

异源双根缓解咖啡连作障碍及其机制初探

孙 燕^{1,2}, 张 昂^{1,2}, 赵青云^{1,2}, 董云萍^{1,2}, 龙宇宙^{1,2*}, 林兴军^{1,2}

1. 中国热带农业科学院香料饮料研究所/海南省张福锁院士创新平台/农业农村部香辛饮料作物遗传资源利用重点实验室/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, 海南万宁 571533; 2. 云南省园林专家工作站, 云南保山 678000

摘 要: 为明确异源双根是否能缓解咖啡连作障碍及其可能机制, 本研究以大粒种咖啡 1 号 (*Coffea liberica*, No. 1) 和中粒种咖啡热研 1 号 (*Coffea canephora*, Reyan No. 1) 靠接形成大粒种-中粒种异源双根咖啡, 通过咖啡连作障碍园土壤培养幼苗, 评价植株苗木质量, 明确异源双根对咖啡连作障碍的缓解作用。通过双根无分隔、尼龙网分隔、双盆分隔等不同分根方式试验, 明确异源双根缓解咖啡连作障碍机制, 并探讨双根间在缓解连作障碍上的差异及协同作用。结果表明: 较连作障碍咖啡园非根际土, 异源双根咖啡或同源双根咖啡经根际土培养后苗木质量指数、总的植株生物量均显著下降, 连作逆境抑制咖啡生物量积累, 使苗木质量变差; 非根际土培养后, 异源双根咖啡、同源双根咖啡的苗木质量指数和总的植株生物量差异均不显著; 而根际土培养后, 异源双根咖啡较同源双根咖啡的苗木质量指数、大粒种根系生物量、中粒种根系生物量及总的植株生物量均显著提高。因此, 连作逆境虽抑制咖啡生长, 但对同源双根咖啡影响更大, 异源双根通过其大粒种根系缓解连作逆境咖啡生长障碍。为进一步明确异源双根尤其是大粒种根系缓解咖啡连作障碍的可能机制, 以不同分根方式培养异源双根咖啡, 发现较无分隔、双盆分隔处理, 连作逆境下双根尼龙网分隔后植株苗木质量佳, 并且尼龙网分隔后植株的中粒种根系长势最好, 说明大粒种根系化感物质促进中粒种根系生长。双根无分隔、双盆分隔后植株的苗木质量差异不显著, 无分隔较双盆分隔后植株的大粒种根系长势差, 即双根系在能够彼此接触的自然生长状态下, 中粒种根系抑制大粒种根系生长, 但这种抑制作用与中粒种根际化感物质无关, 尼龙网分隔、双盆分隔后大粒种根系长势差异不显著, 说明大粒种根际有无中粒种根际化感物质, 对大粒种根系生长均无影响。综上所述, 异源双根通过其大粒种根系减少自身在连作逆境中的化感抑制, 利用其根际化感物质促进中粒种根系生长, 实现根壮苗壮, 达到缓解咖啡连作障碍的目的。研究结论为异源双根靠接在大田的推广应用提供理论依据。

关键词: 咖啡; 连作障碍; 异源双根; 分根培养; 苗木质量

中图分类号: S571.2

文献标识码: A

Heterologous Double-root Alleviated Coffee Continuous Cropping Obstacle and the Mechanism

SUN Yan^{1,2}, ZHANG Ang^{1,2}, ZHAO Qingyun^{1,2}, DONG Yunping^{1,2}, LONG Yuzhou^{1,2*}, LIN Xingjun^{1,2}

1. Spice and Beverage Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Innovation Platform for Academician Zhang Fusuo of Hainan Province / Key Laboratory of Genetic Resources Utilization of Spice and Beverage Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs / Hainan Provincial Key Laboratory of Genetic Improvement and Quality Regulation for Tropical Spice and Beverage Crops, Wanning, Hainan 571533, China; 2. Yan Lin Expert Workstation of Yunnan Province, Baoshan, Yunnan 678000, China

Abstract: In order to clarify the alleviating effect of heterologous double-root on coffee continuous cropping obstacle, the soil of the continuous cropping obstacle garden of coffee was used to cultivate *Coffea liberica*, No. 1 and *C. canephora*, Reyan No. 1 heterologous double-root grafting coffee seedling. The mechanism of heterologous double-root alleviating continuous cropping obstacle was clarified through different root separation ways, and the differences and

收稿日期 2022-05-05; 修回日期 2022-06-12

基金项目 海南省自然科学基金面上项目 (No. 321MS093, No. 321MS0804); 国家自然科学基金青年基金项目 (No. 32101847)。

作者简介 孙 燕 (1983—), 女, 硕士, 副研究员, 研究方向: 热带作物生理生态与抗逆栽培。*通信作者 (Corresponding author): 龙宇宙 (LONG Yuzhou), E-mail: lyzh28007@163.com。

synergies of heterologous double-root in alleviating continuous cropping obstacle were discussed. Compared with non-rhizosphere soil, the seedling quality index and plant biomass of heterologous double-root coffee or homologous double-root coffee decreased significantly after culturing in rhizosphere soil. After non-rhizosphere soil culture, there were no significant differences in the seedling quality index or plant biomass between heterologous double-root coffee and homologous double-root coffee. The seedling quality index, root biomass of *C. liberica* and *C. canephora*, and total plant biomass of heterologous double-root coffee were significantly higher than those of homogenous double-root coffee after rhizosphere soil culture. Continuous cropping obstacle inhibited the growth of coffee, but had more effect on homologous double-root coffee. Heterogenous double-root coffee alleviated the growth obstacle of continuous-cropping coffee by *C. liberica* roots. The seedlings quality of the heterologous double-root coffee separated root by nylon net was better than that of root undivided or separated root by double pot under continuous cropping, and the root growth of *C. canephora* was the best in nylon net separation. Root allelochemicals of *C. liberica* promoted the root growth of *C. canephora*. There was no significant difference in the seedlings quality of heterologous double-root coffee between root undivided and separated root by double pot, and the *C. liberica* root growth of root undivided was worse than that of double pot separation. The root growth of *C. canephora* inhibited the root growth of *C. liberica* when the heterologous double-root were in contact with each other, but this inhibition was not related to the allelopathic substances in the *C. canephora* rhizosphere. The root growth of *C. liberica* had no significant difference in nylon net separation and double pot separation. There was no effect on the root growth of *C. liberica* with or without the allelopathic substances. of *C. canephora*. The root system of *C. liberica* alleviated the continuous cropping obstacle by reducing the inhibition of allelopathic environment and promoting the root growth of *C. canephora* by its allelopathic substances. The results would provide a theoretical basis for the application of heterologous double-root grafting in the field.

Keywords: coffee; continuous cropping obstacle; heterologous double-root; root separation and cultivation; seedling quality

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.02.012

连作障碍是世界性难题^[1-3]。咖啡是我国热区重要的优势特色作物^[4]，由于其多年生生长特性，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^[2, 5]。大粒种咖啡根系发达^[4, 6]，本课题组前期研究发现，在连作障碍下，较中粒种自根嫁接苗，以大粒种为砧木，中粒种为接穗的单砧种间嫁接苗的 N、P、Ca、Mg 吸收量分别增加 67.29%、128.21%、101.64%、58.33%，地上部和根系干物质质量分别增加 38.79%、86.25%，植株长势增强^[5, 7]；且单砧嫁接咖啡产量和咖啡豆绿原酸含量分别增加 38.46%和 40.30%^[8]，大粒种砧木表现出抗连作障碍优势。然而，咖啡连作障碍园重新定植咖啡后，植株需要 3 a 才能挂果，清园重植经济损失大。因此，推广大粒种单砧嫁接苗用于缓解咖啡连作障碍的局限性大，应用价值大打折扣。

在连作障碍园的中粒种上直接靠接大粒种，发现大粒种-中粒种异源双根当年就能明显恢复植株长势，来年进入生产期。在咖啡连作障碍园的主栽中粒种上靠接一个大粒种根系，形成新的植株个体——异源双根咖啡，为克服中粒种连作障碍、减少多年生作物更新换代经济损失、快速恢复生产提供新的思路。然而，各种作物通过嫁接缓解连作障碍的相关报道中，仅局限在单砧单

穗植株个体的研究上^[9-10]，对双根系植株鲜见报道。在咖啡生产中，虽有双根靠接缓解连作障碍的试验成效，但缓解机制并不清楚。基于砧-穗互作^[11-12]、邻株根系互作^[13-14]等均有可能影响植株生长，且大粒种、中粒种根际化感物质存在差异^[15]等研究结论，那么在中粒种上靠接一个大粒种根系后，双根克服连作障碍是通过根-穗-根互作、双根间化感物质互作、双根系接触性互作中的哪些途径来实现的？双根是否有协同作用？目前尚不清楚。因此，本研究以大粒种咖啡 1 号和中粒种咖啡热研 1 号靠接形成大粒种-中粒种异源双根咖啡，通过咖啡连作障碍园土壤培养幼苗，评价植株苗木质量，明确异源双根对咖啡连作障碍的缓解作用。通过双根无分隔、尼龙网分隔、双盆分隔等不同分根方式试验，明确异源双根缓解咖啡连作障碍的可能机制，并探讨双根间在缓解连作障碍上的差异及协同作用，以期开展定向调控，增强异源双根咖啡抗连作障碍能力并推广应用提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 材料

大粒种咖啡 1 号 (*Coffea liberica*, No. 1) 和主栽品种中粒种咖啡热研 1 号 (*Coffea canephora*,

Reyan No. 1) 的种子经沙床催芽,待子叶平展时选取长势一致的幼苗,进行大粒种与中粒种、中粒种与中粒种靠接,保证靠接口离地位置相同。成活后均保留双根系,以保证 2 个供试材料根系量大体一致。地上部选留 1 条中粒种接穗,并在靠接口以上相同位置舌接热研 1 号高产无性系的直生枝,解绑后选取长势一致,健壮的 6 月龄大粒种-中粒种异源双根咖啡和中粒种-中粒种同源双根咖啡作为试验材料。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验在中国热带农业科学院香料饮料研究所人工气候室进行,以咖啡连作障碍园植株非根际土、根际土开展幼苗分根培养试验。试验设置 6 个处理:非根际土培养下,同源双根咖啡双根间无分隔(T₁,常规培养盆,自然生长

状态)、异源双根咖啡双根间无分隔(T₂),根际土培养下,同源双根咖啡双根间无分隔(T₃)、异源双根咖啡双根间无分隔(T₄)、异源双根咖啡双根间尼龙网分隔(T₅,阻隔根系,双根间仅根际化感物质能通过)、异源双根咖啡双根间双盆分隔(T₆,双根被完全隔开,在土壤中无相互作用,双根间仅能通过根-穗-根互作产生联系),将幼苗移至装有 5 kg 土壤的营养钵中,淋足定根水,每个处理 10 盆,3 次重复。土壤肥力特征见表 1。培养过程中每隔 2 d 淋水 1 次,保持土壤湿润,控制荫蔽度 50%、温度 27 ℃左右,每隔 90 d 淋 0.1%水溶肥(N-P-K:15-15-15)1 次,浇灌量 0.5 L/盆,其他管理按常规。培养 1 a 后测定植株株高、茎粗,双根系分别取样,地上部茎、叶分别取样,测定生物量等生长指标。

表 1 土壤肥力特征
Tab. 1 Characteristics of soil fertility

指标 Index	pH	电导率 EC (μS·cm ⁻¹)	有机质 Organic mat- ter/(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline N/(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/(mg·kg ⁻¹)	钙 Ca/(mg·kg ⁻¹)	镁 Mg/(mg·kg ⁻¹)
非根际土	6.37±0.19 ^a	39.16±0.98 ^b	23.23±1.45 ^a	50.89±2.73 ^b	40.01±2.03 ^b	110.98±5.77 ^b	83.87±7.54 ^b	29.58±1.60 ^b
根际土	4.49±0.15 ^b	75.68±2.73 ^a	19.10±1.38 ^b	80.01±4.44 ^a	138.46±10.05 ^a	171.39±5.48 ^a	95.43±4.99 ^a	35.64±3.51 ^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 among treatments (P<0.05).

1.2.2 指标测定 (1)土壤肥力指标测定。参照鲍士旦^[16]的方法分别测定非根际土、根际土 pH、EC、有机质、碱解氮、速效磷、速效钾、钙、镁含量。

(2)生长指标测定。分别用米尺和数显游标卡尺测定植株株高及茎粗,并计算高径比,为保证测量结果可比性,统一选择舌接口下沿测量茎粗。整株用自来水冲洗干净,再用蒸馏水冲洗 1 遍,擦干后双根系分别取样,地上部茎、叶分别取样,105 ℃杀青 30 min,75 ℃烘干至恒重,冷却后称重,计算苗木质量指数,苗木质量指数=苗木生物量/[株高/茎粗)+(地上部干重/根干重)]^[17]。

1.3 数据处理

采用 Excel 2010 软件进行试验数据的整理与分析,采用 SPSS 16.0 软件进行计算与统计分析,采用 Duncan's 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 异源双根对连作障碍下咖啡幼苗苗木质量的影响

较连作障碍咖啡园非根际土,异源双根咖啡

和同源双根咖啡经根际土培养后株高、茎粗及苗木质量指数均显著下降,T₄较 T₂处理分别下降 36.47%、40.99%和 56.67%,T₃较 T₁处理分别下降 27.08%、44.14%和 94.20%,连作逆境使咖啡苗木质量变差。经连作障碍咖啡园非根际土培养后,异源双根咖啡、同源双根咖啡苗木质量差异不大,除株高外,其余指标在 T₁、T₂处理间差异均不显著,而经根际土培养后,异源双根咖啡较同源双根咖啡苗木质量佳,T₄较 T₃处理植株苗木质量指数显著提高,增幅达 670.83%,因此,连作逆境使咖啡苗木质量变差,但对同源双根咖啡苗木质量影响更大(图 1)。

2.2 异源双根对连作障碍下咖啡幼苗生物量的影响

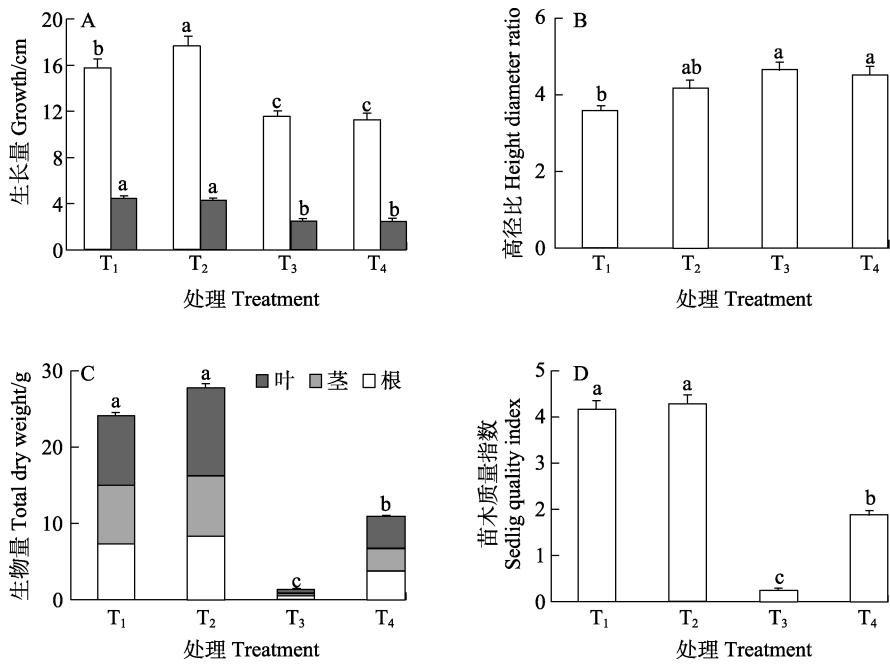
较连作障碍咖啡园非根际土,异源双根咖啡或同源双根咖啡经根际土培养后各指标均显著下降,T₄较 T₂处理大粒种根系、中粒种根系及总的根系生物量、地上部及总的植株生物量分别下降 53.68%、54.84%、54.15%、63.65%和 60.76%,T₃较 T₁处理植株总的根系生物量、地上部及总的

植株生物量分别下降 91.81%、94.99%和 94.02%，连作逆境抑制咖啡生物量积累。经连作障碍咖啡园非根际土培养后，异源双根咖啡、同源双根咖啡生物量差异不大，除大粒种根系生物量外，其余指标在 T₁、T₂ 处理间差异均不显著，而经根际土培养后，异源双根咖啡较同源双根咖啡根系壮，T₄ 较 T₃ 处理的大粒种根系、中粒种根系及总的根系生物量均显著提高，增幅分别为 628.13%、450.00%和 545.00%，同时，地上部及总的植株生物量也显著提高，增幅分别为 736.90%和 656.94%，因此，连作逆境虽阻碍咖啡生长，但对同源双根咖啡影响更大，异源双根通过其大粒种

根系促进植株生物量积累（表 2）。

2.3 不同分根方式对连作障碍下咖啡幼苗苗木质量的影响

连作障碍咖啡园根际土分根培养异源双根咖啡后，双盆分隔、无分隔处理苗木质量差异不显著（图 2）。T₆ 较 T₄ 处理除株高显著提高外，茎粗、高径比、苗木质量指数处理间均无显著差异。双根尼龙网分隔较无分隔、双盆分隔处理苗木质量佳。T₅ 较 T₄、T₆ 处理植株株高、苗木质量指数均显著提高，增幅分别为 21.25%和 52.97%、8.12%和 49.74%，尼龙网分隔后根系间仅根际化感物质能通过，因此，根际化感物质是提高连作逆境苗



不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments at the 0.05 level.

图 1 连作障碍下不同靠接处理咖啡幼苗苗木质量

Fig. 1 Seedling quality of coffee with different grafting treatments under continuous cropping obstacle

表 2 连作障碍下不同靠接处理咖啡幼苗生物量

Tab. 2 Biomass of coffee seedlings with different grafting treatments under continuous cropping obstacle

处理 Treatment	粗根 Thick root	细根 Thin root	总根系 Total root	地上部 Shoot	总计 Total
T ₁	3.96±0.41 ^b	3.37±0.22 ^b	7.33±0.85 ^a	16.76±1.36 ^a	24.09±2.04 ^a
T ₂	5.03±0.47 ^a	3.41±0.20 ^b	8.44±0.73 ^a	19.34±1.38 ^a	27.78±2.79 ^a
T ₃	0.32±0.04 ^d	0.28±0.03 ^d	0.60±0.09 ^c	0.84±0.07 ^c	1.44±0.39 ^c
T ₄	2.33±0.26 ^c	1.54±0.05 ^c	3.87±0.31 ^b	7.03±0.70 ^b	10.90±0.80 ^b

注：为便于分析双根系数据，异源双根咖啡大粒种、中粒种根系分别表示为粗根、细根，同源双根咖啡的双根系按其长势划分为粗根、细根。粗根、细根两组数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著，其余同列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。

Note: In order to analyze the data of double-root system, the *C. liberica* root and the *C. canephora* root of heterologous double-root coffee were expressed as thick root and thin root respectively, and homologous double-root coffee can be divided into thick root and thin root according to their growth. Different lowercase letters in thick root and thin root indicate significant differences among treatments at the 0.05 level. Different lowercase letters of other data in the same column indicate significant difference among treatments at the 0.05 level.

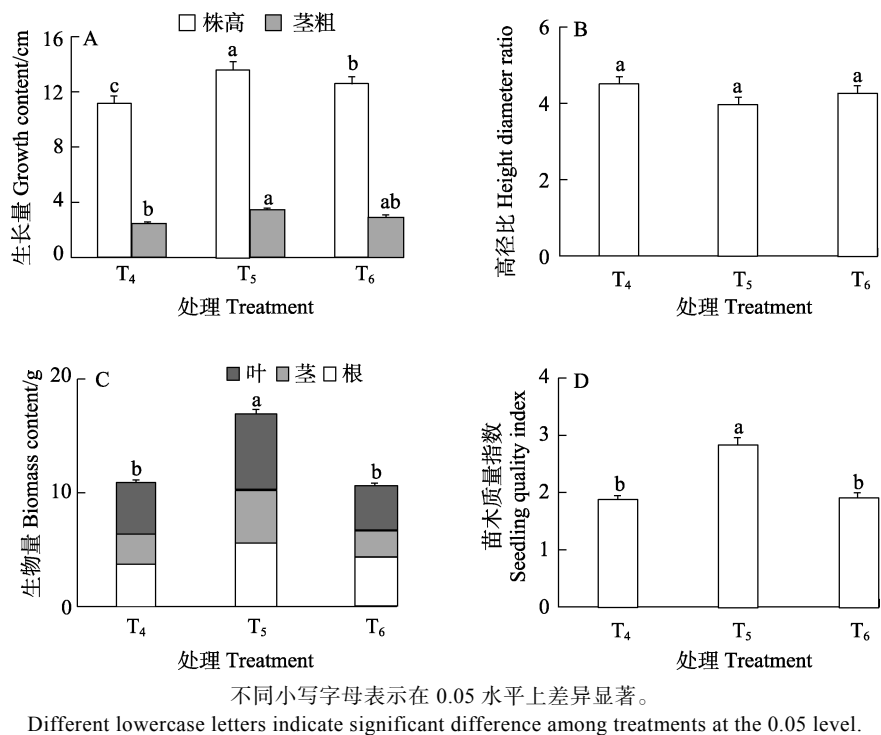


图 2 连作障碍下不同分根方式咖啡幼苗苗木质量

Fig. 2 Seedling quality of coffee with different root separation ways under continuous cropping obstacle

木质量的重要因素。

2.4 不同分根方式对连作障碍下咖啡幼苗生物量的影响

连作障碍咖啡园根际土分根培养异源双根咖啡后，双根尼龙网分隔较无分隔、双盆分隔处理根系壮，植株壮。T₅较T₄处理的大粒种根系、中粒种根系及总的根系生物量、地上部生物量均显著提高，增幅分别为38.63%、53.90%、44.70%和61.02%，T₅较T₆处理的中粒种根系及总的根系生物量、地上部生物量显著提高，增幅分别为64.89%、59.47%和84.97%，3个处理中，双根尼龙网分隔培养后植株生物量最高，并且中粒种根系长势最好，大粒种根际化感物质促进中粒种根系生长。T₄较T₆处理的大粒种根系及总的根系生物量均显著下降，降幅分别为23.61%和13.81%，而中粒种根系、地上部及

总的植株生物量处理间无显著差异，无分隔处理使双根系处于能够彼此接触的自然生长状态下，其较双盆分隔培养后植株的大粒种根系长势差，中粒种根系抑制大粒种根系生长，但这种抑制作用与中粒种根际化感物质无关，T₅、T₆处理的大粒种根系生物量无显著差异，双根尼龙网分隔及双盆分隔培养后，大粒种根际有无中粒种根际化感物质，对大粒种根系生长均无影响(表3)。因此，异源双根通过其大粒种根系减少自身在连作逆境中的化感抑制，及利用其根际化感物质促进中粒种根系生长，缓解连作逆境对植株生物量积累的抑制作用。

3 讨论

适宜的嫁接方式不仅可以保留优势品种的生长特性，还可以在在一定程度上改善植株长势^[1, 18-20]。

表 3 连作障碍下不同分根方式咖啡幼苗生物量

Tab. 3 Biomass of coffee seedlings with different root separation ways under continuous cropping obstacle g

处理 Treatment	大粒种根系 <i>C. liberica</i> root	中粒种根系 <i>C. canephora</i> root	总根系 Total root	地上部 Shoot	总计 Total
T ₄	2.33±0.26 ^b	1.54±0.05 ^b	3.87±0.31 ^c	7.03±0.70 ^b	10.90±0.80 ^b
T ₅	3.23±0.27 ^a	2.37±0.20 ^a	5.60±0.41 ^a	11.32±0.65 ^a	16.92±0.73 ^a
T ₆	3.05±0.25 ^a	1.44±0.18 ^b	4.49±0.32 ^b	6.12±0.46 ^b	10.61±0.75 ^b

注：同列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。
Note: Different lowercase letters of other data in the same column indicate significant difference among treatments at the 0.05 level.

杨志刚等^[19]、储昭胜^[20]研究发现, 黄瓜根系在水平及垂直分布上均表现为双根嫁接苗 > 单根嫁接苗 > 自根苗, 双根嫁接能改善黄瓜根系生长, 提高产量及品质。苗木质量指数综合株高、茎粗、生物量等多个指标, 能较好地反映苗木质量好坏。一般情况下, 植株生物量越大, 苗木质量指数越高, 则苗木质量也越好^[17, 21-23]。较连作障碍咖啡园非根际土, 异源双根咖啡或同源双根咖啡经根际土培养后苗木质量指数、总的植株生物量均显著下降, 连作逆境使咖啡苗木质量变差。经非根际土培养后, 异源双根咖啡、同源双根咖啡苗木质量指数或总的植株生物量均差异不显著, 而经根际土培养后, 同源双根咖啡较异源双根咖啡苗木质量指数、总的植株生物量均显著降低, 说明连作逆境对同源双根咖啡生长的抑制作用更大。经非根际土培养后, 异源双根咖啡、同源双根咖啡总的根系生物量或地上部生物量均差异不大, 而经根际土培养后, 异源双根咖啡较同源双根咖啡中粒种根系生物量、总的根系生物量及地上部生物量均显著提高, 缓解了连作逆境对异源双根咖啡中粒种根系的抑制作用, 推断大粒种根系介入后, 大粒种-中粒种异源双根起到了根壮从而苗壮的作用。

综上所述, 连作逆境抑制咖啡生物量积累, 咖啡苗木质量差, 但对同源双根咖啡影响更大, 异源双根通过大粒种根系促进植株生物量积累, 缓解连作逆境咖啡生长障碍。为进一步明确异源双根尤其是大粒种根系缓解咖啡连作障碍的可能机制, 通过不同分根方式培养异源双根咖啡, 发现连作逆境下, 双根尼龙网分隔较无分隔、双盆分隔处理苗木质量指数、中粒种根系生物量及总的植株生物量均最高, 尼龙网分隔后根系间仅根际化感物质能通过, 3 个处理中, 双根尼龙网分隔培养后植株苗木质量最好, 并且中粒种根系长势最好, 说明大粒种根际化感物质促进中粒种根系生长。双根无分隔处理使双根系处于能够相互接触的自然生长状态下, 双根可以占据彼此生长位, 双盆分隔使双根系被完全分隔, 无相互作用, 双根无分隔较双盆分隔培养后大粒种根系及总的根系生物量均显著下降, 中粒种根系抑制大粒种根系生长, 但这种抑制作用与中粒种根际化感物质无关, 双根尼龙网分隔及双盆分隔培养后大粒种根系生物量无显著差异, 说明大粒种根际有无中粒种根际化感物质, 对大粒种根系生长均无影

响。另一方面, 双根无分隔较双盆分隔培养后苗木质量指数、总的植株生物量均差异不显著, 即两个处理苗木质量差异不大, 推断中粒种根系对大粒种根系生长的抑制作用与大粒种根系对中粒种根系生长的化感促进, 二者之间的作用抵消。综上所述, 异源双根通过其大粒种根系减少自身在连作逆境中的化感抑制, 并利用其根际化感物质促进中粒种根系生长, 实现根壮苗壮, 缓解咖啡连作障碍。

参考文献

- [1] 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)
- [2] 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.
- [3] 邹春蕾, 刘长远, 王丽萍, 王辉, 辛彬, 孙宝山, 姜闯. 嫁接辣椒根际土壤氧化还原酶及水解酶活性与疫病抗性的关系[J]. 东北农业大学学报, 2015(4): 29-35.
ZOU C L, LIU C Y, WANG L P, WANG H, XIN B, SUN B S, JIANG C. Relationship between soil oxidoreductase and hydrolase activity in rhizosphere of grafted seedlings and the *Phytophthora capsici*-resistant of grafted peppers[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2015(4): 29-35. (in Chinese)
- [4] 孙燕, 龙宇宙. 咖啡栽培技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016: 1-3.
SUN Y, LONG Y Z. Cultivation techniques of coffee[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2016: 1-3. (in Chinese)
- [5] 孙燕, 董云萍, 龙宇宙, 林兴军, 谭军, 闫林, 黄丽芳, 王晓阳. 种间嫁接对连作障碍土壤上咖啡生长及养分吸收特性的影响[J]. 热带农业科学, 2019, 39(8): 5-10.
SUN Y, DONG Y P, LONG Y Z, LIN X J, TAN J, YAN L, HUANG L F, WANG X Y. Influences of interspecific grafting on growth and nutrient absorption characteristics of coffee in continuous planting obstacle soil[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2019, 39(8): 5-10. (in Chinese)
- [6] 江梅. 不同土壤条件下中粒种和大粒种咖啡的根系活动类型[J]. 世界热带农业信息, 1994(4): 14.
JIANG M. Root activity patterns of *Coffea canephora* and *Coffea liberica* under different soil conditions[J]. World Tropical Agriculture Information, 1994(4): 14. (in Chinese)

- [7] SUN Y, YANG J F, HUANG L F, DONG Y P, YAN L, LIN X J, WANG X Y, CHEN P. Study on the characteristics of grafting coffee nutrient content and the influence factors of absorbing nitrogen, phosphorus and potassium[C]//The 26th International Conference on Coffee Science, 2016: 54.
- [8] 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)
- [9] 段曦, 孙晨晨, 孙胜楠, 吴桐秀, 王洪涛, 毕焕改, 艾希珍. 嫁接辣椒根系分泌物对根腐病和青枯病的影响[J]. 园艺学报, 2017, 44(2): 297-306.
DUAN X, SUN C C, SUN S N, WU G X, WANG H T, BI H G, AI X Z. Effects of grafted pepper root exudates on root rot and bacterial wilt[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2017, 44(2): 297-306. (in Chinese)
- [10] GILARDI G, BAUDINO M, MOIZIO M. Integrated management of *Phytophthora capsici* on bell pepper by combining grafting and compost treatment[J]. Crop Protection, 2013, 53: 13-19.
- [11] YANG Y Z, MAO L Y, JITTAYASOTHORN Y, KANG Y M, JIAO C, FEI Z J, ZHONG G Y. Messenger RNA exchange between scions and rootstocks in grafted grapevines[J]. BMC Plant Biology, 2015, 15(1): 251.
- [12] TABATA R, SUMIDA K, YOSHII T, OHYAMA K, SHINOHARA H, MATSUBAYASHI Y. Perception of root-derived peptides by shoot LRR-RKs mediates systemic N-demand signaling[J]. Science, 2014, 346(6207): 343-346.
- [13] 董云萍, 朱华康, 赵青云, 孙燕, 林兴军, 张玲艳, 龙宇宙. 间作对咖啡和澳洲坚果根系形态、分布及养分累积的影响[J]. 热带作物学报, 2021, 42(2): 405-413.
DONG Y P, ZHU H K, ZHAO Q Y, SUN Y, LIN X J, ZHANG L Y, LONG Y Z. Effect of coffee and macadamia intercropping on root morphology, distribution and nutrient accumulation[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(2): 405-413. (in Chinese)
- [14] LIVESLEY S, GREGORY P, BURESH R. Competition in tree row agroforestry systems. 1. distribution and dynamics of fine root length and biomass[J]. Plant and Soil, 2000, 227(1/2): 149-161.
- [15] 曾铭文. 咖啡根系分泌物鉴定及其对咖啡幼苗化感作用[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)
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO S D. Soil agrochemical analysis (3rd ed)[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000. (in Chinese)
- [17] 欧建德, 吴志庄. 南方红豆杉苗龄型对苗木质量与造林成效的影响[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(11): 10-12.
OU J D, WU Z Z. Effect of seedling age types on the seedling quality and post-transplanting performance of *Taxus wallichiana* var. *mairei*[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2016, 44(11): 10-12. (in Chinese)
- [18] COLLA G, ROUPHAEL Y, CARDARELLI M, SALERNO A, REA E. The effectiveness of grafting to improve alkalinity tolerance in watermelon[J]. Environmental and Experimental Botany, 2010, 68(3): 283-291.
- [19] 杨志刚, 崔世茂, 陈之群, 孔祥悦, 高丽红. 灌溉下限与嫁接方式对温室黄瓜根系生长及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(4): 61-64.
YANG Z G, CUI S M, CHEN Z Q, KONG X Y, GAO L H. Effects of irrigation lower limit and grafting methods on root growth and water use efficiency of cucumber in greenhouse[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(4): 61-64. (in Chinese)
- [20] 储昭胜. 双砧木嫁接对黄瓜生理特性和产量品质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
CHU Z S. Effects of the double-stock grafting on the physiological characteristics, yield and quality of cucumbers[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- [21] 刘小金, 徐太平, 杨曾奖, 张宁南. 脱落酸对檀香幼苗生长、光合及叶片抗氧化酶活性的影响[J]. 南京林业大学学报, 2016, 40(3): 57-62.
LIU X J, XU D P, YANG Z J, ZHANG N N. Effects of abscisic acid on growth, photosynthesis and antioxidant enzyme activities of *Santalum album* seedlings[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2016, 40(3): 57-62. (in Chinese)
- [22] 李小茹, 芦建国, 柏小娟. 不同氮磷钾配比缓释肥对夏蜡梅、美国蜡梅容器苗生长的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2017, 44(1): 55-59.
LI X R, LU J G, BAI X J. Effects of slow-release fertilizer with different N, P and K ratios on the growth of potted *Sinocalycanthus chinensis* and *Calycanthus floridus* seedlings[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2017, 44(1): 55-59. (in Chinese)
- [23] 唐海龙, 董文渊, 王林昊, 张营, 顾宝, 付建生, 谢泽轩. 容器材质规格和缓释肥量对箬竹容器育苗生长的影响[J]. 西南林业大学学报, 2016, 36(3): 38-43.
TANG H L, DONG W Y, WANG L H, ZHANG Y, GU B, FU J S, XIE Z X. Effect of different container material, container size and slow release fertilizer on the growth of container seedlings of *Qiongzhusua tumidinoda*[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2016, 36(3): 38-43. (in Chinese)