

雷安淇,李秋爽,李艳,等.共生真菌对伦晚脐橙果实品质和根际土壤性状的影响[J].华中农业大学学报,2022,41(5):77-83.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.05.010

共生真菌对伦晚脐橙果实品质和根际土壤性状的影响

雷安淇¹,李秋爽¹,李艳²,邹英宁¹,吴强盛¹

1.长江大学园艺园林学院,荆州 434025; 2.湖北省兴山县特产局,兴山 443711

摘要 为探究接种丛枝菌根真菌和内生真菌对脐橙果实品质和土壤性状的影响,对8年生田间栽培的枳砧伦晚脐橙接种丛枝菌根真菌 *Acaulospora scrobiculata*、*Diversispora spurca*、*D. versiformis* 和内生真菌 *Piriformospora indica*,分析了伦晚脐橙果实品质和根系/根际土壤性状。结果显示:接种树的根系真菌感染率为23.2%~27.4%,比未接种树显著提高了17%~38%;共生真菌接种显著提高了脐橙坐果量、果肉质量和单果质量,分别提高了65%~152%、20%~36%和13%~34%;减少了果实硬度(22%~39%),对果实色差、纵横径、葡萄糖、果糖和蔗糖含量等均有不同程度的提高,但因真菌菌种而异。此外,共生真菌还显著提高了土壤团聚体稳定性以及有机碳、有效磷、球囊霉素相关土壤蛋白含量,分别比未接种提高了23%~31%、4%~26%、53%~147%和10%~138%,但抑制了速效钾含量。相关性分析表明,根系真菌感染率与果实糖组份、可溶性固形物、易提取球囊霉素相关土壤蛋白含量、土壤团聚体稳定性、有机碳和有效磷呈现极显著或显著正相关关系。因此,共生真菌通过根系感染促进果实糖分积累,并通过提高土壤结构和肥力等改善土壤环境。综合分析,*D. spurca*对果实外观品质、糖组份以及土壤结构和肥力的促进效果最突出。

关键词 内生真菌;伦晚脐橙;团聚体;果实品质;土壤结构;肥力

中图分类号 S666.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2022)05-0077-07

伦晚脐橙是湖北省三峡库区重点发展的晚熟脐橙品种之一,商品成熟期在3月中下旬到5月中下旬,满足国内春季鲜果销售市场,具有较高的经济价值。但伦晚脐橙果实也面临与花、春梢等同时竞争养分以及果实枯水等问题,导致品质下降^[1]。柑橘根际土壤中存在一些有益的微生物,其中丛枝菌根(AM)真菌能与其根系建立互惠的丛枝菌根共生体^[2]。大量的盆栽试验证实AM真菌能够增强宿主植物对营养的吸收,特别是N和P^[3],也促进光合产物的积累以及抗逆性^[2,4]。然而,绝大多数的研究都是在盆栽条件下进行的,尚缺乏足够的田间接种试验来阐明AM真菌在柑橘上的作用。姚青等^[5]对田间胜山伊予柑接种 *Glomus mosseae*, 研究表明与常规施磷量相比,减少磷使用量可增加侵染,并对果实着色有正效应。在红橘和罗伯逊脐橙上接种 *Diversispora versiforme*, 结果显示 *D. versiforme* 促进了

罗伯逊脐橙果实外观品质和总黄酮含量,对红橘果实外观品质和总黄酮含量影响没有显著差异;接种处理也促进了2种柑橘品种果实Vc和可溶性固形物含量^[6]。这些研究表明AM真菌在柑橘田间应用有一定的作用,但取决于菌根真菌和柑橘基因型的组合。

AM真菌目前尚不能实现大面积的离体纯培养,限制了它的应用。内生真菌印度梨形孢(*Piriformospora indica*)具有类似AM真菌的功能,且能大面积离体纯培养^[7]。前期研究显示印度梨形孢能侵染枳并促进其生长以及提高番茄品质^[7-8]。但印度梨形孢在伦晚脐橙的田间应用效果还不清楚。本研究将3种AM真菌以及印度梨形孢应用于田间伦晚脐橙,评价其对果实内外品质以及土壤性状的影响,旨在为将AM真菌和*P. indica*应用于伦晚脐橙生产提供技术和理论支撑。

收稿日期:2022-04-13

基金项目:湖北省农业科技创新行动项目(鄂农发【2018】1号);湖北省百校联百县高校服务乡村振兴科技支撑行动计划(BXLBX0324)

雷安淇, E-mail: 2399756836@qq.com

通信作者:吴强盛, E-mail: wuqiangsh@163.com

1 材料与方法

1.1 共生真菌接种体

供试 AM 真菌为细凹无梗囊霉 (*Acaulospora scrobiculata*)、粘屑多样孢囊霉 (*Diversispora spurca*) 和地表多样孢囊霉 (*D. versiformis*), 由长江大学根系生物学研究所提供, 以白三叶为宿主进行盆栽繁殖 3 个月, 收集根段和生长基质作为菌根真菌接种物, 内含孢子、感染根段、孢子果和菌丝。印度梨形孢由长江大学生命科学学院田志宏教授提供, 采用 Yang 等^[7] 方法获得孢子悬浮液, 密度为 1.72×10^8 CFU/mL。

1.2 试验设计

本试验采用单因素试验设计, 包括接种 *A. scrobiculata*、*D. spurca*、*D. versiformis*、*P. indica* 和不接种外源真菌(对照)共 5 个处理, 每个处理重复 4 次(2 棵树/重复), 共 40 棵树。

1.3 共生真菌接种

2019 年 5 月 10 日, 在宜昌市兴山县峡口镇某柑橘园 ($31^{\circ}12'N$, $110^{\circ}79'E$) 等高梯田种植的 8 年生枳砧伦晚脐橙树(树体大小和生长势基本一致, 果实已被采摘)进行真菌接种。接种前, 土著 AM 真菌对根系的侵染率大致为 18.7%。对于 AM 真菌处理, 在树干周围富集当年生须根的区域, 挖取 2 个槽(长、宽、高均 20 cm), 每槽施入 400 g AM 真菌菌剂, 而印度梨形孢的接种量为每棵树 9.25 g 菌丝加 1.5 L 孢子悬浮液, 均匀地施入 2 个槽中。对于未接种处理, 同时施入 800 g 灭菌 AM 菌剂和等量灭活的印度梨形孢悬浮液。

1.4 样品采集和测定方法

2020 年 4 月 17 日结束试验, 采集处理树果实 10 个/棵以及少量根际土和根系, 带回实验室。用游标卡尺直接测量果实纵、横径, 电子天平称量单果质量, CR10(日本)色差计测定果实色差, GY-B(中国)测定果实硬度, WYT-4(中国)手持测糖仪测定可溶性固形物含量, 采用滴定法^[9]测定可滴定酸含量。果实蔗糖、果糖、葡萄糖含量参照分光光度法^[9]进行测定。

依照 Phillips 等^[10]方法测定真菌侵染情况。参考 Wu 等^[11]方法测定易提取球囊霉素相关土壤蛋白(easily extractable glomalin-related soil protein, EE-GRSP)和难提取球囊霉素相关土壤蛋白(difficultly extractable glomalin-related soil protein, DE-GRSP)含量。依照湿筛法^[12]测定水稳性团聚体粒级分布,

然后根据 Kemper 等^[13]方法计算团聚体平均质量直径(mean weight diameter of aggregate, MWD)。依据重铬酸钾容量法-外加热法^[14]测定土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)。采用土壤养分测定仪(HM-TYD)分析土壤铵态氮、硝态氮、有效磷以及速效钾含量。

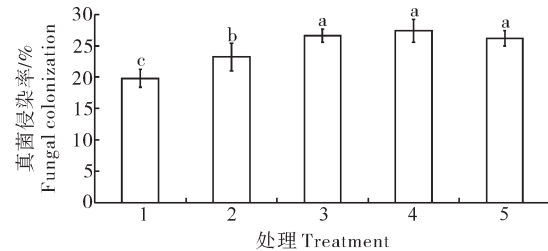
1.5 数据分析

运用 SAS 8.1 软件的 ANOVA 过程对处理间作差异性测验, 采用邓肯新复极差法进行多重比较分析。

2 结果与分析

2.1 共生真菌对伦晚脐橙根系真菌侵染率的影响

图 1 显示, 接种共生真菌显著提高伦晚脐橙根系真菌侵染率, 较对照提高了 17%~38%, 其中接种 *A. scrobiculata* 相对较低, 其他 3 个共生真菌均显著促进侵染, 且 3 个接种处理间差异不显著。



1. 对照 Control; 2. *A. scrobiculata*; 3. *D. spurca*; 4. *D. versiformis* 5. *P. indica*.

图 1 接种共生真菌对根系真菌侵染率的影响

Fig.1 The effect of inoculation with symbiotic fungi on root fungal colonization

2.2 共生真菌对伦晚脐橙果实外在品质的影响

所有共生真菌接种均显著提高了伦晚脐橙的坐果量, 与未接种处理相比, 接种 *A. scrobiculata*、*D. spurca*、*D. versiformis* 和 *P. indica* 分别增加了 117%、65%、152%、104%(表 1)。接种 *A. scrobiculata*、*D. spurca*、*D. versiformis* 和 *P. indica* 的伦晚脐橙果实硬度均显著下降, 分别下降了 39%、27%、22%、26%。共生真菌对果实色差有一定的改善作用, 但只有接种 *D. spurca* 和 *D. versiformis* 与对照间差异显著。接种共生真菌使果实横径显著增加, 与对照相比, 接种 *A. scrobiculata*、*D. spurca*、*D. versiformis* 和 *P. indica* 分别增加了 6%、11%、7%、8%。在接种处理中, 仅接种 *D. versiformis* 使果实纵径显著增加(7%), 其余处理与对照差异不显著。共生真菌对伦晚脐橙果实色差有一定的改善作用, 其中接

种 *D. spurca* 和 *D. versiformis* 达到显著水平。接种 *A. scrobiculata*、*D. spurca*、*D. versiformis* 和 *P. indica* 显著提高了果肉质量和单果质量,果肉质量分别增加了20%、36%、23%和29%,单果质量分别增加

了13%、34%、21%和31%。共生真菌接种也显著地促进了果皮厚度和果皮质量的增加,但因菌种而起。总之,接种 *D. versiformis* 对伦晚脐橙果实外在品质的促进作用最突出。

表1 接种不同共生真菌对伦晚脐橙果实外在品质的影响

Table 1 Effects of inoculation with different symbiotic fungi on the external quality of Lane Late navel orange fruits

| 处理 Treatment | 色差 Coloration value | 硬度/ $\times 10^5$ (kg/cm ³) Hardness | 坐果量 Fruit number | 纵径/mm Vertical diameter | 横径/mm Horizontal diameter | 果肉质量/g Flesh weight | 果皮质量/g Peel weight | 单果质量/g Single fruit weight |
|------------------------|---------------------------|--|------------------------|-------------------------------|---------------------------------|------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| 对照 Control | 70.6±1.2b | 31.9±4.9a | 23±3d | 65.4±2.1b | 62.7±1.7c | 94±4c | 43±5c | 137±4d |
| <i>A. scrobiculata</i> | 71.4±1.9ab | 19.6±1.5c | 50±4ab | 66.5±2.5ab | 66.7±1.8b | 113±6b | 42±2c | 155±5c |
| <i>D. spurca</i> | 73.0±2.3a | 23.3±1.2b | 38±4c | 68.6±2.5ab | 69.7±1.2a | 128±5a | 56±5b | 184±9a |
| <i>D. versiformis</i> | 73.0±2.7a | 25.0±2.4b | 58±3a | 69.9±1.9a | 67.1±1.7ab | 116±8b | 50±2b | 166±7b |
| <i>P. indica</i> | 71.4±2.2ab | 23.6±2.2b | 47±2b | 68.4±2.8ab | 67.5±1.9ab | 121±7ab | 62±7a | 179±8a |

注:表中不同小写字母表示处理间在0.05水平差异显著。下同。Note: Different letters in the table indicate significant differences 0.05 level among treatments. The same as below.

2.3 共生真菌对伦晚脐橙果实内在品质的影响

接种不同共生真菌对伦晚脐橙果实可溶性固形物以及葡萄糖、果糖和蔗糖含量的影响结果(表2)显示,接种 *A. scrobiculata*、*D. spurca*、*D. versiformis* 和 *P. indica* 显著提高了果糖含量,分别提高7%、10%、8%、10%。接种3种AM真菌(*A. scrobiculata*、*D. spurca*和*D. versiformis*)均显著提高了果实葡萄糖含

量,分别提高了7%、14%、9%,但接种 *P. indica* 处理与对照无显著差异。接种 *D. spurca*、*D. versiformis* 和 *P. indica* 均显著提高了果实蔗糖含量,分别提高了19%、5%和15%,但 *A. scrobiculata* 没有改变果肉蔗糖含量。表2还显示,接种 *A. scrobiculata*、*D. spurca*、*D. versiformis* 和 *P. indica* 均显著提高了果实可溶性固形物含量,分别提高了22%、14%、27%和16%。

表2 接种不同共生真菌对伦晚脐橙果实内在品质的影响

Table 2 Effects of inoculation with different symbiotic fungi on the intrinsic quality of Lane Late navel orange fruits

| 处理 Treatment | 葡萄糖/(mg/g) Glucose | 果糖/(mg/g) Fructose | 蔗糖/(mg/g) Sucrose | 可溶性固形物/% Soluble solids |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------------|
| 对照 Control | 69.35±1.08c | 249.9±2.5c | 249.9±4.1d | 11.85±0.60e |
| <i>A. scrobiculata</i> | 74.11±0.99b | 268.6±1.5b | 253.9±1.9d | 14.50±0.99c |
| <i>D. spurca</i> | 79.03±1.93a | 275.7±1.7a | 296.3±4.1a | 13.54±0.86d |
| <i>D. versiformis</i> | 75.42±1.25ab | 270.5±3.0b | 261.8±3.2c | 15.07±0.88b |
| <i>P. indica</i> | 72.62±0.48bc | 274.1±0.9a | 288.1±2.3b | 16.09±0.88a |

2.4 共生真菌对伦晚脐橙根际土壤性状的影响

由表3可见,所有共生真菌处理都显著提高了土壤MWD,与对照相比,接种 *A. scrobiculata*、*D. spurca*、*D. versiformis* 和 *P. indica* 分别提高了26%、28%、31%、23%,表明共生真菌提高了土壤团聚体稳定性。接种处理还显著提高了EE-GRSP和DE-GRSP。与未接种相比,接种 *A. scrobiculata*、*D. spurca*、*D. versiformis* 和 *P. indica* 提高了EE-GRSP含量,分别提高了76%、138%、90%、71%,在DE-GRSP含量上分别提高了31%、31%、10%、12%,

其中以 *D. spurca* 提高根际EE-GRSP和DE-GRSP最显著。

接种 *A. scrobiculata*、*D. spurca*、*D. versiformis* 和 *P. indica* 均提高了SOC含量,分别提高了16%、26%、4%、4%;也显著提高了有效磷含量,分别提高了83%、147%、55%、53%(表3)。与对照相比,接种 *D. spurca* 没有显著改变土壤硝态氮含量,但接种 *A. scrobiculata* 和 *P. indica* 增加了其含量,分别提高了32%和16%,*D. versiformis* 显著抑制其含量,达33%。相似地,与对照相比,接种 *A. scrobiculata* 并

没有显著改变土壤铵态氮含量,但接种 *D. spurca* 和 *P. indica* 显著增加其含量,分别提高了 39% 和 21%,接种 *D. versiformis* 则显著抑制其含量,达 43%。接种共生真菌对土壤速效钾含量促进作用不显著,其中接种 *D. spurca* 和 *D. versiformis* 显著降低了其含量。

表3 接种共生真菌对伦晚脐橙根际土壤性状的影响

Table 3 Effects of inoculation with symbiotic fungi on soil traits in Lane Late navel orange

| 处理 Treatment | 团聚体平均质 量直径/mm MWD | 易提取球囊霉 素相关土壤蛋 白/(mg/g) EE-GRSP | 难提取球囊霉 素相关土壤蛋 白/(mg/g) DE-GRSP | 土壤有机碳/ (mg/g) SOC | 铵态氮/ (mg/kg) Ammonium nitrogen | 硝态氮/ (mg/kg) Nitrate nitrogen | 有效磷/ (mg/kg) Olsen P | 速效钾/ (mg/kg) Available K |
|------------------------|-------------------------|---|---|-------------------------|---|--|----------------------------|--------------------------------|
| 对照 Control | 2.22±0.04c | 0.42±0.06d | 0.49±0.02c | 13.4±0.3d | 139±2c | 147±9c | 75±9c | 233±19a |
| <i>A. scrobiculata</i> | 2.80±0.07ab | 0.74±0.01c | 0.64±0.01a | 15.6±0.1b | 144±6c | 194±5a | 137±19b | 238±18a |
| <i>D. spurca</i> | 2.85±0.07ab | 1.00±0.02a | 0.64±0.02a | 16.9±0.1a | 193±11a | 146±13c | 185±4a | 182±11b |
| <i>D. versiformis</i> | 2.90±0.05a | 0.80±0.02b | 0.54±0.04b | 14.0±0.5c | 79±1d | 99±10d | 116±11b | 149±11c |
| <i>P. indica</i> | 2.74±0.08b | 0.72±0.01c | 0.55±0.02b | 13.9±0.2c | 168±19b | 170±15b | 115±34b | 228±11a |

2.5 相关性分析

从表4可以看出,根系真菌侵染率与EE-GRSP、MWD、SOC、铵态氮均呈现极显著($P<0.01$)正相关关系,与有效磷呈显著($P<0.05$)正相关关系,与速效钾呈极显著负相关关系。MWD均与EE-GRSP、SOC、铵态氮、硝态氮和有效磷含量呈现极显著或显

著正相关关系。SOC也与EE-GRSP、DE-GRSP、铵态氮、有效磷之间呈极显著正相关关系,与硝态氮呈显著正相关关系。图2也表明,根系真菌侵染率均与果实葡萄糖、果糖、蔗糖以及可溶性固形物含量之间存在极显著正相关关系。

表4 真菌侵染率与根际土壤性状间的相关性($n=20$)Table 4 Correlation between fungal colonization and soil traits in the rhizosphere ($n=20$)

| 项目 Items | 真菌侵染率 Fungal colonization | EE-GRSP | DE-GRSP | MWD | SOC |
|---------------------------|------------------------------|---------|---------|--------|--------|
| 真菌侵染率 Fungal colonization | 1.00 | 0.74** | 0.15 | 0.76** | 0.63** |
| MWD | 0.76** | 0.85** | 0.20 | 1.00 | 0.78** |
| SOC | 0.63** | 0.93** | 0.56* | 0.78** | 1.00 |
| 铵态氮 Ammonium nitrogen | 0.65** | 0.78** | 0.48* | 0.68** | 0.86** |
| 有效磷 Olsen P | 0.56* | 0.83** | 0.47* | 0.67** | 0.88** |
| 硝态氮 Nitrate nitrogen | 0.42 | 0.39 | 0.08 | 0.67** | 0.52* |
| 速效钾 Available K | -0.59** | -0.63** | -0.13 | -0.50* | -0.40 |

注:Note:*, $P<0.05$;**, $P<0.01$.

3 讨论

3.1 共生真菌对伦晚脐橙根系真菌侵染的影响

本研究表明,接种4种共生真菌均显著增加了伦晚脐橙根系真菌侵染率,说明外来共生真菌加速对田间伦晚脐橙根系的侵染,但这种促进作用因共生真菌种类而异。真菌侵染率反映了共生真菌与宿主植物共生关系的亲和程度,也是衡量真菌在根系扩展能力的重要指标^[15]。内生真菌 *P. indica* 可侵染伦晚脐橙根系,且与 *D. spurca*、*D. versiformis* 无差异,

但显著高于 *A. scrobiculata*,显示了 *P. indica* 在柑橘生产上的应用潜力巨大。然而,真菌侵染率的增加是源自外源接种的共生真菌还是土著共生真菌侵染导致,目前还不清楚,亟待进一步分析真菌种群多样性的变化。

3.2 共生真菌对伦晚脐橙根际土壤结构和肥力的影响

GRSP是AM真菌关联的一种特殊糖蛋白,在土壤结构改良和养分循环方面发挥重要作用^[11,16]。本

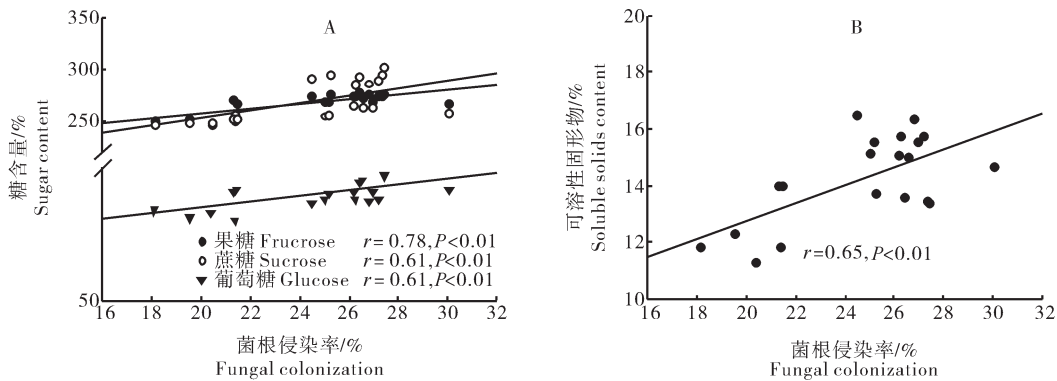


图2 真菌侵染率与果实糖含量(A)及可溶性固形物(B)的相关性($n=20$)

Fig.2 Relationship between fungal colonization and sugar content (A) and soluble solids (B) of fruits ($n=20$)

研究显示,所有共生真菌都促进了土壤EE-GRSP和DE-GRSP含量,暗示了参试的共生真菌加速了球囊霉素向土壤中释放。相关性分析也揭示,真菌侵染率只与EE-GRSP呈现极显著正相关,因为EE-GRSP是共生真菌新产生的,而DE-GRSP是EE-GRSP转化产物^[11]。MWD是土壤团聚体稳定性的重要指标,共生真菌促进了MWD形成,且MWD与EE-GRSP和SOC呈极显著正相关,表明接种共生真菌后植物根际土壤结构得到改善,因EE-GRSP和SOC作为土壤团聚体形成的胶结物^[16],参与了此过程。GRSP也是SOC的重要来源,占23.26%^[17],因此EE-GRSP和DE-GRSP均与SOC呈正相关。这些研究结果充分证明,共生真菌通过分泌GRSP、增加SOC固持,并通过GRSP(和菌根根外菌丝)对土壤颗粒胶结,促进土壤团粒结构的形成与稳定。此外,共生真菌通过向根际分泌一些分解酶或者改善土壤结构,可促进土壤中矿物质特别是P的活化,因此,显著地增加了根际土壤有效磷含量,对硝态氮和铵态氮也有明显促进作用,但因菌种而异。共生真菌抑制了土壤速效钾含量,这与Meng等^[18]在盆栽白三叶上接种AM真菌*Funneliformis mosseae*的结果一致,这可能是由于K为植物体内移动性大的元素,菌根促进了土壤K的释放,被根系和菌根大量吸收,导致了土壤速效钾下降,但还有待进一步研究证实。总之,田间共生真菌接种改善了伦晚脐橙根际土壤结构,增加了土壤肥力,有效地改善了柑橘根际土壤环境,潜在地有利于柑橘生长。

3.3 不同内生真菌对伦晚脐橙果实品质的影响

本研究结果表明,接种共生真菌对伦晚脐橙果实内外品质都有一定的促进作用,且因菌种而异,其中接种*D. versiformis*在果实大小和色泽上效果最

好,*D. spurca*在果实葡萄糖、果糖和蔗糖含量上效果最好。曾理等^[6]在红橘和罗伯逊脐橙上接种*D. versiformis*,能提高罗伯逊脐橙果实外观品质以及这2个柑橘品种果实可溶性固形物含量。然而,本研究中接种*D. spurca*对伦晚脐橙果实可溶性固形物没有显著影响,这可能是*D. spurca*处理的伦晚脐橙果实所有处理中是最大的,稀释效应影响了可溶性固形物含量。Horvat等^[19]接种商业化的混合AM真菌于大田番茄,番茄坐果率、果实大小及色泽得到显著改善。王锐竹等^[20]研究显示甜瓜接种丛枝菌根真菌后果实可溶性固形物和糖类物质增加。相关性分析揭示真菌侵染率与果实糖含量和可溶性固形物含量呈极显著正相关,表明共生真菌加速了糖分向果实转移。通常真菌共生体需要宿主的碳水化合物维持生长,宿主植物需合成更多的光合产物,并转移给根系菌根碳库^[21],这个过程中可能也把光合产物更多地转移到果实,因此,促进了果实糖分积累。但直接的证据还有待进一步研究,连续多年的观察分析将更能揭示共生真菌的田间效益。

总之,接种内生真菌能够改善伦晚脐橙果实内外品质,并对土壤结构和肥力产生正效应,但这些影响依赖于共生真菌种类。其中,*D. spurca*对果实外观品质、糖组分以及土壤团聚体稳定性和肥力的促进效果最佳,*P. indica*对果实可溶性固形物含量的增加最优。

参考文献 References

- [1] 吴黎明,何利刚,王志静,等.湖北三峡库区晚熟脐橙不同海拔果实品质变化及枯水防控技术研究[J].中国南方果树,2021,50(1):18-24.WU L M,HE L G,WANG Z J,et al.Study on the fruit prevention and control technology of late ripe naval orange

- in the three gorges reservoir area of Hubei Province [J]. South China fruits, 2021, 50 (1) : 18-24 (in Chinese with English abstract).
- [2] WU Q S, SRIVASTAVA A K, ZOU Y N, et al. Mycorrhizas in citrus: beyond soil fertility and plant nutrition [J]. Indian journal agricultural sciences, 2017, 87 (4) : 427-443.
- [3] XIE M M, WANG Y, WU Q S, et al. A friendly-environmental strategy application of arbuscular mycorrhizal fungi to ornamental plants for plant growth and garden landscape [J]. Notulae botanicae horti agrobotanici cluj- napoca, 2020, 48 : 1100-1115.
- [4] CHENG S, ZOU Y N, KUČA K, et al. Elucidating the mechanisms underlying enhanced drought tolerance in plants mediated by arbuscular mycorrhizal fungi [J/OL]. Frontiers in microbiology, 2021, 12 : 809473 [2022-04-13]. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.809473>.
- [5] 姚青, 李道高, 石井孝昭. VA 菌根真菌对柑桔果汁成分和果皮着色的影响 [J]. 果树科学, 1999, 16 (1) : 38-42. YAO Q, LI D G, ISHII T. Influence of VA mycorrhiza on juice components and rind colour of citrus fruit [J]. Journal of fruit science, 1999, 16 (1) : 38-42 (in Chinese with English abstract).
- [6] 曾理, 李建福, 刘建福, 等. 自然条件下接种 AM 真菌对柑橘果实品质的影响 [J]. 西南农业学报, 2014, 27 (5) : 2101-2105. ZENG L, LI J F, LIU J F, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi on citrus fruit quality under nature conditions [J]. Southwest China journal of agricultural sciences, 2014, 27 (5) : 2101-2105 (in Chinese with English abstract).
- [7] YANG L, ZOU Y N, TIAN Z H, et al. Effects of beneficial endophytic fungal inoculants on plant growth and nutrient absorption of trifoliolate orange seedlings [J/OL]. Scientia horticulturae, 2021, 277 : 109815 [2022-04-13]. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109815>.
- [8] BAGHAIE A, AGHILI F. Contribution of *Piriformospora indica* on improving the nutritional quality of greenhouse tomato and its resistance against Cu toxicity after humic acid addition to soil [J]. Environmental science and pollution research, 2021, 28 : 64572-64585.
- [9] 吴强盛. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2018: 53-57. WU Q S. Experimental guidelines in plant physiology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2018: 53-57 (in Chinese).
- [10] PHILLIPS J M, HAYMAN D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for assessment of infection [J]. Transactions of the British Mycological Society, 1970, 55 : 158-161.
- [11] WU Q S, LI Y, ZOU Y N, et al. Arbuscular mycorrhiza mediates glomalin-related soil protein production and soil enzyme activities in the rhizosphere of trifoliolate orange grown under different P levels [J]. Mycorrhiza, 2015, 25 : 121-130.
- [12] YODER R E. A direct method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature of erosion losses [J]. Agronomy Journal, 1936, 28 (5) : 337-351.
- [13] KEMPER W D, ROSENAU R. Aggregate stability and size distribution [C]// KLUTE A. Methods of soil analysis, part 1. physical and mineralogical methods. Madison, Wisconsin: Agronomy Monograph American Society of Agronomy, 1986: 425-442.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2008. BAO S D. Soil agrochemical analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008 (in Chinese).
- [15] GANGE A C, AYRES R L. On the relation between arbuscular mycorrhizal colonization and plant benefit [J]. Oikos, 1999, 87 (3) : 615-621.
- [16] HOLATKO J, BRTNICKY M, KUERÍK J, et al. Glomalin-truths, myths, and the future of this elusive soil glycoprotein [J/OL]. Soil biology and biochemistry, 2020, 153 : 108116 [2022-04-13]. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108116>.
- [17] HE J D, CHI G G, ZOU Y N, et al. Contribution of glomalin-related soil proteins to soil organic carbon in trifoliolate orange [J/OL]. Applied soil ecology, 2020, 154 : 103592 [2022-04-13]. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103592>.
- [18] MENG L L, SRIVASTAVA A K, KUČA K, et al. Earthworm (*Pheretima guillelmi*) -mycorrhizal fungi (*Fumeliiformis mossae*) association mediates rhizosphere responses in white clover [J/OL]. Applied soil ecology, 2022, 172 : 104371 [2022-04-13]. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104371>.
- [19] HORVATH K Z, ANDRYEI B, HELYES L, et al. Effect of mycorrhizal inoculations on physiological traits and bioactive compounds of tomato under water scarcity in field conditions [J]. Notulae botanicae horti agrobotanici cluj- napoca, 2020, 48 (3) : 1233-1247.
- [20] 王锐竹, 贺超兴, 王怀松, 等. 丛枝菌根真菌对不同甜瓜品种产量及营养品质的影响 [J]. 园艺学报, 2010, 37 (11) : 1767-1774. WANG R Z, HE C X, WANG H S, et al. Effect of fungi on the yield and nutrient quality of different muskmelon varieties in greenhouse [J]. Acta horticulturae sinica, 2010, 37 (11) : 1767-1774 (in Chinese with English abstract).
- [21] GAVITO M E, JAKOBSEN I, MIKKELSEN T N. Direct evidence for modulation of photosynthesis by an arbuscular mycorrhiza-induced carbon sink strength [J]. New Phytologist, 2019, 223 (2) : 896-907.

Effects of symbiotic fungi on fruit quality and soil characteristics of Lane Late navel orange

LEI Anqi¹, LI Qiushuang¹, LI Yan², ZOU Yingning¹, WU Qiangsheng¹

1. College of Horticulture and Gardening, Yangtze University, Jingzhou 434025, China;

2. Xingshan County Special Products Bureau, Hubei Province, Xingshan 443711, China

Abstract The 8-year-old field-cultivated Lane Late navel orange was inoculated with three arbuscular mycorrhizal fungi (*Acaulospora scrobiculata*, *Diversispora spurca*, and *D. versiformis*) and an endophytic fungus (*Piriformospora indica*) and the fruit quality and root/rhizosphere soil properties of lane late navel orange were analyzed to study the effects of the inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and endophytic fungi on the fruit quality and root/rhizosphere soil properties of lane late navel orange. The results showed that the root fungal colonization rate of inoculated trees was from 23.3% to 27.4%, which was significantly increased by 17%-38% compared with that of uninoculated trees. Inoculation of symbiotic fungi significantly increased fruit set, flesh weight and fruit weight per fruit by 65%-152%, 20%-36%, and 13%-34%, respectively, along with reduced fruit hardness by 22%-39%. These symbiotic fungi also increased fruit coloration value, polar and equatorial diameter, the content of glucose, fructose and sucrose to varying degrees, but it was different due to fungal species. In addition, the symbiotic fungi significantly increased soil aggregate stability (MWD), the content of organic carbon (SOC), Olsen-phosphorus, and glomalin-related soil protein (GRSP) by 23%-31%, 4%-26%, 53%-147%, and 10%-138%, respectively, but inhibited the content of available potassium. The results of correlation analysis showed that root fungal colonization was significantly or significantly positively correlated with fruit sugar components, soluble solids, easy-to-extract GRSP, MWD, SOC and available phosphorus. It is indicated that *D. spurca* has the most prominent effect on fruit appearance quality, sugar composition, soil structure and fertility.

Keywords endophytic fungi; Lane Late navel orange; aggregate; fruit quality; soil structure; fertility

(责任编辑: 张志钰)