术体系。例如，利用物联网传感器实时追踪土壤容重、pH、微生物活性等动态变化，结合无人机遥感反演植物生长状态，实现“土壤-植物”信息的实时耦合；根据土壤物理化学特性，人工设计功能菌群，通过精准接种优化土壤生物功能，弥补土壤理化性质的缺陷。（4）理论向实践的转化路径构建。聚焦药用

植物产业的实际需求，建立“土壤健康诊断-调控措施制定-品质提升验证”的闭环体系。针对道地药材主产区，绘制土壤物理-化学-生物性质的空间分布图，明确“道地性”形成的土壤健康特征；基于土壤健康退化的多因子机制，开发“有机改良剂输入+功能微生物接种+耕作方式优化”的协同技术。

土壤健康对药用植物品质的调控是一个“物理为体、化学为用、生物为魂”的复杂生态过程，其研究正从“碎片化解析”迈向“系统级认知”。未来需以多组学技术为工具，以交叉学科融合为动力，以产业需求为导向，重点突破多因子协同机制、健康阈值量化与技术转化 3 大瓶颈，最终构建“土壤健康精准管理-药用植物品质可控”的理论与技术体系，为中医药产业的可持续发展提供“从土壤到药材”的全链条科学支撑。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 龙会英, 张德, 金杰. 土壤质地对柱花草生长发育、生物量及土壤肥力变化的影响 [J]. 土壤, 2017, 49(5): 1049-1052.
- [2] Vaou N, Stavropoulou E, Voidarou C, *et al.* Towards advances in medicinal plant antimicrobial activity: A review study on challenges and future perspectives [J]. *Microorganisms*, 2021, 9(10): 2041.
- [3] Pant P, Pandey S, Dall'Acqua S. The influence of environmental conditions on secondary metabolites in medicinal plants: A literature review [J]. *Chemistry Biodiversity*, 2021, 18(11): e2100345.
- [4] Punetha A, Kumar D, Suryavanshi P, *et al.* Environmental abiotic stress and secondary metabolites production in medicinal plants: a review [J]. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 2022.
- [5] 张江周, 程金, 孙新展, 等. 基于文献计量分析的土壤健康研究进展 [J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(4): 192-205.
- [6] Oliver D P, Bramley R G V, Riches D, *et al.* Review: Soil physical and chemical properties as indicators of soil quality in Australian viticulture: Indicators for soil quality [J]. *Australian J Grape Wine Res*, 2013, 19(2): 129-139.
- [7] Meng T, Zhao T, Leng F, *et al.* Changes of key soil factors, biochemistry and bacterial species composition during seasons in the rhizosphere and roots of *Codonopsis pilosula* (tangshen) [J]. *Agronomy*, 2023, 13(6): 1545.
- [8] Yang T, Siddique K H M, Liu K. Cropping systems in agriculture and their impact on soil health-a review [J]. *Global Ecology Conservat*, 2020, 23: e01118.
- [9] Gregorich L J, Acton D F, Canada., *et al.* The health of our soils: Toward sustainable agriculture in Canada [M].

- Ottawa: Agricult Agri-Food Canada, 1995.
- [10] 徐明岗, 段英华, 白珊珊, 等. 基于长期定位试验的土壤健康研究与展望 [J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(7): 1253-1261.
 - [11] Saleem M, Hu J, Jousset A. More than the sum of its parts: Microbiome biodiversity as a driver of plant growth and soil health [J]. *Annual Review Ecology, Evolution, Systemat*, 2019, 50(1): 145-168.
 - [12] Carter M R. Soil quality for sustainable land management: Organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions [J]. *Agronomy J*, 2002, 94(1): 38-47.
 - [13] Zeng Y, Verhoef A, Vereecken H, *et al.* Monitoring and modeling the soil-plant system toward understanding soil health [J]. *Reviews Geophys*, 2025, 63(1): e2024 RG000836.
 - [14] Jian J, Du X, Stewart R D. Quantifying cover crop effects on soil health and productivity [J]. *Data Brief*, 2020, 29: 105376.
 - [15] Grandy A S, Daly A B, Bowles T M, *et al.* The nitrogen gap in soil health concepts and fertility measurements [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2022, 175: 108856.
 - [16] Maharjan B, Das S, Acharya B S. Soil health gap: A concept to establish a benchmark for soil health management [J]. *Global Ecology Conservation*, 2020, 23: e01116.
 - [17] Srivastava P K, Gupta M, Pandey A, *et al.* Effects of sodicity induced changes in soil physical properties on paddy root growth [J]. *Plant Soil Environment*, 2014, 60(4): 165-169.
 - [18] Liu Z, Ma Y, Lv X, *et al.* Abiotic factors and endophytes co-regulate flavone and terpenoid glycoside metabolism in *glycyrrhiza uralensis* [J]. *Applied Microbiol Biotechnol*, 2023, 107(7-8): 2671-2688.
 - [19] Liu J, Liu Q. Soil moisture estimate uncertainties from the effect of soil texture on dielectric semiempirical models [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(14): 2343.
 - [20] Anaba B D, Yemefack M, Abossolo-Angue M, *et al.* Soil texture and watering impact on pot recovery of soil-stripped oil palm (*Elaeis guineensis* jacq.) seedlings [J]. *Heliyon*, 2020, 6(10): e05310.
 - [21] Alotaibi M O, Abd-Elgawad M E. Soil structure influences proteins, phenols, and flavonoids of varied medicinal plants in Al jubail, KSA [J]. *Saudi J Biological Sci*, 2023, 30(3): 103567.
 - [22] Millani A A, Rossatto D R, Rubin Filho C J, *et al.* Análise de crescimento e anatomia foliar da planta medicinal *Ageratum conyzoides* L. (asteraceae) cultivada em diferentes substrates [J]. *Revista Brasileira de Plantas Medicinai*s, 2010, 12(2): 127-134.
 - [23] Tran C T K, Watts-Williams S J, Smernik R J, *et al.* Root and arbuscular mycorrhizal effects on soil nutrient loss are modulated by soil texture [J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 167: 104097.
 - [24] Jaraba J, Rothrock C S, Kirkpatrick T L, *et al.* Soil texture influence on *meloidogyne incognita* and *thielaviopsis basicola* and their interaction on cotton [J]. *Plant Disease*, 2014, 98(3): 336-343.
 - [25] Dai L, Xu Z. The effect of soil porosity size distribution on integral energy content of water in different moisture slopes [J]. *Water Supply*, 2023, 23(9): 3950-3958.
 - [26] Bauke S L, Amelung W, Bol R, *et al.* Soil water status shapes nutrient cycling in agroecosystems from micrometer to landscape scales [J]. *J Plant Nutrition Soil Science*, 2022, 185(6): 773-792.
 - [27] Sainju U M, Liptzin D, Jatro J D. Relating soil physical properties to other soil properties and crop yields [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 22025.
 - [28] Zheng Y J, Xia P G, Zhao H G, *et al.* Suitable soil moisture contents for water use efficiency and saponins accumulation in *Panax notoginseng* [J]. *Chin Herb Med*, 2021, 13(2): 267-273.
 - [29] Hussain M I, Lyra D A, Farooq M, *et al.* Salt and drought stresses in safflower: A review [J]. *Agron Sustain Devel*, 2016, 36(1): 4.
 - [30] Wu X M, Zuo Z T, Zhang Q Z, *et al.* Effect of provenance and water stress on biomass and polyphyllin content in the medicinal plant *Paris polyphylla* Smith var. *yunnanensis* [J]. *Acta Scientiarum Polonorum-hortorum Cultus*, 2019, 18(2): 56-65.
 - [31] Zhang Y, Wang D, Wu F, *et al.* Transcriptome analysis on the quality of *Epimedium koreanum* in different soil moisture conditions at harvesting stage [J]. *Genes*, 2024, 15(5): 528.
 - [32] Om H, Kumar S, Dhiman S D. Dormancy and viability of phalaris minor seed in a rice-wheat cropping system [J]. *Weed Res*, 2005, 45(2): 140-148.
 - [33] Gavito M E, Curtis P S, Mikkelsen T N, *et al.* Interactive effects of soil temperature, atmospheric carbon dioxide and soil N on root development, biomass and nutrient uptake of winter wheat during vegetative growth [J]. *J Exp Bot*, 2001, 52(362): 1913-1923.
 - [34] Dong S, Scagel C F, Cheng L, *et al.* Soil temperature and plant growth stage influence nitrogen uptake and amino acid concentration of apple during early spring growth [J]. *Tree Physiology*, 2001, 21(8): 541-547.
 - [35] Göbel L, Coners H, Hertel D, *et al.* The role of low soil temperature for photosynthesis and stomatal conductance of three graminoids from different elevations [J]. *Frontiers Plant Sci*, 2019, 10: 330.
 - [36] Running S W, Reid C P. Soil temperature influences on root resistance of *Pinus contorta* seedlings [J]. *Plant Physiol*, 1980, 65(4): 635-640.
 - [37] Domisch T, Finer L, Lehto T. Effects of soil temperature on biomass and carbohydrate allocation in scots pine

- (*Pinus sylvestris*) seedlings at the beginning of the growing season [J]. *Tree Physiol*, 2001, 21(7): 465-472.
- [38] Wang Z, Chen Z, Tang Y, *et al.* Regulation of transcriptome networks that mediate ginsenoside biosynthesis by essential ecological factors [J]. *PLOS One*, 2023, 18(8): e0290163.
- [39] Komariah, Pitaloka D D A, Batubara I, *et al.* The effects of soil temperature from soil mulching and harvest age on phenol, flavonoid and antioxidant contents of java tea (*Orthosiphon aristatus* B.) [J]. *Chem Biolog Technol Agricult*, 2021, 8(1): 56.
- [40] Chen H, Huang S, Quan C, *et al.* Effects of different colors of plastic-film mulching on soil temperature, yield, and metabolites in *platostoma palustre* [J]. *Sci Reports*, 2024, 14(1): 5110.
- [41] Yuan Y, Tang X, Jia Z, *et al.* The effects of ecological factors on the main medicinal components of *Dendrobium officinale* under different cultivation modes [J]. *Forests*, 2020, 11(1): 94.
- [42] ia M, Wang Y, Zhang Q, *et al.* Effect of soil pH on the uptake of essential elements by tea plant and subsequent impact on growth and leaf quality [J]. *Agronomy*, 2024, 14(6): 1338.
- [43] Xinhui Zhang Z C, Liang J, Tian H, *et al.* Influence of the rhizosphere soils on essential elements of *Ephedra sinica* herbaceous stems [J]. *Emirates J Food Agric*, 2018: 29.
- [44] Neina D. The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation [J]. *Appl Environmental Soil Sci*, 2019, 2019: 1-9.
- [45] Tsukioka J, Nakamura S. Comparison of growth in *Hydrangea macrophylla* var. *thunbergii* Grown in different soil pH and quantitative analysis of its sweetness-related constituents [J]. *Chem Pharm Bull*, 2023, 71(5): 368-373.
- [46] Kong Q, Mostafa H H A, Yang W, *et al.* Comparative transcriptome profiling reveals that brassinosteroid-mediated lignification plays an important role in garlic adaption to salt stress [J]. *Plant Physiol Bioch*, 2021, 158: 34-42.
- [47] Fu H, Yang Y. How plants tolerate salt stress [J]. *Cur Issues Mol Biol*, 2023, 45(7): 5914-5934.
- [48] Xu N, Liu S, Lu Z, *et al.* Gene expression profiles and flavonoid accumulation during salt stress in *Ginkgo biloba* seedlings [J]. *Plants*, 2020, 9(9): 1162.
- [49] Tran D Q, Pham A C, Nguyen T T T, *et al.* Growth, physiological, and biochemical responses of a medicinal plant *Launaea sarmentosa* to salinity [J]. *Horticulturae*, 2024, 10(4): 388.
- [50] Younessi-Hamzekhanlu M, Dibazarnia Z, Oustan S, *et al.* Mild salinity stimulates biochemical activities and metabolites associated with anticancer activities in black horehound (*Ballota nigra* L.) [J]. *Agronomy*, 2021, 11(12): 2538.
- [51] Yan K, Bian L, He W, *et al.* Phytohormone signaling pathway for eliciting leaf phenolic synthesis in honeysuckle (*Lonicera japonica* Thunb.) under coastal saline environment [J]. *Ind Crops Prod*, 2020, 157: 112929.
- [52] Oldroyd G E D, Leyser O. A plant's diet, surviving in a variable nutrient environment [J]. *Science*, 2020, 368(6486): eaba0196.
- [53] Sainju U M, Liptzin D. Relating soil chemical properties to other soil properties and dryland crop production [J]. *Front Envir Sci*, 2022, 10: 1005114.
- [54] 顾志荣, 师富贵, 金岩. 土壤无机元素与中药品质关系研究进展 [J]. *广东微量元素科学*, 2013, 20(11): 18-22.
- [55] Ye C, Zheng G, Tao Y, *et al.* Effect of soil texture on soil nutrient status and rice nutrient absorption in paddy soils [J]. *Agronomy*, 2024, 14(6): 1339.
- [56] An X, Liu S, He C, *et al.* Nutrient dynamics during the growth period of *epimedium pubescens* and its impact on growth and icariin-flavonoids composition [J]. *Ind Crops Products*, 2025, 225: 120520.
- [57] Luo S Q. Correlation analysis of nutrients, enzymes, and microbial biomass in soils with phenolics of *Artemisia annua* L [J]. *Pakistan J Agricult Sci*, 2019, 56(1): 171-178.
- [58] Albuquerque C G D, Gavelaki F, Matera H B, *et al.* Relationship between pH and base saturation associated with soil cation exchange capacity in soils of mato grosso do sul, brazil [J]. *Bragantia*, 2024, 83: e20230291.
- [59] Yang M, Zhou D, Hang H, *et al.* Effects of balancing exchangeable cations ca, mg, and K on the growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.) based on increased soil cation exchange capacity [J]. *Agronomy*, 2024, 14(3): 629.
- [60] Jia S, Li X, Sun W, *et al.* Fine root traits of *Pinus koraiensis* varied with soil cation exchange capacity in natural forests [J]. *Land*, 2021, 10(4): 363.
- [61] Liu A, Li S, Cen N, *et al.* Concentration of fifteen elements in herbaceous stems of *Ephedra intermedia* and influence of its growing soil [J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 15077.
- [62] Uranishi R, Aedla R, Alsaadi D H M, *et al.* Evaluation of environmental factor effects on the polyphenol and flavonoid content in the leaves of *Chrysanthemum indicum* L. and its habitat suitability prediction mapping [J]. *Molecules*, 2024, 29(5): 927.
- [63] Száková J, Dziaková M, Kozáková A, *et al.* The risk element uptake by chamomile (*Matricaria recutita* (L.) Rauschert) growing in four different soils [J]. *Archiv Envir Protect*, 2023.
- [64] Srivastava P K, Shenoy B D, Gupta M, *et al.* Stimulatory effects of arsenic-tolerant soil fungi on plant growth promotion and soil properties [J]. *Microbes Envir*, 2012, 27(4): 477-482.
- [65] Auclerc A, Beaumelle L, Barantal S, *et al.* Fostering the

- use of soil invertebrate traits to restore ecosystem functioning [J]. *Geoderma*, 2022, 424: 116019.
- [66] 孔亚丽, 秦华, 朱春权, 等. 土壤微生物影响土壤健康的作用机制研究进展 [J]. *土壤学报*, 2024, 61(2): 331-347.
- [67] Adomako M O, Roiloa S, Yu F H. Potential roles of soil microorganisms in regulating the effect of soil nutrient heterogeneity on plant performance [J]. *Microorganisms*, 2022, 10(12): 2399.
- [68] Wang X, Chi Y, Song S. Important soil microbiota's effects on plants and soils: A comprehensive 30-year systematic literature review [J]. *Frontiers Microbiol*, 2024, 15: 1347745.
- [69] Li H, Xu L, Li Z, *et al.* Mycorrhizas affect polyphyllin accumulation of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* through promoting PpSE expression [J]. *Phyton*, 2021, 90(5): 1535-1547.
- [70] Li Z W, Wang Y H, Liu C, *et al.* Effects of organophosphate-degrading bacteria on the plant biomass, active medicinal components, and soil phosphorus levels of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis* [J]. *Plants*, 2023, 12(3): 631.
- [71] Yu M, Xie W, Zhang X, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi can compensate for the loss of indigenous microbial communities to support the growth of liquorice (*Glycyrrhiza uralensis* Fisch.) [J]. *Plants*, 2019, 9(1): 7.
- [72] Yu L, Zhang Z, Zhou L. Advances in the studies on symbiotic arbuscular mycorrhizal fungi of traditional Chinese medicinal plants [J]. *Biocell*, 2022, 46(12): 2559-2573.
- [73] Zhang J, Lu J, Zhu Y, *et al.* Roles of endophytic fungi in medicinal plant abiotic stress response and TCM quality development [J]. *Chin Herb Med*, 2024, 16(2): 204-213.
- [74] Wang Y, Wang M, Li Y, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and nitrogen uptake of *Chrysanthemum morifolium* under salt stress [J]. *PLoS One*, 2018, 13(4): e0196408.
- [75] Egamberdieva D, Wirth S, Li L, *et al.* Microbial cooperation in the rhizosphere improves liquorice growth under salt stress [J]. *Bioengineered*, 2017, 8(4): 433-438.
- [76] Dang H, Zhang T, Wang Z, *et al.* Succession of endophytic fungi and arbuscular mycorrhizal fungi associated with the growth of plant and their correlation with secondary metabolites in the roots of plants [J]. *BMC Plant Biol*, 2021, 21(1): 165.
- [77] Wang H, Wang Y, Jiang D, *et al.* Soil microbe inoculation alters the bacterial communities and promotes root growth of *Atractylodes lancea* under heat stress [J]. *Plant Soil*, 2022, 478(1-2): 371-389.
- [78] Li L, Yang X, Tong B, *et al.* Rhizobacterial compositions and their relationships with soil properties and medicinal bioactive ingredients in *Cinnamomum migao* [J]. *Frontiers Microbiol*, 2023, 14: 1078886.
- [79] Wang G, Ren Y, Bai X, *et al.* Contributions of beneficial microorganisms in soil remediation and quality improvement of medicinal plants [J]. *Plants*, 2022, 11(23): 3200.
- [80] El-Shafey N M, Marzouk M A, Yasser M M, *et al.* Harnessing endophytic fungi for enhancing growth, tolerance and quality of rose-scented geranium (*Pelargonium graveolens* (L'Hér) Thunb.) plants under cadmium stress: A Biochemical study [J]. *J Fungi*, 2021, 7(12): 1039.
- [81] Çakmakçı R, Haliloglu K, Türkoğlu A, *et al.* Effect of different plant growth-promoting rhizobacteria on biological soil properties, growth, yield and quality of oregano (*Origanum onites* L.) [J]. *Agronomy*, 2023, 13(10): 2511.
- [82] Universidade Federal de Goias, Silva C F D, Vitorino L C, *et al.* Endophytic bacteria promote growth and increase the aloin content of aloe vera [J]. *Bol Latin Carib Plantas Med Aromat*, 2022, 20(5): 607-619.
- [83] Liu L, Jin L, Guo Q. Effects of soil microbiomes and enzymatic activities on *Glechoma longituba* [J]. *Hortscience*, 2020, 55(4): 515-521.
- [84] Li Y, 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.
- [85] Liu J, Cai J, He R, *et al.* Influences of funneliformis mosseae on the photosynthetic parameters and active secondary metabolites contents of *Astragalus membranaceus* and *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* [J]. *Scienceasia*, 2019, 45(4): 324.
- [86] Yu J B, Bai M, Wang C, *et al.* Regulation of secondary metabolites accumulation in medicinal plants by rhizospheric and endophytic microorganisms [J]. *Med Plant Biol*, 2024, 3(1): 23-29.
- [87] Griffiths H M, Ashton L A, Parr C L, *et al.* The impact of invertebrate decomposers on plants and soil [J]. *New Phytologist*, 2021, 231(6): 2142-2149.
- [88] Zaller J G, Saccani F, Frank T. Effects of earthworms and mycorrhizal fungi on the growth of the medicinal herb *Calendula officinalis* (asteraceae) [J]. *Plant Soil Envir*, 2011, 57(11): 499-504.
- [89] Yang Y, Fang H, Cheng S, *et al.* Soil enzyme activity regulates the response of soil C fluxes to N fertilization in a temperate cultivated grassland [J]. *Atmosphere*, 2022, 13(5): 777.
- [90] 莫雅旋, 郭赛, 欧燕楠, 等. 联合接种原生动物和木霉对黄瓜生长及土壤微生物区系的影响 [J]. *南京农业大学学报*, 2023, 46(2): 297-305.
- [91] 汤建才, 陈建业. 土壤理化性质与乌头植物有效成分的相关性研究 [J]. *西南师范大学学报: 自然科学版*, 2011, 36(1): 166-172.
- [92] Alami M M, Guo S, Mei Z, *et al.* Environmental factors on

- secondary metabolism in medicinal plants: exploring accelerating factors [J]. *Med Plant Biol*, 2024, 3(1): 25-36.
- [93] Zhang J, Zhang Z, Wang Y, *et al.* Environmental impact on the variability in quality of *gentiana rigescens*, a medicinal plant in southwest China [J]. *Global Ecol Conserv*, 2020, 24: e01374.
- [94] 唐运萍, 刘卫红, 孙蕊仙, 等. 滇龙胆中药有效成分与土壤理化因子的相关性研究 [J]. 时珍国医国药, 2024, 35(1): 182-187.
- [95] Nazari M, Ghasemi-Soloklui A A, Kordrostami M, *et al.* Deciphering the response of medicinal plants to abiotic stressors: A focus on drought and salinity [J]. *Plant Stress*, 2023, 10: 100255.
- [96] 董燕, 韩见宇, 张家春, 等. 药用植物芍药土壤理化性质研究进展及展望 [J]. 耕作与栽培, 2020, 40(3): 19-22.
- [97] Xing Y, Niu X, Wang N, *et al.* The correlation between soil nutrient and potato quality in loess plateau of China based on PLSR [J]. *Sustainability*, 2020, 12(4): 1588.
- [98] Xianbang W, Mingping L, Kunliang L, *et al.* Effects of intercropping teak with *Alpinia katsumadai* Hayata and *Amomum longiligulare* T. L. Wu on rhizosphere soil nutrients and bacterial community diversity, structure, and network [J]. *Front Microbiol*, 2024, 15: 1328772.
- [99] Kim K, Kim H J, Jeong D H, *et al.* Correlation between soil bacterial community structure and soil properties in cultivation sites of 13-year-old wild-simulated ginseng (*Panax ginseng* C. A. Meyer) [J]. *Appl Sci*, 2021, 11(3): 937.
- [100] He C, Han T, Tan L, *et al.* Effects of dark septate endophytes on the performance and soil microbia of *Lycium ruthenicum* under drought stress [J]. *Frontiers Plant Sci*, 2022, 13: 56.
- [101] Kuřáková E, Cesarz S, Münzbergová Z, *et al.* Soil microarthropods alter the outcome of plant-soil feedback experiments [J]. *Sci Rep*, 2018, 8(1): 11898.
- [102] 林绮琪, 龚程程, 林雅立, 等. 药用植物连作障碍的成因与调控 [J]. 特产研究, 2025, 47(4): 179-184.
- [103] 周芳, 曹国璠, 李金玲, 等. 药用植物连作障碍机制及其缓解措施研究进展 [J]. 山地农业生物学报, 2019, 38(3): 67-72.
- [104] 徐新娟. 甜叶菊与环境因子关系及其连作障碍缓解机制的研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- [105] Chen F, Xie Y, Jia Q, *et al.* Effects of the continuous cropping and soilborne diseases of *Panax ginseng* C. A. Meyer on rhizosphere soil physicochemical properties, enzyme activities, and microbial communities [J]. *Agronomy*, 2023, 13(1): 210.
- [106] Zeeshan Ul Haq M, Gu G, Liu Y, *et al.* Continuous cropping of patchouli alleviate soil properties, enzyme activities, and bacterial community structures [J]. *Plants*, 2024, 13(24): 3481.
- [107] Ai B J, Gao K, Zeng G, *et al.* Impact of intercropping five medicinal plants on soil nutrients, enzyme activity, and microbial community structure in *Camellia oleifera* plantations [J]. *Microorganisms*, 2024, 12(8): 1616.
- [108] Wang Q, Zhang C, Li J, *et al.* Intercropping *Vicia sativa* L. improves the moisture, microbial community, enzyme activity and nutrient in rhizosphere soils of young kiwifruit plants and enhances plant growth [J]. *Horticulturae*, 2021, 7(10): 335.
- [109] Mbonambi S, Motsomane N, Ramdhani S, *et al.* Plant-associated bacteria and enzymes support *Canavalia rosea* growth in coastal hypersaline soils [J]. *Symbiosis*, 2024, 92(3): 369-380.
- [110] Sun M, Chen S, Kurle J E. Interactive effects of soybean cyst nematode, arbuscular-mycorrhizal fungi, and soil pH on chlorophyll content and plant growth of soybean [J]. *Phytobiomes J*, 2022, 6(1): 95-105.

[责任编辑 时圣明]