

•资源与鉴定•

林药复合系统中柔毛淫羊藿根系时空分布及产量特征

张洪彪^{1,2}, 文定梅², 王彦凯^{1,2}, 郭宝林², 索凤梅², 李豆豆^{2*}, 孙稚颖^{1*}

(1. 山东中医药大学 药学院, 山东 济南 250355;

2. 中国医学科学院 北京协和医学院 药用植物研究所, 北京 100093)

[摘要] 明确林药复合系统中柔毛淫羊藿 *Epimedium pubescens* 根系二维空间分布及产量的季节动态变化特征, 可为优化柔毛淫羊藿林下配置模式提供生态学理论基础和技术支撑。以银杏 *Ginkgo biloba* 林(YX)、黄柏 *Phellodendron amurense* 林(HB)及大田单作(CK)的柔毛淫羊藿为研究对象, 于夏季和冬季采收季分层取样测定根系空间分布特征、形态特性及生物量分配, 并采用 HPLC 测定总黄酮醇苷含量。结果表明, 柔毛淫羊藿根系空间分布在不同种植模式差异显著, HB 在表土层(0~10 cm)细根占比显著高于 YX 和 CK, YX 在较深土层(30~50 cm)较 HB 和 CK 根系分布更广。柔毛淫羊藿的根系形态受种植模式、季节变化影响显著, YX 柔毛淫羊藿在夏季 0~20 cm 土层根长度密度较 CK 降低了 56%~75% ($P<0.05$), 冬季 2 个复合系统柔毛淫羊藿根长度密度均显著高于 CK。柔毛淫羊藿地上生物量和地下生物量不同种植模式无显著差异, YX 根系生物量分配比例较 CK 和 HB 显著提高, 根状茎生物量分配比例显著降低 ($P<0.05$)。研究结果表明柔毛淫羊藿根系表现出显著的表型可塑性, 能够通过适应性调整策略提高其在复合系统中的资源获取效率。

[关键词] 林药复合系统; 柔毛淫羊藿; 根系时空分布; 细根形态; 生物量分配

Spatio-temporal root distribution and yield characteristics of *Epimedium pubescens* in Chinese medicinal herbs-agroforestry system

ZHANG Hong-biao^{1,2}, WEN Ding-mei², WANG Yan-kai^{1,2}, GUO Bao-lin², SUO Feng-mei², LI Dou-dou^{2*}, SUN Zhi-ying^{1*}

(1. School of Pharmacy, Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Ji'nan 250355, China;

2. Institute of Medicinal Plant Development, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Beijing 100093, China)

[Abstract] Clarifying the two-dimensional spatial distribution and the seasonal yield dynamics of *Epimedium pubescens* roots in agroforestry systems can provide an ecological theoretical basis and technical support for optimizing the understory cultivation patterns of *E. pubescens*. *E. pubescens* plants cultivated in *Ginkgo biloba* forests (YX), *Phellodendron amurense* forests (HB), and monocropping fields (CK) were taken as research subjects. Stratified sampling was conducted during the summer and winter harvest seasons to analyze root spatial distribution, morphological characteristics, and biomass allocation. Additionally, high-performance liquid chromatography (HPLC) was employed to determine the total flavonol glycoside content. The results demonstrated that the spatial distribution of *E. pubescens* roots exhibited significant differences among planting patterns. Specifically, the HB group showed a significantly higher proportion of fine roots in the surface soil layer (0–10 cm) than the YX and CK groups, whereas the YX group displayed more extensive root distribution in deeper soil layers (30–50 cm) than the HB and CK groups. The root morphology of *E. pubescens* was significantly influenced by planting patterns and seasonal variations. In summer, the root length density of *E. pubescens* in the YX group decreased by 56%–75% ($P<0.05$) in the 0–20 cm soil layer compared with that in the CK group,

[收稿日期] 2025-08-08

[基金项目] 国家重点研发计划项目(2022YFC3501501)

[通信作者] * 孙稚颖, 教授, 硕士生导师, 研究方向为药用植物分类与中药资源品质评价, E-mail: szyww@126.com; * 李豆豆, 博士, 助理研究员, 研究方向为药用植物栽培和林下种植, E-mail: missbean92@163.com

[作者简介] 张洪彪, 硕士研究生, E-mail: 13355386684@163.com

whereas in winter, both agroforestry systems showed significantly higher root length density than the CK group. No significant difference was observed in aboveground or belowground biomass of *E. pubescens* among different planting patterns. However, the YX group exhibited significantly higher root biomass allocation ratio and significantly lower rhizome biomass allocation ratio than the CK and HB groups. These findings indicate that *E. pubescens* roots exhibit remarkable phenotypic plasticity, enabling adaptive adjustment strategies to enhance resource acquisition efficiency in agroforestry systems.

[Key words] Chinese medicinal herbs-agroforestry system; *Epimedium pubescens*; spatio-temporal root distribution; fine root morphology; biomass allocation

DOI: 10.19540/j.cnki.cjcm.20250915.401

农林复合系统(agroforestry system)是一种基于生态位互补原理的资源集约型土地利用系统^[1-2]。该系统通过乔木层与作物层的垂直空间配置,实现了光、热、水、肥等生态资源的梯度利用^[3],在提升土地生产力的同时维持了生态系统稳定性。在我国实施严格的耕地保护政策^[4]和中药材市场需求持续扩大的背景下,中药材传统大田种植模式面临着日益突出的土地资源约束问题。林药复合系统作为农林复合系统的典型应用范式,其推广实施不仅能够缓解药用植物栽培的土地压力,更是践行“山水林田湖草沙”生命共同体理念的重要途径。

林药复合系统中,不同植物根系间必然存在交互作用,乔木根系的功能类型(深根系与浅根型)会明显调控林下植被的水分和养分获取策略,进而影响林下植被的产量。因此,明晰林药复合系统中不同配置植物根系的时空分布特征是林下药用植物产量保障的理论前提。然而目前关于复合系统根系分布特征的研究多集中在林下农作物研究,林下药用植物根系时空分布的研究相对较少。陈平^[5]对核桃-菘蓝/决明子复合系统研究发现复合系统使菘蓝、决明子根系二维空间分布格局显著改变,且其根系形态指标(平均根长度密度、根表面积)较单作显著降低40%~73%,而受到显著抑制。也有学者对核桃-小麦^[6]、杨树-紫花苜蓿^[7]、苹果-大豆^[8]复合系统研究发现木本植物根系严重抑制了小麦、紫花苜蓿、大豆的根系生长。然而,枣树-棉花^[9]、核桃-小麦^[10]复合系统结果表明复合系统显著提高了间作草本植物的根长度密度。由此可见,间作物根系空间分布和形态在复合系统发生了复杂变化。在农林复合系统中,林下植物根系与乔木根系存在显著的资源竞争关系,复合系统中的林下植物通过调整根系形态和空间分布以适应竞争环境,根系的分布特征必然会显著影响地下资源的空间分配,进而对作物的生长状况和最终产量产生重要影响^[11-13]。

杏-苜蓿^[14]、枣树-小麦^[15]复合系统研究发现,与单作相比,复合系统苜蓿、小麦产量分别下降了55%~75%、10%~40%。然而,王沛娟等^[16]研究发现距树0.5 m种植棉花产量比单作棉花高18.2%。

柔毛淫羊藿 *Epimedium pubescens* Maxim. 是小檗科淫羊藿属多年生阴生草本植物,具有补肝肾、祛风湿、强筋骨、抗肿瘤、提高免疫力等功效而被医药领域广泛应用^[17]。在当前药材市场供需格局下,淫羊藿资源呈现显著供给缺口。在耕地保护红线的政策约束下,发展林下复合种植模式已成为保障淫羊藿产业可持续发展的必然选择。本研究以银杏 *Ginkgo biloba* 林(YX)、黄柏 *Phellodendron amurense* 林(HB)及大田单作(CK)栽培模式下的柔毛淫羊藿为研究对象,通过对不同种植模式下柔毛淫羊藿细根在不同季节的空间分布和形态特性、产量和含量进行测定分析,揭示了林药复合系统对柔毛淫羊藿根系二维空间分布特征与形态特性的影响。研究结果有助于深入理解林下种植模式对柔毛淫羊藿根系发育的影响,为优化种植模式提供理论依据。

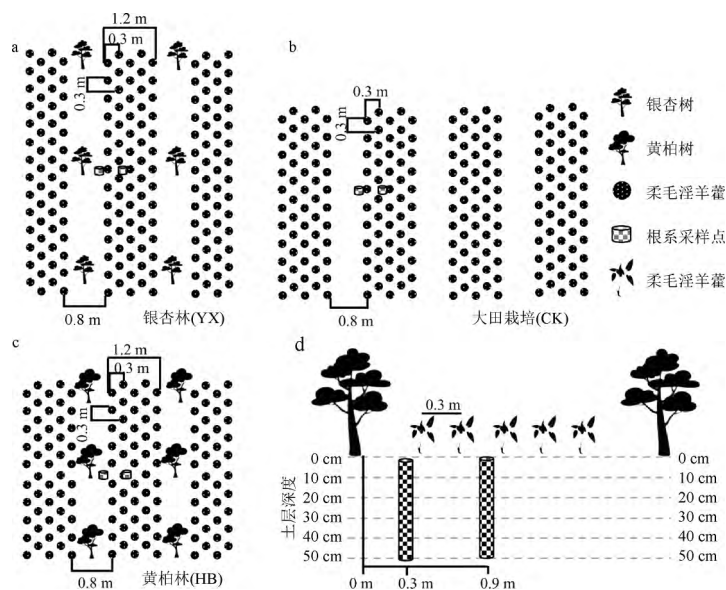
1 材料与方法

1.1 试验地概况 本研究在四川省乐山市沙湾区太平镇柔毛淫羊藿种植基地开展。试验区地处东经103°35′、北纬29°20′,属于典型的亚热带湿润季风气候区,年均气温16.5℃、年降水1800 mm、年日照1000 h,全年无霜期约280 d。试验地土壤pH 6.5,质地为粉壤土,经测定其有机质质量分数18.0 g·kg⁻¹,碱解氮90 mg·kg⁻¹,速效磷7.6 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计 本试验在柔毛淫羊藿种植基地开展田间试验,选用2019年种植的黄柏 *P. amurense* 和银杏 *G. biloba* 2种人工林和CK作为栽培试验地,各试验地的土壤本底一致。试验材料为课题组自主选育的柔毛淫羊藿 *E. pubescens* “贵同柔毛1号”一年生苗,起垄种植,垄宽120 cm,垄沟宽

30 cm 垄高 20 cm 柔毛淫羊藿种植于垄面,按 0.3 m×0.3 m 的株行距进行定植,树干位于垄沟中心。试验选取距树体或垄沟中心水平距离 30、90 cm 处进行根系取样,试验地种植布局和根系水平取样模式图参见图 1。HB 和 YX^[18] 均为深根型树种,但其吸收养分和水分的细根大量分布在土壤上层^[19],且从树干向外延伸。在距树体或垄沟中心水平距离

30 cm 取样,预期会捕捉到林木与柔毛淫羊藿竞争激烈的根系分布区域。而 90 cm 处已经远离树干,更接近垄面的中心,且林木的根系密度显著降低,林药间根系竞争的压力相对较弱。CK 在 5—10 月生长期采用遮光率 75% 的遮阳网调控光照强度,HB 和 YX 在 5—10 月的郁闭度为 40%~75%。此外,所有试验地田间管理措施保持统一。



a~c 分别为银杏林、大田栽培、黄柏林下柔毛淫羊藿种植图; d. 根系水平取样图。

图 1 3 种柔毛淫羊藿种植模式及根系水平取样示意图

Fig.1 Three planting modes and root level sampling diagrams of *Epimedium pubescens*

1.3 细根样品采集 2023 年夏季(8 月)和冬季(12 月)分别在各种种植模式用品字法随机选取 3 个具有代表性小区,每个小区在距树体或垄沟中心水平距离 30、90 cm 2 个位点,每个位点选择 3 株生长状况相近的柔毛淫羊藿植株。使用土壤取样器(绍兴上虞志宇仪器厂生产,原状取土钻直径 90 mm)分层取样,对每个位点 0~50 cm 土层按 10 cm 间隔进行取样,2 个采收季共 180 个样品。在各样品中采集柔毛淫羊藿细根系(直径<2 mm),清洗干净后选取活性细根,密封保存于-20℃以待后续分析。

1.4 生物量样品采集 2023 年冬季(12 月)从 CK 区和 2 种林药复合系统试验地各选取 5 株生长状况中等的柔毛淫羊藿植株,累计采集样本 15 株。

1.5 含量样品采集 本研究于夏季和冬季在各种种植模式分别随机选择 3 个取样小区,各取样小区选取 10 株生长状况相近的柔毛淫羊藿植株。从每株

植株上采集 2 片成熟度相似的叶片,以 10 株植株的 20 片叶片组合作为一个含量测定的样品,2 种林下和 CK 在每个季节共计 9 个含量测定样品。

1.6 根系二维空间分布 将采集的细根样品平铺于透明亚克力板上,采用 Epson Perfection V850 Pro 型扫描仪(PT Indonesia Epson Industry 公司,分辨率设置为 400 dpi)进行图像采集。利用 WinRHIZ TronMF 2012 根系分析系统(加拿大 Regent Instruments 公司)对获取的根系图像进行量化处理,测得根系总长度、总表面积和平均直径数据。将扫描完的细根样品放入 60℃鼓风干燥箱(型号 GZX-9070MBE,上海博迅实业有限公司)内烘干至恒重,采用万分之一电子天平进行称量,获得细根生物量数据。

根据根系总长度、总表面积、平均直径和细根生物量推算以下参数:土壤样方单位体积内的根长定义为根长度密度;单位体积内的根系表面积为表面

积密度;比根长通过总根长与根系干物质质量的比值计算获得。为了定量分析不同种植模式下根系的垂直分布特征,本研究采用 MLDR 模型^[20]对各处理细根生物量密度的垂直累积数据进行非线性拟合,建立细根生物量密度累积量(Y_r)与土层深度(D)之间的函数关系。基于拟合结果,进一步计算 50% 细根生物量累积对应的深度(D_{50})和 95% 细根生物量累积对应的深度(D_{95}) 2 个关键参数,计算公式如下。

$$Y_r = \frac{1}{1 + \left(\frac{D_{\max} - D}{d \times D} \right)^c} \quad (1)$$

$$D_{50} = \frac{D_{\max}}{d + 1} \quad (2)$$

$$D_{95} = \frac{D_{\max}}{1 + d \times \left(\frac{1}{10} \right)^{\frac{1}{c}}} \quad (3)$$

式中 c 、 d 为拟合参数, $D_{\max}$ 为最大取样深度。

1.7 柔毛淫羊藿各器官生物量测定 将采集的植株样品按地上部分(茎和叶)与地下部分(根状茎及根系)进行分离,分别装入纸袋后置于 60℃ 鼓风干燥箱内烘干至恒重,采用精度 0.01 g 的电子天平进行称量。本试验中,地上生物量以茎叶干物质质量表示,地下生物量则为根状茎与细根干物质质量之和。

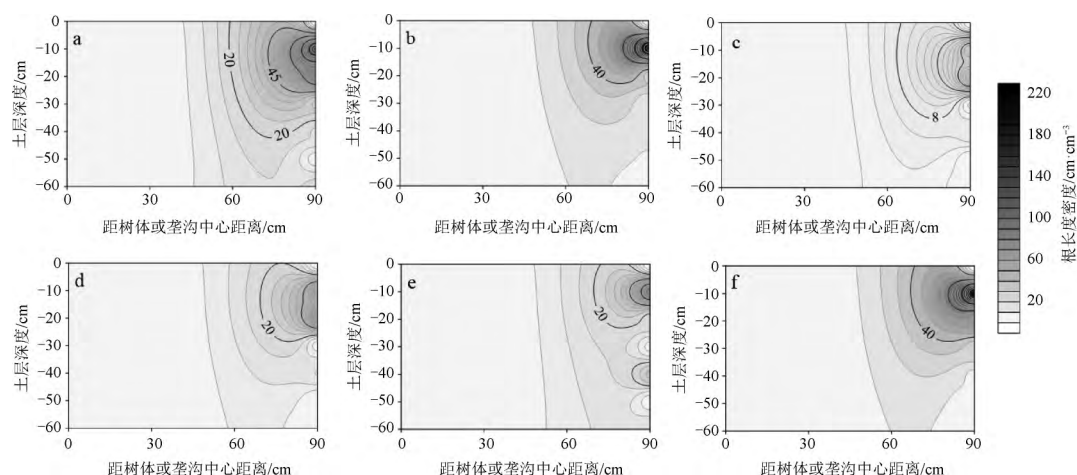
1.8 总黄酮醇苷含量测定 参考本课题组已有的方法检测朝藿定 A(纯度>97% 批号 S27246)、朝藿定 B(纯度>97% 批号 B20172)、朝藿定 C(纯度>97% 批号 B20173)和淫羊藿苷(纯度>97% 批号 S27246)

4 种黄酮醇苷含量^[21]。对照品均购自上海源叶生物科技有限公司。色谱条件: Agela Venusil XBP C₁₈ 色谱柱(4.6 mm×250 mm, 5 μm);柱温 35℃;紫外检测波长 270 nm;流动相水-乙腈(73:27),等度洗脱 18 min;流速 1 mL·min⁻¹;进样量 10 μL。

1.9 数据分析 采用 Microsoft Office Excel 2019 进行数据整理,用 Origin 2021 软件进行数据分析处理。使用 SPSS 26.0 对数据进行单因素方差分析和多重比较分析 LSD 检验, $P < 0.05$ 认为差异具有统计学意义。使用 Microsoft Office PPT 2019、Surfer 17.0 和 Origin 2021 软件绘图。

2 结果

2.1 林药复合系统中柔毛淫羊藿根系二维空间分布特征 CK 和林药复合系统中柔毛淫羊藿根长度密度二维空间分布季节特征见图 2。结果显示,柔毛淫羊藿的细根大部分集中在距垄沟中心水平距离大于 40 cm 内的 0~30 cm 土层,且随着距垄沟中心点水平距离的增加,3 种植模式下柔毛淫羊藿根长度密度均呈现随距垄沟距离急剧增加的趋势,且该趋势不受季节变化影响;在 0~60 cm 土层中,当距垄沟水平距离小于 40 cm 时,各种种植模式之间的根长度密度没有显著差异;在距垄沟水平距离 70~90 cm 的 0~20 cm 土层中,3 种植模式下柔毛淫羊藿根长度密度差异显著,且不同模式下根长度密度的差异因季节而异。具体来说,柔毛淫羊藿根长度密度在夏季的表现 HB>CK>YX;在冬季的表现 YX>HB>CK。



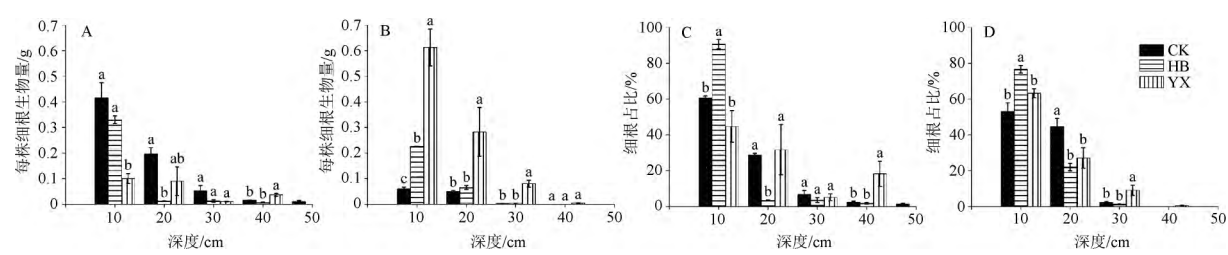
a、b、c 分别为夏季大田单作种植、黄柏林、银杏林林下种植; d、e、f 分别为冬季大田单作种植、黄柏林、银杏林林下种植。

图 2 大田单作和林药复合系统中柔毛淫羊藿根长度密度二维分布

Fig.2 Two dimensional distribution of root length density of *Epimedium pubescens* in field monoculture and Chinese medicinal herbs-agroforestry system

CK 组和林药复合系统条件下柔毛淫羊藿的细根生物量垂直分布情况见图 3。总体来说,柔毛淫羊藿的细根主要分布在浅土层(0~20 cm),且该垂直分布规律不随种植模式(CK、林药复合)和季节(夏季、冬季)的变化而改变。然而,细根在各土层的生物量及其具体分配比例在不同种植模式间有所差异,且该变化规律也受到季节变化的影响。在 10 cm 土层,各种种植模式柔毛淫羊藿细根生物量的差异性因季节变化而不同,YX 组细根生物量在夏季显著低于其他 2 种植模式(图 3A);然而在冬季又显著大于 CK 和 HB,细根生物量表现出 YX>HB>CK,

YX 细根生物量超出 CK 的 10 倍(图 3B)。此外,各种种植模式细根在 10 cm 土层均占细根总生物量的 50%左右,且 HB 林下柔毛淫羊藿细根占比显著高于其他 2 种植模式,在夏季和冬季均遵循该规律,分别为 90.68%±2.58%(夏季)、76.67%±2.08%(冬季)。在 20 cm 土层,HB 林下柔毛淫羊藿细根生物量及该土层细根占比均为最低,且该规律不受季节影响。在 30~50 cm 土层,细根生物量及其配比情况在各种种植模式间的差异,遵循相同的规律,均表现为 YX 显著高于 CK 和 HB(在夏季 40 cm 土层和冬季 30 cm 土层)。



A、C 为夏季采收;B、D 为冬季采收。CK、HB、YX 分别代表大田单作、黄柏林、银杏林(表 1、图 4~6 同)。不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)(图 4~6 同)。

图 3 大田单作和林药复合系统中柔毛淫羊藿细根在各土层生物量及其分配比例($\bar{x} \pm s$ $n=3$)

Fig.3 Biomass and distribution ratio of fine roots of *Epimedium pubescens* in various soil layers in field monoculture and Chinese medicinal herbs-agroforestry system($\bar{x} \pm s$ $n=3$)

在 2 个采收季,各种种植模式的柔毛淫羊藿 D_{50} 和 D_{95} 见表 1。各种种植模式细根生物量密度累积量达到总量 50%时的土层均为浅土层(10~20 cm)且不受季节影响,相较于 CK,YX 林下柔毛淫羊藿细根在夏季出现了明显的下移现象。然而,各种种植模式细根生物量密度累积量达到总量 95%时的土层范围较广(20~40 cm),且因季节和种植模式而异。具体来说,各种种植模式在冬季的 D_{95} 均小于夏季;且各采收季不同种植模式之间,YX 组 D_{95} 均呈现出大于 CK 和 HB 的规律。

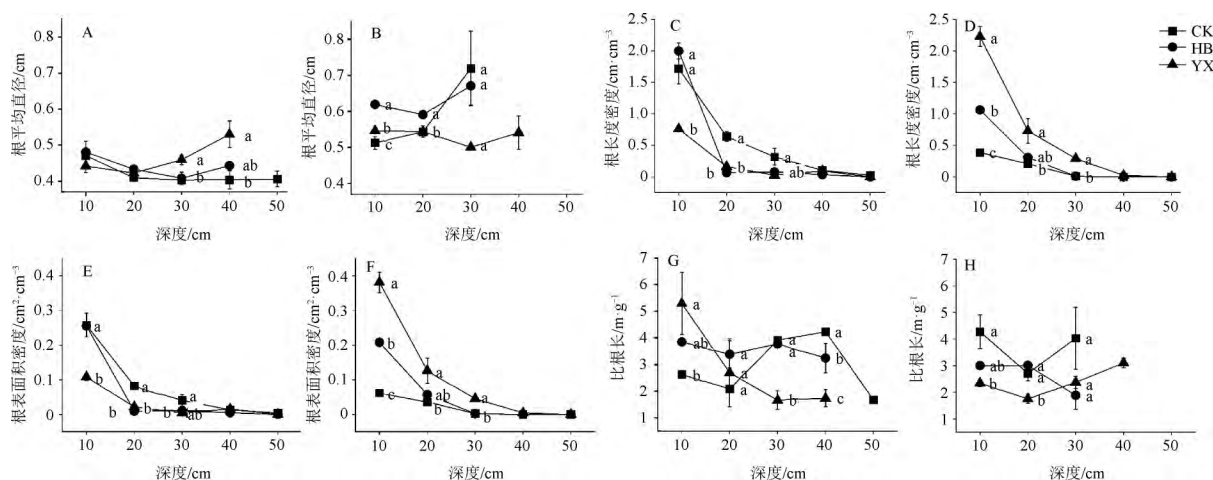
表 1 各种种植模式柔毛淫羊藿的 D_{50} 和 D_{95}
Table 1 D_{50} and D_{95} of *Epimedium pubescens* in various planting modes

季节	处理	D_{50} /cm	D_{95} /cm
夏季	CK	10	30
	HB	10	30
	YX	20	40
冬季	CK	10	20
	HB	10	20
	YX	10	30

2.2 林药复合系统中柔毛淫羊藿根系形态特征
CK 和林药复合系统的柔毛淫羊藿在 2 个采收季不同土层根系形态的变化规律见图 4。柔毛淫羊藿细根的形态特性(根平均直径、根长度密度、根表面积密度和比根长)受种植模式影响显著,且存在明显的季节差异。在夏季,各种种植模式的柔毛淫羊藿根平均直径在 10~20 cm 土层未出现显著差异;在 30~40 cm 土层,YX 林下种植的柔毛淫羊藿根平均直径显著高于 HB 林下种植和 CK。而在冬季 10 cm 土层,各种种植模式的根平均直径均值表现为 HB>YX>CK;在 20 cm 土层,HB 组柔毛淫羊藿根平均直径显著高于其他 2 个种植模式;在 30 cm 土层,各种种植模式之间未出现显著差异。在夏季 10 cm 土层,HB 组和 CK 组柔毛淫羊藿根长度密度无显著差异,均显著高于 YX 组,分别高出 163%、126%;在 20~30 cm,CK 组显著高于其他 2 种植模式。此外,在冬季 10 cm 土层,YX 组柔毛淫羊藿根长度密度显著高于 HB 组,HB 组显著高

于 CK; 在 20~30 cm 土层, YX 组显著高于其他 2 种植模式。各土层的柔毛淫羊藿的根表面积密度与根长度密度在各种种植模式间表现出相同的变化趋势和差异性。此外, 在夏季和冬季, 各种种植模式

柔毛淫羊藿比根长在不同土层的交替复杂变化。在夏季 10 cm 土层, 比根长均值表现为 YX>HB>CK; 在冬季 10 cm 土层, 比根长均值表现为 CK>HB>YX。



A、C、E、G 为夏季采收; B、D、F、H 为冬季采收。

图 4 林药复合系统中柔毛淫羊藿在不同土层的根系形态特征 ($\bar{x} \pm s$ $n=3$)

Fig.4 Root morphological characteristics of *Epimedium pubescens* in different soil layers in Chinese medicinal herbs-agroforestry system ($\bar{x} \pm s$ $n=3$)

2.3 林药复合系统中柔毛淫羊藿的产量和药用成分含量 各种种植模式的柔毛淫羊藿在冬季地上、地下生物量及各器官分配比例见图 5。方差分析结果表明柔毛淫羊藿地上、地下生物量在不同种植模式间均无

显著差异。各器官生物量分配比例在不同种植模式间有所不同。具体来说, 茎、叶分配比例在不同种植模式间无显著差异, 而 YX 林下根的生物量分配比例显著高于 CK 和 HB, 分别高出 46.67%、44.69%。

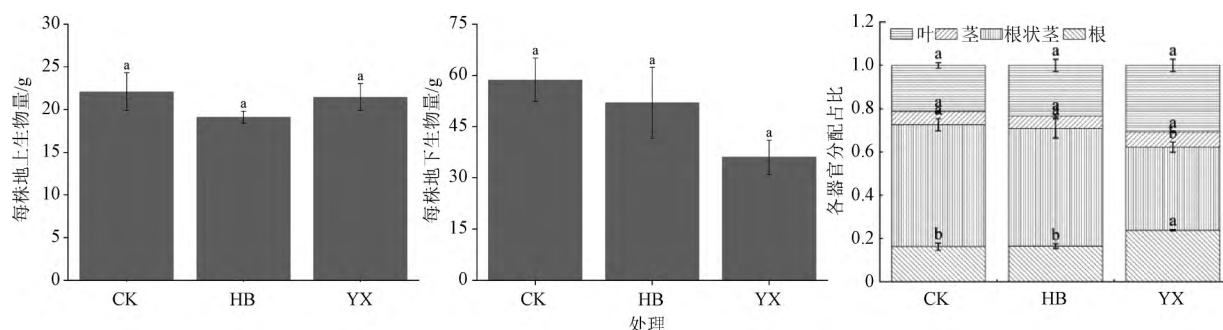


图 5 大田单作和林药复合系统柔毛淫羊藿地上、地下生物量及各器官分配 ($\bar{x} \pm s$ $n=5$)

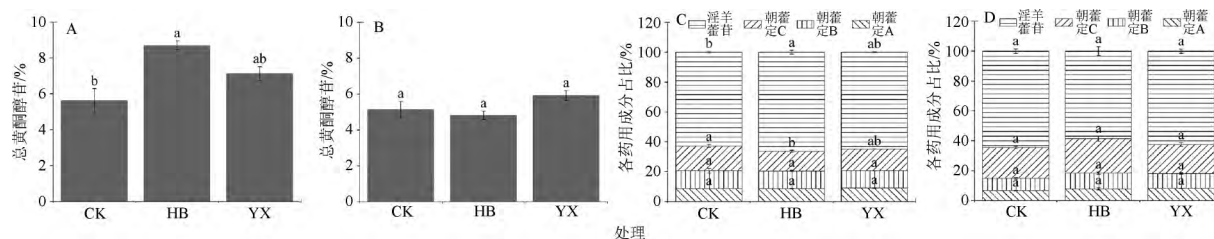
Fig.5 Overground and underground biomass and organ distribution of *Epimedium pubescens* in field monoculture and Chinese medicinal herbs-agroforestry system ($\bar{x} \pm s$ $n=5$)

各种种植模式的柔毛淫羊藿在 2 个采收季的总黄酮醇苷含量以及各药用成分占比差异比较见图 6。在夏季, 总黄酮醇苷含量表现为 HB>YX>CK, 其中 HB 林下种植柔毛淫羊藿的总黄酮醇苷含量显著高于 CK; 在冬

季各种种植模式的柔毛淫羊藿总黄酮醇苷含量无显著差异。在夏季, 各种种植模式之间柔毛淫羊藿的朝藿定 A、朝藿定 B 占比差异均不具有统计学意义; CK 组柔毛淫羊藿朝藿定 C 占比显著高于 HB 组 ($P<0.05$)。淫羊藿

苷占比显著低于 HB 组 ($P < 0.05$)。在冬季,各种植模

式之间柔毛淫羊藿的各药用成分均无显著性差异。



A、C.夏季采收; B、D.冬季采收。

图6 大田单作和林药复合系统中柔毛淫羊藿在2个采收季的总黄酮醇苷含量以及各药用成分占比的差异 ($\bar{x} \pm s$, $n=3$)

Fig.6 The differences in total flavonol glycoside content and the proportion of each medicinal component in *Epimedium pubescens* between field monoculture and Chinese medicinal herbs-agroforestry systems across two harvesting seasons ($\bar{x} \pm s$, $n=3$)

3 讨论

农林复合系统因提高土地资源利用效率增加综合收益的潜力而被广泛实践,复合系统中林下植物根系的分布(包括水平和垂直分布)是决定其水分和养分吸收效率的关键因素^[22],进而影响复合系统生产力。在农林复合系统研究中,现有成果主要集中在林农间作(如银合欢-玉米^[23]、枣树-小麦^[24])和林草复合(如杨树-苜蓿^[25]、苹果-白三叶^[26])等模式上。并且关于林农、林草复合系统中木本植物与林下植被的根系空间分布格局已有大量报道,但对林药复合系统中根系空间分布的关注严重不足。马长明等^[27]对核桃-黄芩复合系统的研究发现,间作核桃根系在垂直方向的分布范围较单作下移了10 cm,但研究未关注间作系统中黄芩及其相较单作的差异变化。陈平^[5]以核桃-菘蓝/决明子复合系统为研究对象,分析了林下药用植物(菘蓝/决明子)根系形态特征在不同土层的空间变化,但仅研究了单一树种下药用植物根系空间分布特征,无法对比药用植物在不同林下种植后根系空间分布适应策略的差异。因此,本研究以药用植物柔毛淫羊藿为研究对象,首次在2种人工林下(HB和YX)系统阐明了柔毛淫羊藿在林药复合系统中根系空间分布特征及季节变化规律,填补了药用植物在不同林药复合系统中根系空间分布差异性的空白。本研究发现柔毛淫羊藿根系垂直分布范围在不同种植模式无显著差异,均大量聚集在0~30 cm土层,且该特征在不同季节间保持稳定。然而,不同种植模式显著改变了柔毛淫羊藿根系在不同土层的垂直分配比例,柔毛淫羊藿根系在HB组10 cm土层分配比

例高达75%以上,显著高于YX组和CK组,且该垂直分布特征不随季节变化;但其在YX组30 cm以下土层分配比例(7.1%~9.4%)显著高于HB下(0.9%~2.5%)和CK(1.2%~4.6%)。此外,柔毛淫羊藿根系 D_{50} 和 D_{95} 进一步证实了其根系在YX下较深层土壤中的延伸能力更强。有学者也证明间作系统中林下植物的根系分布可能因与乔木竞争压力不同而呈现差异化适应策略。例如,白三叶在与苹果间作条件下细根倾向于表层聚集^[26],而苹果-大豆复合系统中大豆细根则表现出向下延伸的趋势^[28]。本研究发现,HB林下的柔毛淫羊藿根系主要富集于表层,YX林下则表现出更深的根系拓展。这一差异可能源于柔毛淫羊藿与2种乔木根系竞争格局的不同:HB表层根系对柔毛淫羊藿的竞争较弱,使其能够依赖表层资源维持生长;而YX根系在浅土层抢夺更多水养资源,迫使柔毛淫羊藿向较深层土壤拓展以获取水分和养分。正如冷寒冰等^[18]对银杏的根系分布特性研究表明尽管其根系最大分布深度达1.5 m,但主要用于吸收水养资源的细根仍为浅土层(0~20 cm)根系。然而,至今未有关于HB根系分布和功能特性的研究报道。此外,不同种植模式下环境因子的差异可能也会引起根系空间分布的差异性表现。孙天雨^[29]发现根长浅深比(即浅层根系长度与深层根系长度比值)与年均降水量存在极显著的正相关性($P < 0.01$)。刘炳成等^[30]发现温度通过影响土壤水分分布间接调控根系向水性生长,根系在高温干旱条件下更倾向于向深层扩展。因此,在未来的研究中,应综合考虑林下环境因子(如光、温、水、肥等)与林药复合系统根系空间分布

的互作机制,借助自动环境监测手段、同位素示踪法等定量分析林药复合系统根系互作机制,以优化林药复合系统的配置模式。

根系空间分布决定了植物对不同土层水分和养分的吸收效率,而不同土层根系形态特征(如根长度密度等)则反映了植物对土壤环境异质性的适应策略。前人研究证实,复合系统中不同植物物种间存在显著的根系形态可塑性响应差异。小麦^[15]、苜蓿^[25]、大豆^[28]和高粱^[31]在林下栽培时根长度密度普遍低于单作系统,但苜蓿/玉米^[32]间作系统中苜蓿的根长度密度却显著高于单作处理。本研究发现柔毛淫羊藿根系形态在复合系统中呈现极高的可塑性,且该可塑性因树种、季节而有所差异。夏季 YX 组柔毛淫羊藿在 0~20 cm 土层的根长度密度较单作显著降低 56%~75% ($P<0.05$),HB 组与 CK 无显著差异;冬季 YX 组柔毛淫羊藿在 0~20 cm 土层的根长度密度显著高于 HB 和 CK。不同复合系统中根系形态的差异表现均呈季节性动态变化,YX 组柔毛淫羊藿根系形态在不同季节的表现存在明显差异,这可能是由于夏季种间竞争加剧抑制了柔毛淫羊藿的根系生长,而冬季竞争压力减弱时,其通过调整资源分配策略以优化吸收效率,反映了植物对环境变化的资源获取可塑性^[33]。以上结果表明,林下植物根系形态特征不仅受间作系统调控,其响应策略还表现出明显的时间动态性(如季节性变异)。因此,未来研究需系统解析柔毛淫羊藿在林药复合系统中根系形态可塑性响应在不同时间尺度(月动态、季节周期、年际变化)上的变化规律,以揭示其根系形态可塑性的时空异质性机制。

根系的空间分布和形态特征通过调控植物对土壤资源的获取能力,直接影响其生物量积累。已有研究表明,间作系统常导致林下植物生物量降低。代元帅等^[25]研究发现,杨树-苜蓿复合系统中苜蓿产量较单作系统显著降低 43.8%,且根长度密度与产量呈显著正相关($P<0.05$)。WANG B J 等^[12]进一步证实,间作小麦和枣树的根长度密度及产量在各土层均低于相应单作系统,且枣树树龄与小麦产量呈显著负相关($P<0.05$),ZHANG W 等^[34]和 QIAO X 等^[35]研究也得出了相同结论,间作小麦均减产。本研究结果显示,各处理间地上及地下生物量均未达到显著差异水平,但 YX 处理林下根系生物量分配比例较 CK 显著提高 46.67%,这一差异可

能是柔毛淫羊藿在 YX 复合系统中处于竞争劣势,促使其资源分配向获取资源的器官(根系)倾斜。因此,在发展林下药用植物种植时,应充分考虑复合系统林木根系分布与吸收特性,在评估种间关系(竞争/互补)的基础上,优化林药复合系统配置模式,实现复合系统综合效益最大化。

4 结论

本研究首次阐明了林下种植柔毛淫羊藿的根系二维空间分布特征,且该特征因复合系统树种而有所不同:HB 林下柔毛淫羊藿根系垂直分布呈现表层(10 cm)聚集现象,而在 YX 林下柔毛淫羊藿根系表现出向深层土壤(>30 cm)延伸的适应策略。此外,柔毛淫羊藿的根系形态在不同复合系统中表现出显著的表型可塑性,且这种可塑性响应呈现明显的季节性差异:YX 林下柔毛淫羊藿在夏季 0~20 cm 土层根长度密度较单作降低了 56%~75% ($P<0.05$),而冬季 2 个复合系统柔毛淫羊藿根长度密度均显著高于 CK。尽管柔毛淫羊藿根系在不同种植模式下表现出复杂的空间异质性分布和显著的表型可塑性响应,这些形态学适应并未导致其地上和地下绝对生物量的显著变化;值得注意的是,复合种植系统显著改变了其生物量分配策略。以上结果表明柔毛淫羊藿强大的根系适应性为其在林下种植中的大规模推广提供了可靠的生态学依据,该研究不仅为解析林下药用植物的生态适应机制提供了理论基础,更对指导林药复合系统的优化配置具有重要实践价值。

[参考文献]

- [1] 陶旺兰,黄甫昭,李健星,等. 漓江流域喀斯特地区不同果药复合种植模式植物水分利用效率[J]. 林草资源研究, 2024(2): 34.
- [2] WEI W W, LIU T T, ZHANG S, et al. Root spatial distribution and belowground competition in an apple/ryegrass agroforestry system[J]. Agric Syst, 2024, 215: 103869.
- [3] ISAAC M E, BORDEN K A. Nutrient acquisition strategies in agroforestry systems[J]. Plant Soil, 2019, 444: 1.
- [4] 中华人民共和国自然资源部. 自然资源部关于进一步加强国土空间规划编制和实施管理的通知[EB/OL]. (2022-10-18) [2025-08-08]. http://gi.mnr.gov.cn/202210/t20221026_2763118.html.
- [5] 陈平. 核桃-菘蓝/决明子复合系统种间水分关系研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- [6] 甘雅文,李隆,李鲁华,等. 南疆核桃与小麦间作系统种间根直径及比根长空间分布特征[J]. 西北农业学报, 2015, 24(5): 56.

- [7] 杨涛, 鲁为华, 李斌, 等. 新疆杨树-紫花苜蓿林草复合系统中根系分布特征及生产力[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(2): 116.
- [8] 孙于卜, 毕华兴, 段航旗, 等. 苹果-大豆间作系统细根分布变异及地下竞争[J]. 生态学杂志, 2019, 38(2): 459.
- [9] 王婷, 马亮, 马英杰. 干旱区枣棉复合系统细根空间分布特征及种间地下竞争关系[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(1): 54.
- [10] 王来, 仲崇高, 蔡靖, 等. 核桃-小麦复合系统中细根的分布及形态变异研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(7): 64.
- [11] DUFOUR L, METAY A, TALBOT G, et al. Assessing light competition for cereal production in temperate agroforestry systems using experimentation and crop modelling[J]. J Agron Crop Sci, 2013, 199(3): 217.
- [12] WANG B J, ZHANG W, AHANBIEKE P, et al. Inter-specific interactions alter root length density, root diameter and specific root length in jujube/wheat agroforestry systems[J]. Agric Syst, 2014, 88(5): 835.
- [13] BOUTTIER L, PAQUETTE A, MESSIER C, et al. Vertical root separation and light interception in a temperate tree-based intercropping system of Eastern Canada[J]. Agric Syst, 2014, 88: 693.
- [14] LIU T T, WANG X Y, SHEN L, et al. Apricot can improve root system characteristics and yield by intercropping with alfalfa in semi-arid areas[J]. Plant Soil, 2025, 506(1): 91.
- [15] ZHANG W, AHANBIEKE P, WANG B J, et al. Root distribution and interactions in jujube tree/wheat agroforestry system[J]. Agric Syst, 2013, 87: 929.
- [16] 王沛娟, 樊文霞, 李燕芳, 等. 枣棉间作复合系统种植模式对棉花光合特性及产量的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(10): 2035.
- [17] 张洪彪, 文定梅, 秦凤园, 等. 林下环境因子对柔毛淫羊藿产量和含量动态变化的影响特征[J]. 中国中药杂志, 2025, 50(22): 6309.
- [18] 冷寒冰, 王福升. 银杏-鹅毛竹复层林光照和根系种间的竞争[J]. 林业科技开发, 2010, 24(6): 52.
- [19] 刘坤, 曹林, 汪贵斌, 等. 银杏生物量分配格局及异速生长模型[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(4): 12.
- [20] SILVA J S, REGO F C. Root distribution of a *Mediterranean shrub* land in Portugal[J]. Plant Soil, 2003, 255: 529.
- [21] 范雪兰, 徐超群, 曹阳, 等. 生态因子与柔毛淫羊藿药效成分含量及花、叶性状的相关性研究[J]. 中国中药杂志, 2024, 49(12): 3194.
- [22] 俞涛, 哈地尔·依沙克, 宋锋惠, 等. 枣棉间作系统枣树根系空间分布特征研究[J]. 新疆农业科学, 2012, 49(1): 46.
- [23] SMITH D M, JACKSON N A, ROBERTS J M, et al. Root distributions in a *Grevillea robusta*-maize agroforestry system in semi-arid Kenya[J]. Plant Soil, 1999, 211: 191.
- [24] 史彦江, 俞涛, 哈地尔·依沙克, 等. 枣粮(棉)间作系统枣树根系空间分布特征[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(10): 59.
- [25] 代元帅, 鲁为华, 杨涛, 等. 北疆杨树||苜蓿复合系统中根系分布特征及产量[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(6): 141.
- [26] 李会科, 李金玲, 王雷存, 等. 种间互作对苹果/白三叶复合系统根系生长及分布的影响[J]. 草地学报, 2011, 19(6): 960.
- [27] 马长明, 翟明普, 刘春鹏. 单作与间作条件下核桃根系分布特征研究[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(6): 181.
- [28] 王秀媛, 申磊, 刘婷婷, 等. ‘塞外红’苹果-大豆复合系统根系时空分布与种间竞争策略[J]. 植物生态学报, 2025, 49(5): 748.
- [29] 孙天雨. 黄土高原草地植物根系形态及生物量沿环境梯度的变化规律[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [30] 刘炳成, 刘伟. 基于植物根系仿生的土壤热湿迁移数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2004(S1): 115.
- [31] BAYALA J, TEKLEHAIMANOT Z, OUEDRAOGO S J. Fine root distribution of pruned trees and associated crops in a parkland system in Burkina Faso[J]. Agric Syst, 2004, 60(1): 13.
- [32] ZHANG G G, ZHANG C Y, YANG Z B, et al. Root distribution and N acquisition in an alfalfa and corn intercropping system[J]. J Agric Sci, 2013, 5(9): 128.
- [33] 许丽颖, 刘冰阳, 彭薇, 等. 四种东北校园绿地草本植物根叶形态性状的季节动态及协同变化[J/OL]. 草业科学[2025-08-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1069.S.20250113.1403.002.html>.
- [34] ZHANG W, AHANBIEKE P, WANG B J, et al. Temporal and spatial distribution of roots as affected by interspecific interactions in a young walnut/wheat alley cropping system in northwest China[J]. Agric Syst, 2015, 89: 327.
- [35] QIAO X, CHEN X, LEI J, et al. Apricot-based agroforestry system in southern Xinjiang of China: influence on yield and quality of intercropping wheat[J]. Agric Syst, 2020, 94: 477.

[责任编辑 马超一]