

种间靠接对中粒种咖啡嫁接苗生长的影响

林兴军¹, 李爱玲², 刘 畅³, 龙宇宙¹, 张 昂^{1*}

1. 海南省热带香辛饮料作物遗传改良与品质调控重点实验室/中国热带农业科学院香料饮料研究所, 海南万宁 571533;
2. 海南兴科热带作物工程技术有限公司, 海南万宁 571533; 3. 海南畅佳农旅科技有限公司, 海南陵水 572400

摘 要: 为研究种间靠接方式对咖啡嫁接苗生长的影响, 以中粒种咖啡热研 1 号为接穗、大粒种查理 5 号为砧木, 采用靠接法进行嫁接。设置 2 组靠接方式 (先剪砧木顶端再靠接、先靠接成活后再剪砧木顶端), 分别移入 3 种土质 (黏土、壤土、沙土) 和 4 种不同咖啡连作年限 (0、5、10、20 a) 土壤中, 以中粒种自接苗作为 CK, 研究种间靠接对嫁接苗成活率、嫁接苗植株长势指标、叶绿素含量和嫁接苗在不同土质中生长、退化以及不同连作年限土壤生长的影响。结果表明: 在接穗相同阶段嫁接, 保留砧木地上部分的靠接处理嫁接苗成活率显著高于未保留地上部分的靠接处理的成活率。采用相同的靠接方式, 在接穗“蝴蝶叶期”嫁接, 嫁接苗成活率比“士兵期”嫁接显著降低。不同嫁接方法能够显著影响咖啡嫁接苗成活率, 且接穗苗龄较小有利于提高嫁接苗成活率。不保留砧木顶端的靠接处理相对增大了根系, 增大根冠比, 促进地上部分生物量增大, 植株生长较快。保留砧木顶端的靠接处理前期地上部分生物量大, 促进地下部分的生长。芽接成活后剪掉大粒种顶端, 相对降低了地上部分生物量, 使根系生长受到抑制, 降低根系生物量。不同土质对嫁接苗根系的生长产生显著影响, 在黏土中, 中粒种根系比大粒种根系发达, 在沙土中, 大粒种根系比中粒种根系发达。随着靠接苗的生长, 嫁接成活后不及时剪除中粒种根系, 大粒种根系会随着生长缓慢退化。在不同种植年限土壤中, 种间嫁接苗成活率均为 100%, 可以有效缓解连作障碍, 显著提高成活率, 恢复地上部分生长。靠接后 2~3 d 开始出现愈合的皮层薄壁细胞, 4 d 时可见砧木与接穗之间有愈伤组织形成, 6~8 d 时砧木与接穗间 2/3 的茎段已经愈合, 8~10 d 中愈合明显。因此, 以大粒种为砧木、中粒种为接穗, 在接穗“士兵期”采用先剪掉大粒种顶端再靠接的方法可获得生长旺盛的种间嫁接苗, 可有效缓解土壤连作障碍, 提高咖啡长势。

关键词: 咖啡种间嫁接; 靠接法; 不同土质; 连作障碍; 解剖结构

中图分类号: S432.1 文献标志码: A

Effect of Interspecific Inarching on the Growth of Grafted Seedlings of Robusta Coffee

LIN Xingjun¹, LI Ailing², LIU Chang³, LONG Yuzhou¹, ZHANG Ang^{1*}

1. Hainan Key Laboratory of Genetic Improvement and Quality Regulation for Tropical Spice and Beverage Crops / Spice and Beverage Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Wanning, Hainan 571533, China; 2. Hainan Xingke Tropical Engineering Technology Co., Ltd., Wanning, Hainan 571533, China; 3. Hainan Changjia Agricultural Tourism Technology Co., Ltd., Lingshui, Hainan 572400, China

Abstract: Using the robusta coffee Reyan 1 as the scion and liberica coffee Chali 5 as the rootstock, grafting was carried out using the inarching method to investigate the effect of interspecies grafting on the growth of coffee grafted seedlings. Two sets of inarching methods were set up (cutting off the top of the rootstock first and then grafting, and grafting first and then cut off the top of the rootstock after surviving), and then transplanted into three types of soil (clay, loam, and sandy soil) and four different coffee continuous cropping years (0, 5, 10, 20 a) soil, and the robusta coffee self grafted seedlings were used as CK to study the effect of interspecific inarching on the survival rate, growth index, chlorophyll

收稿日期 2024-07-09; 修回日期 2024-08-01

基金项目 海南省自然科学基金项目 (No. 322RC780)。

作者简介 林兴军 (1981—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 咖啡栽培技术。*通信作者 (Corresponding author): 张 昂 (ZHANG Ang), E-mail: angzhang_henu@163.com。

content, and growth and degradation of grafted seedlings in the different soil types and in the different coffee continuous cropping years soil. Results showed that grafting at the same stage of scion, the survival rate of F_2 treatment (grafted seedlings with preserved aboveground parts of the rootstock) was significantly higher than that of F_1 treatment (grafted seedlings without preserved aboveground parts of the rootstock). Using the same method, grafting at the “Butterfly” stage of the scion, the survival rate of grafting seedling was significantly reduced compared to grafting at the “soldier” stage. Different grafting methods could significantly affect the survival rate of coffee grafted seedlings, and the younger age of the scion seedlings was beneficial for improving the survival rate of grafted seedlings. The treatment of F_1 increased the root system, root to shoot ratio, and promoted the increase of aboveground biomass, resulting in faster plant growth. In the early stage of F_2 treatment, the biomass of the aboveground part was high, which promoted the growth of the underground part. Cutting off the top of the rootstock after surviving relatively reduced the biomass of the aboveground part, inhibited the growth of the root system, which reduced the biomass of the root system. Different soil types had a significant impact on the growth of the root system of grafted seedlings. In clay, the root system of robusta coffee seedlings was more developed than that of liberica coffee seedlings, while in sandy soil, the root system of liberica coffee seedlings was more developed than that of robusta coffee seedlings. As the grafted seedlings grew, if the root system of robusta coffee seeds was not cut off in time after grafting and surviving, the root system of liberica coffee seedlings would slowly deteriorate with growth. In soils with different coffee continuous cropping years, the survival rate of interspecific inarching seedlings was 100%, significantly improving the survival rate, effectively alleviating continuous cropping obstacles, improving survival rate, and restoring aboveground growth. On the 2–3 days after grafting, the parenchyma cell in the cortex began to coalescent. On the 4th day, callus tissue could be seen between the rootstock and scion. On the 6–8 days, 2/3 of the stem segments between the rootstock and scion had already healed, and healing was evident on the 8–10 days. Using liberica coffee as rootstocks and robusta coffee as scions, the method of cutting off the top of liberica coffee seedling first and then inarching during the “soldier stage” of the scion can obtain vigorous interspecific grafting seedlings, which can effectively alleviate soil continuous cropping obstacles and improve coffee growth.

Keywords: coffee interspecies grafting; inarching; different soil types; continuous cropping obstacle; anatomic structure

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.12.007

海南是我国咖啡规模化生产的起源地。中粒种咖啡园多年连作后,发生连作障碍,树势衰退,对咖啡产业造成了严重影响。为提高咖啡抗逆性,保证产量和品质,海南中粒种咖啡生产中常采用种间嫁接法进行咖啡园更新。但有关嫁接咖啡的研究主要是集中在传统的腹接嫁接方式上,对接穗粗度、砧木苗龄要求较高,种苗繁育效率较低,难以发挥种间嫁接苗的优势,研究合适的种间嫁接方式能够有效提高嫁接效率和嫁接苗质量。

中粒种咖啡为 2 倍体,由于属于异花授粉,所以其后代性状分离和变异严重,群体变异很大,难以保证咖啡品种的纯度。为克服这些问题,生产上常采用嫁接的办法。嫁接属无性繁殖中的营养繁殖,是果树种苗繁育常见方法^[1]。通过嫁接可以促进植株水分和养分利用,提高植株抗逆性,增强植株的抗病害能力,克服咖啡的连作障碍^[2],解决遗传育种的问题^[3]。早前,在国内外已有种间嫁接相关研究的报道^[4]。研究结果表明种间嫁接不仅能提高咖啡抗线虫能力,还能提高产量和品质^[5]。嫁接栽培已成为克服连作障碍的有效途

径之一。近年来,不断尝试以大粒种为砧木,研发种间嫁接技术^[6-7],改善品质^[8],利用种间嫁接优势改善连作障碍取得了一定的进展^[9]。1984 年用电镜详细地观察了嫁接结合部位细胞的变化过程后,Moore 将其划分为 5 个阶段^[10]。双根嫁接可以提高黄瓜的生长速率,但使得黄瓜果实品质降低,而双断根嫁接不仅可以提高黄瓜的生长速率,增强植株的生长势,而且可以改善黄瓜果实的风味及营养品质^[8, 11]。

靠接法在咖啡方面缺乏相关研究支撑,难以发挥嫁接苗的优势。为提高种间嫁接苗长势,缓解土壤连作障碍,本试验以中粒种和大粒种种间嫁接苗为研究对象,使用不同靠接方法对种间嫁接苗的成活率、植株长势、叶绿素含量、不同土质根系性状、不同土壤连作植株长势及嫁接愈合过程的解剖结构进行研究,探索适宜中粒种和大粒种咖啡种间靠接方式,以期提高嫁接苗质量,提高老咖啡园咖啡长势,恢复咖啡生产,为大粒种咖啡砧木选育和促进种间嫁接栽培在咖啡上的推广和应用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2021 年 2 月至 2024 年 1 月在中国热带农业科学院香料饮料研究所日光温室中进行。咖啡接穗选用中粒种咖啡热研 1 号，咖啡砧木选用大粒种咖啡查理 5 号。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 选取饱满、无病虫害热研 1 号的咖啡种子和查理 5 号播种。试验分别在“士兵期”（子叶未展开似士兵带着头盔）、“蝴蝶叶期”（子叶已展开似蝴蝶）进行嫁接，接穗和砧木分别用 t 、 T 表示。嫁接时，将健壮的籽苗完整地从小床中拔出，用清水冲洗根部的土杂物，籽苗临时存放于盛有少量清水的浅容器中，使苗木斜靠容器一侧，让苗木根部浸于清水中。按照 2 种方法进行嫁接。（1） F_1 ：将查理 5 号咖啡籽苗顶部剪除，在籽苗茎干基部纵向用芽接刀开长约 3~4 cm 的切口；在热研 1 号咖啡籽苗基部纵向用嫁接刀开与查理种相同长度的切口；然后将 2 个籽苗靠接在一起，使籽苗形成层对齐，并用嫁接绑带绑缚好。（2） F_2 ：分别将查理 5 号、热研 1 号籽苗茎干基部纵向用芽接刀开长约 3~4 cm 的切口，然后将 2 个籽苗靠接在一起，使籽苗形成层对齐，并绑缚，嫁接成活后，将大粒种顶端剪除。对照为采用相同时期中粒种咖啡种子苗（ CK_0 ）、中粒种咖啡自接苗（ CK_1 ）。嫁接好的籽苗移入沙床培养。在沙床培育 1 个月后，选取长势一致的嫁接苗 F_1 ，移栽至分别装有黏土（ S_1 ）、壤土（ S_2 ）、沙土（ S_3 ）的营养袋中。在沙床培育 3 个月后，选取长势一致的嫁接苗 F_1 ，剪除中粒种根系， CK_1 剪除一个根系后，分别移栽入装有不同咖啡种植年限土壤（0、5、10、20 a）的营养袋中。营养袋规格 18 cm × 25 cm，营养袋中土体积配比为表土：有机肥=90%：10%。每个处理 3 个重复。

1.2.2 指标测定 （1）嫁接苗成活率测定。分别在嫁接 30 d 后，移入不同年限土壤后 30、60、90 d，每个重复取 50 株，统计各重复嫁接成活率。嫁接成活率=（成活株数/嫁接总株数）×100%。

（2）嫁接苗植株长势指标测定。分别在嫁接 90 d 后，移入不同土质 1、2、3 a 后，每重复随机取 10 株嫁接苗样品，清洗植株，使用直尺和游标卡尺测量嫁接苗的株高和茎粗，放入烘箱

105 °C 杀青 30 min，80 °C 烘干至恒重，称取嫁接苗各部分干重，用根系扫描仪分析嫁接苗根系生长指标总根长、总表面积、平均直径、单位土壤体积的总根长、根系总体积、根尖数、分叉数。

（3）叶绿素含量测定。分别在移入不同年限土壤后 30、60、90 d，用 SPAD 仪测定每株第一对完全展开叶片叶绿素值，每片叶片测量 3 次，取其平均值。

（4）愈伤部位结构观察。分别在嫁接 1~12 d 时取嫁接苗靠接部位修剪放到样品托上，加入樱花 OCT 包埋剂进行包埋固定，设置切片厚度为 60 μ m，修片、冷冻切片（冷冻切片机型号为 Thermo Shandon），放置。在 4 × 显微镜（型号为 Olympus CX23）下观察组织细胞结构拍照，观察靠接部位的差异。

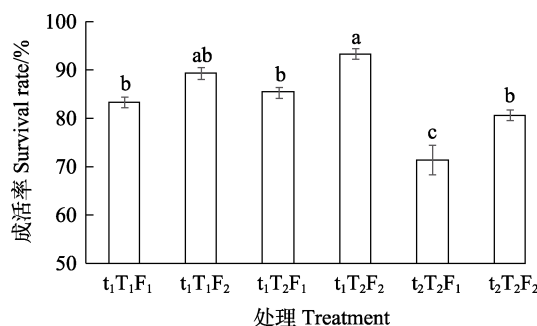
1.3 数据处理

采用 Excel 2019 软件进行数据处理和作图，使用 SPSS 23.0 软件进行方差分析，利用 Duncan's 检验法进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同靠接方法对咖啡嫁接籽苗成活率的影响

从图 1 可以看出，在 t_1 、 T_1 阶段，靠接方法 F_2 成活率最高，为 89.33%；在 t_1 、 T_2 阶段， F_2 成活率最高，为 93.33%，显著高于 F_1 （ $P<0.05$ ）；在 t_2 、 T_2 阶段， F_2 成活率最高，为 80.67%，显著高于靠接方法 F_1 （ $P<0.05$ ）。说明在接穗相同阶段嫁接， F_2 显著提高嫁接成活率。在 F_1 下， t_1T_2 处理成活率最高，为 85.33%，显著高于 t_2T_2 处理（ $P<0.05$ ），与 t_1T_1 处理差异不显著；在 F_2 下， t_1T_2



不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

图 1 不同靠接方法对咖啡嫁接苗成活率的影响
Fig. 1 Effect of different approach grafting methods on survival rate of coffee grafted seedlings

处理成活率最高，为 93.33%，显著高于 t_2T_2 处理 ($P<0.05$)，与 t_1T_1 处理差异不显著。说明在相同的嫁接方式下， t_1 时期嫁接成活率显著高于 t_2 时期。由此可见，不同嫁接方法能够显著影响咖啡嫁接苗成活率，且接穗苗龄较小有利于提高靠接嫁接苗成活率。

2.2 不同靠接方法对嫁接籽苗生长的影响

从表 1 可知， F_2 处理的茎粗最高为 6.21 mm，比 CK_0 处理粗 46%，比 F_1 处理粗 4.1%，显著高于 F_1 、 CK_0 处理； F_2 处理的株高最高为 26.63 cm，显著高于 CK_0 处理，与 F_1 处理差异不显著； F_2 处理的叶片数最高为 15.84，显著高于 F_1 、 CK_0 处理； F_1 处理的根干重最高为 4.17 g，显著高于 F_2 、 CK_0 处理； F_2 处理的茎干重最高为 3.64 g，显著高于 F_1 、 CK_0 处理；叶干重处理间差异不显著；由此可见，靠接方式 F_2 可以显著提高地上部分生物量，不同靠接方法对嫁接籽苗生长产生

显著影响。

从表 2 可知，处理根系各个指标（包括总根长、总表面积、平均直径、单位土壤体积的总根长、体系总体积、根尖数、分叉数） $F_1>F_2>CK_0$ ，差异显著，变化趋势与地上部分相反。由此可见， F_1 显著提高了根系生物量，这表明不同靠接处理对嫁接幼苗根系产生显著影响。

2.3 不同土质对嫁接苗根系生长的影响

从表 3 可以看出，嫁接 2 a 后，靠接苗在沙土中根系非常发达，根长、株高、根干重、叶干重、茎干重、茎粗、大粒种咖啡根粗均为：沙土>壤土>黏土，差异显著 ($P<0.05$)。中粒种咖啡根粗均为：黏土>沙土>壤土，差异不显著。在黏土中，根粗表现为大粒种<中粒种；在壤土中，根粗表现为大粒种>中粒种；在沙土中，根粗表现为大粒种>中粒种，说明不同土壤对嫁接苗根系生长产生显著影响，沙土促进大粒种咖啡根系生长，黏

表 1 不同靠接方法对嫁接籽苗生长的影响

Tab. 1 Effects of different approach grafting methods on growth of grafted seedlings

处理 Treatment	茎粗 Stem diameter/mm	株高 Stem height/cm	叶片数 Number of leaves	干重 Dry weight/g		
				根 Root	叶 Leaves	茎 Stem
CK_0	4.25±0.27 ^c	22.75±1.24 ^b	11.76±0.38 ^b	1.51±0.26 ^c	3.27±0.11 ^a	2.25±0.23 ^c
F_1	5.96±0.44 ^b	26.47±2.16 ^a	12.64±0.24 ^b	4.17±0.42 ^a	3.35±0.17 ^a	3.13±0.18 ^b
F_2	6.21±0.48 ^a	26.63±2.55 ^a	15.84±0.16 ^a	3.21±0.31 ^b	3.49±0.21 ^a	3.64±0.15 ^a

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between treatments ($P<0.05$).

表 2 不同靠接方法对嫁接籽苗根系的影响

Tab. 2 Effects of different approach grafting methods on root system of grafted seedlings

处理 Treatment	总根长 Total root length/m	总表面积 Total surface area/dm ²	平均直径 Average diameter/mm	单位土壤体积的总根长 Total root length per unit soil volume/(m·m ⁻³)	根系总体积 Total volume of root system/cm ³	根尖数 Number of Root tip/(×10 ³)	分叉数 Number of root branching/(×10 ³)
CK_0	49.67±1.23 ^c	6.82±0.26 ^c	3.40±0.82 ^c	49.68±0.23 ^c	7.59±0.60 ^c	17.27±0.43 ^c	20.17±1.73 ^c
F_1	162.98±10.04 ^a	21.52±3.48 ^a	9.61±1.35 ^a	162.98±10.04 ^a	23.69±2.68 ^a	104.64±3.84 ^a	80.94±1.66 ^a
F_2	84.57±2.84 ^b	10.98±3.18 ^b	6.30±1.88 ^b	84.57±8.47 ^b	11.71±2.85 ^b	20.83±0.59 ^b	26.38±2.34 ^b

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between treatments ($P<0.05$).

表 3 不同土质对嫁接苗生长的影响

Tab. 3 Effects of different soil types on growth of grafted sseedlings

处理 Treatment	根长 Root length/cm	株高 Stem height/cm	干重 Dry weight/g			茎粗 Stem diameter/mm	根粗 Diameter of taproot/mm	
			根 Root	叶 Leaves	茎 Stem		大粒种 Liberian coffee	中粒种 Robusta coffee
S_1	24.43±1.81 ^c	18.23±0.25 ^c	0.52±0.04 ^b	1.18±0.18 ^c	0.50±0.03 ^c	4.47±0.47 ^c	2.33±0.35 ^c	3.23±0.25 ^a
S_2	27.57±0.57 ^b	19.07±0.32 ^b	0.56±0.03 ^b	1.49±0.06 ^b	0.62±0.04 ^b	5.33±0.32 ^b	3.23±0.25 ^b	3.17±0.29 ^a
S_3	28.27±0.35 ^a	23.20±1.11 ^a	1.07±0.10 ^a	1.92±0.07 ^a	1.08±0.15 ^a	5.87±0.21 ^a	4.20±0.26 ^a	3.20±0.10 ^a

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between treatments ($P<0.05$).

土抑制大粒种咖啡根系生长。

从图 2、图 3 可以看出，靠接 1 a，在壤土中，大粒种靠接苗根系比中粒种发达。随着靠接苗的生长发现，如果嫁接成活后不及时剪除

中粒种根系，大粒种根系会随着生长慢慢退化。靠接 3 a 后，在壤土中，中粒种靠接苗主根粗度大于大粒种，相比靠接 1 a 的嫁接苗，大粒种根系在退化。

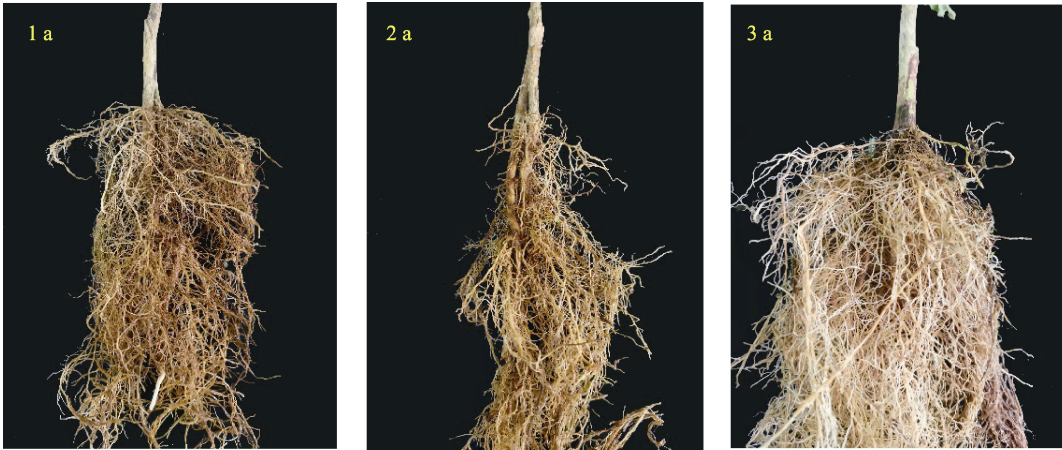


图 2 壤土中不同时间嫁接苗根系生长情况

Fig. 2 Root system growth of grafted seedlings at different times in loam soil

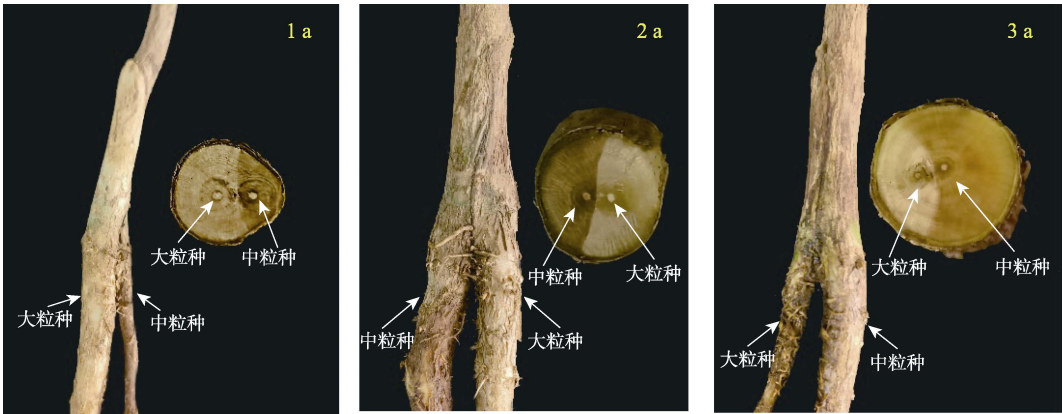


图 3 壤土中不同时间嫁接苗根系结构

Fig. 3 Root system structure of grafted seedlings at different times in loam soil

从表 4 可以看出，在不同种植年限土壤中，自接苗在 0 a 年限土壤中成活率最高，为 100%，最低为 10 a 年限土壤，为 53.3%，说明随着种植年限增加，中粒种自接苗成活率降低。在 5、10、20 a 不同种植年限土壤中，成活率 30 d>60 d>90 d，说明随着时间增加，自接苗成活率逐渐下降。相比中粒种自接苗，种间嫁接苗在不同年限土壤中成活率均为 100%，显著高于中粒种自接苗，说明种间嫁接提高了连作土壤中咖啡成活率。叶片数以中粒种自接苗在 0 a 年限土壤生长 90 d 中最高，为 9.4 片，最低为 20 a 年限土壤，为 8.0 片，说明随着种植年限增加，中粒种自接苗叶片出生速率降低。相比中粒种自接苗，种间嫁接苗叶片数 10 a 年限土壤最高，为 12.6 片，0 a 年限土壤为 12.0 片，说明连作

土壤对种间嫁接无显著抑制作用。茎粗自接苗在 10 a 年限土壤中最粗，为 1.9 cm，其次为 0 a 年限土壤，为 1.7 cm，最低为 20 a 年限土壤，为 1.4 cm，说明随着种植年限增加，中粒种自接苗茎粗先增加后降低。相比中粒种自接苗，种间嫁接苗茎粗 10 a 年限土壤最高，为 2.4 cm，相比自接苗茎粗显著提高，说明种间嫁接提高了连作土壤咖啡茎粗。由此可见，连作土壤降低了咖啡成活率，叶片和茎生长速度减缓，采用种间嫁接后，可以有效缓解连作障碍，提高成活率，恢复地上部分生长。

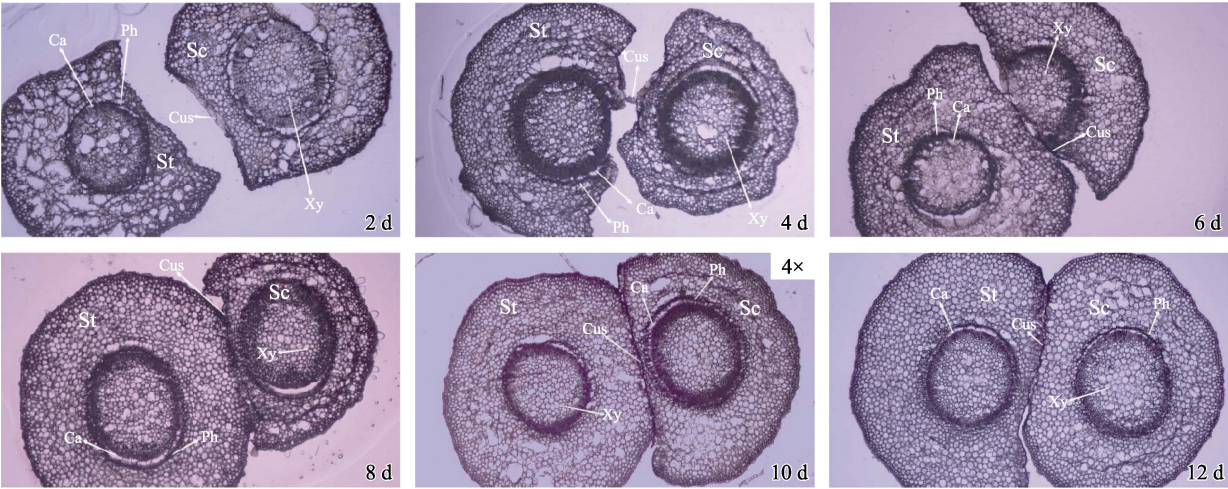
2.4 砧穗愈合过程中组织结构学观察

从图 4 可以看出，靠接后 2~3 d 开始出现愈合的皮层薄壁细胞，4 d 时可见砧木与接穗之间新愈伤组织形成，6~8 d 时砧木与接穗间 2/3 的茎段

表 4 不同种植年限土壤对嫁接苗生长的影响
Tab. 4 Effects of soil with different planting years on growth of grafted seedlings

土壤种植年限 Soil continuous cropping years/a	指标 Indexes	嫁接苗 Grafted seedlings/d			中粒种 Robusta coffee (CK ₁) /d		
		30	60	90	30	60	90
0	成活率/%	100.0±0.00 ^a	100.0±0.00 ^a	100.0±0.00 ^a	100.0±0.00 ^a	100.0±0.00 ^a	100.0±0.00 ^a
	叶绿素相对含量	44.2±0.20 ^a	34.6±0.52 ^a	23.7±0.24 ^a	40.5±0.36 ^b	26.7±0.25 ^b	25.6±0.42 ^a
	叶片数	6.6±0.28 ^a	10.0±0.37 ^a	12.0±0.42 ^a	4.6±0.24 ^b	8.0±0.31 ^b	9.4±0.42 ^b
	茎粗/mm	1.9±0.06 ^a	2.2±0.12 ^a	2.3±0.15 ^a	1.0±0.08 ^b	1.3±0.09 ^b	1.7±0.14 ^b
5	成活率/%	100.0±0.00 ^a	100.0±0.00 ^a	100.0±0.00 ^a	80.0±10.0 ^b	63.0±5.70 ^b	66.0±5.70 ^b
	叶绿素相对含量	40.5±0.32 ^b	39.0±0.47 ^a	26.1±0.26 ^b	47.7±0.63 ^a	40.9±0.49 ^a	35.6±0.37 ^a
	叶片数	7.6±0.25 ^a	8.0±0.36 ^a	11.2±0.41 ^a	5.0±0.21 ^b	6.0±0.32 ^b	8.4±0.38 ^b
	茎粗/mm	1.3±0.08 ^a	1.8±0.11 ^a	2.1±0.25 ^a	0.9±0.05 ^b	1.2±0.27 ^b	1.6±0.33 ^b
10	成活率/%	100.0±0.00 ^a	100.0±0.00 ^a	100.0±0.00 ^a	76.7±5.77 ^b	63.0±5.70 ^b	53.3±5.70 ^b
	叶绿素相对含量	41.8±0.37 ^b	44.5±0.45 ^a	40.0±0.32 ^a	44.9±0.53 ^a	41.2±0.63 ^b	36.5±0.47 ^b
	叶片数	6.0±0.36 ^a	9.6±0.42 ^a	12.6±0.28 ^a	2.6±0.04 ^b	9.9±0.13 ^b	8.6±0.27 ^b
	茎粗/mm	1.2±0.08 ^a	2.2±0.14 ^a	2.4±0.26 ^a	1.0±0.07 ^b	1.4±0.21 ^b	1.9±0.34 ^b
20	成活率/%	100.0±0.00 ^a	100.0±0.00 ^a	100.0±0.00 ^a	66.0±5.70 ^b	63.0±5.70 ^b	60.0±0.00 ^b
	叶绿素相对含量	40.1±0.33 ^a	37.3±0.28 ^a	34.0±0.37 ^a	38.0±0.56 ^b	35.0±0.39 ^b	31.9±0.48 ^b
	叶片数	6.0±0.23 ^a	9.0±0.17 ^a	11.6±0.48 ^a	4.0±0.36 ^b	4.0±0.47 ^b	8.0±0.38 ^b
	茎粗/mm	1.2±0.12 ^a	2.1±0.24 ^a	2.2±0.15 ^a	0.9±0.05 ^b	1.2±0.18 ^b	1.4±0.26 ^b

注：同行数据后不同小写字母表示相同时间处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant difference between treatments ($P<0.05$).



St: 砧木; Sc: 砧穗; Ca: 形成层; Cus: 愈伤组织; Xy: 木质部; Ph: 韧皮部。
St: Rootstock; Sc: Rootstock spike; Ca: Formation layer; Cu: Callus tissue; Xy: Xylem; Ph: Phloem.

图 4 嫁接苗愈合过程

Fig. 4 Healing process of grafted seedlings

已经愈合，8~10 d 中愈合明显。10 d 以后完全愈合。从生长来看，砧木与接穗在外形上看似愈合，但实际结构中未完全愈合和相互适应，中间的营养物质流通并不顺畅。

3 讨论

自 20 世纪 50 年代，科学家们就开始了嫁接机理的研究。虽然因作物种类、年龄、嫁接方

法及时期等的不同，植物嫁接愈合也存在差异，但砧穗间的愈合过程却基本相同。影响咖啡种间嫁接成活的因素包括接穗和砧木所处阶段、木质化程度、光照和湿度环境条件等^[12]。在接穗相同阶段嫁接，保留砧木地上部分的靠接处理嫁接苗成活率显著高于未保留地上部分的靠接处理的成活率，这可能是由于保留砧木地上部分可以保持砧木地上部分树液流动，保持根系吸水，减少砧

木回枯,从而提高成活率。采用相同的嫁接方式,在接穗“蝴蝶叶期”嫁接,嫁接苗成活率比在“士兵期”嫁接显著降低,由此可见,不同嫁接方法能够显著影响咖啡嫁接苗成活率,且接穗苗龄较小有利于提高嫁接苗成活率。经田间观察,发现“蝴蝶叶期”嫁接主要是由于此时期接穗易感染立枯病,导致存活的砧木带立枯病菌,嫁接后感染嫁接接口,造成嫁接成活率降低。

咖啡双根嫁接研究表明,中粒种双根苗和大粒种中粒种双根苗生长优势明显,以大粒种中粒种双根苗壮根壮苗效果最佳^[12]。由于采用先剪掉大粒种顶端再靠接的方法,相对增大了根系,增大根冠比,从而促进地上部分生物量增大,植株生长较快。采用先靠接再剪掉顶端的方法,前期地上部分生物量大,从而促进地下部分的生长,芽接成活后剪掉大粒种顶端,相对降低了地上部分生物量,使根系生长受到抑制,降低根系生物量。

海南省气候湿热,适宜种植中粒种咖啡和大粒种咖啡。其中,中粒种是海南的主栽品种,然而由于其根系浅,吸收根多分布在 0~30 cm 土层,主根下扎不深,不耐旱、不耐涝、不抗风。大粒种咖啡主根深生,较耐旱抗风,吸收根广泛分布在表土层^[12]。不同土质对嫁接苗根系的生长产生显著影响。土壤透气有利于大粒种根系生长,在黏土中,中粒种根系比大粒种根系发达;在沙土中,大粒种根系比中粒种根系发达。嫁接苗根系非常发达,嫁接部位形成 2 个髓心,界限明显。

本研究发现,虽然通过靠接方式获得嫁接苗具有 2 个根系,但随着靠接苗的生长,如果嫁接成活后不及时剪除中粒种根系,大粒种根系仍然会随着生长慢慢退化。靠接 3 a 后,靠接苗在壤土中,中粒种主根粗度大于大粒种主根粗度,相比靠接 1 a 的嫁接苗根系,大粒种根系在退化。这可能是由于盆栽土层浅,大粒种主根发达,有限的空间限制了大粒种主根根系的发育。中粒种吸收根发达,随着时间增加,中粒种发育超过大粒种。

前人研究表明,嫁接换根是改善植株根系生长状况、恢复长势的有效措施^[13-15]。连作障碍是世界性难题^[16-17]。由于咖啡多年生生长特性,连作栽培后主栽品种中粒种咖啡表现出根系少、烂根、减产等明显的生长障碍,严重时甚至绝产、死亡^[17]。大粒种砧木表现出抗连作障碍优势^[18]。试验发现,在不同种植年限土壤中,中粒种自接苗在 0 a 年限土壤中成活率最高,叶片数为最多,

相比中粒种自接苗,种间嫁接苗成活率均为 100%,连作土壤降低了咖啡成活率,叶片和茎生长速度减缓,采用种间嫁接后,可以有效缓解连作障碍,显著提高成活率,恢复地上部分生长。

邹薛等^[19]研究发现,嫁接后的砧木和接穗能形成完整的维管组织,植株体内的内源激素、遗传物质等发生变化,从而调节植物器官的发育,这些结果对嫁接研究有很大的参考价值。本研究在前人的研究基础上,采用冷冻切片法对靠接部分组织进行观察,靠接后 2~3 d 开始出现愈合的皮层薄壁细胞,4 d 时可见砧木与接穗之间有愈伤组织形成,6~8 d 时砧木与接穗间 2/3 的茎段已经愈合,8~10 d 中愈合明显。从生长来看,砧木与接穗在外形上看似愈合,但实际结构中未完全愈合和相互适应,中间的营养物质流通并不顺畅。另外,靠接时人工没法控制每一株苗均在同一位置进行同一深度的操作,导致砧木的韧皮部和木质部与接穗的木质部和韧皮部不能直接结合,影响愈合。由此可见,操作时直接划到木质部的深度更容易与对方愈合。因此以大粒种为砧木、中粒种为接穗,在接穗“士兵期”采用先剪掉大粒种顶端再靠接的方法可获得生长旺盛的种间嫁接苗,可有效缓解土壤连作障碍,提高咖啡长势,该研究结果为海南咖啡种间嫁接苗繁育,提升嫁接种苗质量提供技术支持及理论依据。

参考文献

- [1] 周彩霞,卢美瑛,周婧,周之珞,颜桢灵,赵静,韦雪英,李文砚. 三种因素对蛋黄果嫁接繁育的影响[J]. 中国南方果树, 2024, 53(1): 56-59.
ZHOU C X, LU M Y, ZHOU J, ZHOU Z L, YAN Z L, ZHAO J, WEI X Y, LI W Y. Influence of three different factors on grafting propagation of *Pouteria campechiana* (Kunth) Baehni[J]. South China Fruit, 2024, 53(1): 56-59. (in Chinese)
- [2] 孙燕,杨建峰,董云萍,林兴军,闫林,黄丽芳,王晓阳,陈鹏. 咖啡根系分泌物对嫁接后植株生长及叶片保护酶活性的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(5): 1310-1314.
SUN Y, YANG J F, DONG Y P, LIN X J, YAN L, HUANG L F, WANG X Y, CHEN P. Effects of root exudates on the growth and activities of leaf protective enzymes of grafted coffee plants[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(5): 1310-1314. (in Chinese)
- [3] 闫林,董云萍,黄丽芳,陈鹏,孙燕,王晓阳. 中粒种咖啡嫁接育苗技术[J]. 中国热带农业, 2011(3): 52-53.
YAN L, DONG Y P, HUANG L F, CHEN P, SUN Y,

- WANG X Y. Grafting and seedling cultivation techniques for robusta coffee[J]. China Tropical Agriculture, 2011(3): 52-53. (in Chinese)
- [4] 孙燕, 杨建峰, 董云萍. 咖啡种间嫁接对产量和品质的影响初探[J]. 热带作物学报, 2009, 30(11): 1558-1561.
SUN Y, YANG J F, DONG Y P. Effects of coffee inter-specific grafting on yield and quality[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2009, 30(11): 1558-1561. (in Chinese)
- [5] BITTENBENDER H C, SCHMITT D P, SERRACIN M, CAVALETTO C G. Fukunaga, a coffee rootstock resistant to the kona coffee root-knot nematode[D]. Honolulu: University of Hawaii, 2001.
- [6] 董云萍, 林兴军, 黄丽芳, 孙燕, 王晓阳, 闫林. 咖啡种间嫁接苗生长特性研究[J]. 热带作物学报, 2013, 34(8): 1421-1425.
DONG Y P, LIN X J, HUANG L F, SUN Y, WANG X Y, YAN L. Coffee interspecific grafting seedling growth[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2013, 34(8): 1421-1425. (in Chinese)
- [7] 曾铭文. 咖啡根系分泌物鉴定及其对咖啡幼苗化感作用研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
ZENG M W. Study on identification of coffee root exudates and allelopathic effects of coffee root exudates on coffee seedlings[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [8] 董云萍, 黄丽芳, 闫林, 林兴军, 孙燕, 王晓阳, 龙宇宙. 种间和种内嫁接对 5 个中粒种咖啡品种生长、产量及品质的影响[J]. 热带农业科学, 2015, 35(4): 15-20, 25.
DONG Y P, HUANG L F, YAN L, LIN X J, SUN Y, WANG X Y, LONG Y Z. Growth, production, and bean quality of five *Coffea canephora* genotypes as affected by interspecific and intraspecific grafting[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2015, 35(4): 15-20, 25. (in Chinese)
- [9] MARIA B, NABEELA A, KHADIJA S, ABID A, SADDIA G. Exploring graft incompatibility markers: intraspecific and interspecific grafts of tomato (*Solanum lycopersicum* L.)[J]. Scientia Horticulturae, 2023: 310.
- [10] 曾义安. 黄瓜嫁接优势的生理机制研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2004.
ZENG Y A. Studies on physiological mechanism of grafting superiority in cucumber[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2004. (in Chinese)
- [11] 高梅秀, 李树和, 刘玉芹, 孙世海, 赵仁顺, 汴凤梅, 闫秀凤. 不同砧木对茄子抗病性、生理活性及产量的影响[J]. 园艺学报, 2001, 28(5): 463-465.
GAO M X, LI S H, LIU Y Q, SUN S H, ZHAO R S, BIAN F M, YAN X F. Effect of different stocks on resistance physical activity and output of eggplant[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2001, 28(5): 463-465. (in Chinese)
- [12] 孙燕, 林兴军, 龙宇宙, 董云萍, 赵青云, 谭军. 咖啡双根嫁接苗生长及光合特性比较研究[J]. 热带作物学报, 2020, 41(7): 1387-1392.
SUN Y, LIN X J, LONG Y Z, DONG Y P, ZHAO Q Y, TAN J. Growth and photosynthetic characteristics of coffee double roots grafting seedling[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020, 41(7): 1387-1392. (in Chinese)
- [13] 张志焕, 韩敏, 张逸, 王允, 刘灿玉, 曹逼力, 徐坤. 水分胁迫对不同抗旱性砧木嫁接番茄生长发育及水气交换参数的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(2): 391-398.
ZHANG Z H, HAN M, ZHANG Y, WANG Y, LIU C Y, CAO B L, XU K. Effect of water stress on development and H₂O and CO₂ exchange in leaves of tomato grafted with different drought resistant rootstocks[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(2): 391-398. (in Chinese)
- [14] COLLA G, ROUPHAEL Y, CARDARELLI M, SALERNOC A, REAC E. The effectiveness of grafting to improve alkalinity tolerance in watermelon[J]. Environmental and Experimental Botany, 2010, 68(3): 283-291.
- [15] SELCUK O, RIZA K, NEBAHAT S, MUSTAFA U. The effects of deficit irrigation on nitrogen consumption, yield, and quality in drip irrigated grafted and un-grafted watermelon[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(5): 966-976.
- [16] 孟佳丽, 吴绍军, 余翔, 王夏雯. 不同类型砧木对西瓜连作障碍消减的影响[J]. 西北农业学报, 2019, 28(7): 1110-1118.
MENG J L, WU S J, YU X, WANG X W. Effects of different types of rootstocks on the reduction of continuous cropping of watermelon[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2019, 28(7): 1110-1118. (in Chinese)
- [17] ZHAO Q Y, XIONG W, XING Y Z, SUN Y, LIN X J, DONG Y P. Long-term coffee monoculture alters soil chemical properties and microbial communities[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 6116-6126.
- [18] 孙燕, 张昂, 赵青云, 董云萍, 龙宇宙, 林兴军. 异源双根缓解咖啡连作障碍及其机制初探[J]. 热带作物学报, 2024, 45(2): 323-329.
SUN Y, ZHANG A, ZHAO Q Y, DONG Y P, LONG Y Z, LIN X J. Heterologous double-root alleviated coffee continuous cropping obstacle and the mechanism[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2024, 45(2): 323-329. (in Chinese)
- [19] 邹薛, 徐艳, 郑炳松, 闫道良. 植物嫁接融合过程中砧木对接穗的影响研究进展[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(24): 14-16, 44.
ZOU X, XU Y, ZHENG B S, YAN D L. Research progress on the effect of rootstock on scion during plant grafting and fusion[J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2022, 50(24): 14-16, 44. (in Chinese)