

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.05.006

雍顺圆, 陈倩, 傅豪, 等. 生草栽培对大雅柑生长及结果的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(5): 63-73.

# 生草栽培对大雅柑生长及结果的影响

雍顺圆<sup>1,2</sup>, 陈倩<sup>1,2</sup>, 傅豪<sup>1,2</sup>, 郭启高<sup>1,2</sup>, 曾明<sup>1</sup>

1. 西南大学 园艺园林学院/长江上游农业生物安全与绿色生产教育部重点实验室, 重庆 400715;

2. 西南大学 农业科学研究院/南方山地作物逆境生物学国家级培育基地, 重庆 400715

**摘要:** 为探究 4 种草种生草栽培对大雅柑的影响, 以紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、箭筈豌豆(*Vicia sativa*)、蓝花子(*Raphanus sativus*)、绛三叶(*Trifolium incarnatum*) 4 种草种生草处理后的大雅柑(*Citrus reticulata* Dayagan) 果园为研究对象, 测定单株根瘤数量及质量、菌根侵染率、根系活力、土壤理化性质、树木生长状况、产量品质等指标。结果表明: ①草种菌根侵染率与柑橘根系侵染率、柑橘酸性磷酸酶活性及柑橘根系活力呈现出相关性。②生草栽培增加果园中土壤营养, 其中紫花苜蓿处理组表现最佳; 能明显降低夏季果园土温并增加土壤含水量。③生草能促进柑橘秋梢和叶片面积抽生; 促进柑橘叶片对 N、P、K 的吸收, 对 N 的影响从大到小依次为紫花苜蓿、箭筈豌豆、蓝花子、绛三叶; 能改善柑橘产量与单果质量与果实可溶固形物, 其中箭筈豌豆连续两年表现最佳。建议选择紫花苜蓿和箭筈豌豆草种在大雅柑果园内进行生草栽培。

**关键词:** 大雅柑; 生草栽培; 菌根; 土壤理化性质

中图分类号: S666.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2025)05-0063-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Effects of Grass Cultivation on Growth and Fruit of *Citrus reticulata* Dayagan

YONG Shunyuan<sup>1,2</sup>, CHEN Qian<sup>1,2</sup>, FU Hao<sup>1,2</sup>,  
GUO Qigao<sup>1,2</sup>, ZENG Ming<sup>1</sup>

1. College of Horticulture and Landscape Architecture, Southwest University/Key Laboratory of Agricultural Biosafety and Green Production of Upper Yangtze River Ministry of Education, Chongqing 400715, China;

2. Academy of Agricultural Sciences, Southwest University/State Cultivation Base of Crop Stress Biology for Southern Mountainous Land of Southwest University, Chongqing 400715, China

**Abstract:** In order to investigate the effect of sod culture on *Citrus reticulata* Dayagan, with orchards un-

收稿日期: 2024-10-20

基金项目: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-28-42)。

作者简介: 雍顺圆, 硕士研究生, 主要从事果树生物技术研究。

通信作者: 曾明, 教授, 博士研究生导师。

der four treatments of sod culture with four forage species (*Medicago sativa*, *Vicia sativa*, *Raphanus sativus* and *Trifolium incarnatum*) as research subjects, the number and weight of nodules, mycorrhizal infection rate, root vigor, soil physical and chemical properties, tree growth, fruits yield and quality were determined. The results showed: ① The mycorrhizal infection rates of grass species showed correlations with citrus root infection rate, acid phosphatase activity of citrus and citrus root vigor. ② Sod culture increased soil nutrients in the orchard. The *M. sativa* treatment had the best effect. It could significantly reduce the soil temperature of the orchard and increase the soil water content in summer. ③ Sod culture can promote citrus autumn shooting and leaf growth, and increase the accumulation of N, P and K in citrus leaves. The order of effect on N was *M. sativa*, *V. sativa*, *R. sativus*, *T. incarnatum*. Sod culture can improve the citrus yield, single fruit weight and soluble solids. *V. sativa* had the best effect in two consecutive years. It is recommended to choose *M. sativa* and *V. sativa* for sod culture in 'Dayagan' citrus orchards.

**Key words:** *Citrus reticulata* Dayagan; sod culture; mycorrhiza; soil physicochemical properties

果园生草栽培作为一种可持续农业管理模式,起源于 19 世纪末的美国,伴随灌溉技术革新与机械化割草设备的普及,逐步发展为全球广泛应用的果园管理体系<sup>[1]</sup>。自应用以来,果园生草技术在各地均表现出良好的生态、经济和社会效益<sup>[2-5]</sup>,甚至演变出涉及柑橘、梨、苹果、葡萄、龙眼等果树的多种高经济效益的果园生草复合模式<sup>[6]</sup>。科学选择草种是实现生草栽培目标的关键,需综合考虑气候条件、土壤类型、树龄结构及草种的生物学特性<sup>[7]</sup>,现已筛选出千余种适用于不同果园类型的草种资源<sup>[8]</sup>。目前柑橘果园中常用的生草品种主要有白三叶草、鼠茅草、紫花苜蓿、蓝花子、黑麦草、百喜草等<sup>[9]</sup>,其中豆科草种如白三叶草、紫花苜蓿、箭筈豌豆可通过与根系丛枝菌根(Arbuscular Mycorrhiza, AM)真菌形成共生关系,显著提升宿主植物对矿质养分的吸收效率<sup>[10-12]</sup>。AM 真菌(Glomeromycota 门)通过在植物根皮层细胞内形成丛枝结构,可增强宿主对氮(N)、磷(P)、钾(K)等大量元素及钙(Ca)、镁(Mg)等中量元素的吸收能力<sup>[13-16]</sup>。

果园生草系统通过地上-地下协同作用,可有效改善土壤理化性状、改善地表生境、增强土壤肥力、增强果树长势、改善果实品质<sup>[17-21]</sup>。例如,在南丰蜜橘园中生草栽培可增加土壤有机质,增强土壤酶活性,增加土壤氮循环微生物功能基因丰度,有利于促进土壤氮素转化<sup>[22-23]</sup>。在苹果园行间种植紫花苜蓿可显著提高土壤综合肥力<sup>[24]</sup>。利用白三叶、鼠茅草及黑麦草进行生草栽培后,发现可促进苹果植株对氮素利用,并减少土壤氮素损失<sup>[25]</sup>。豆科植物长柔毛野豌豆通过固氮作用能改善土壤环境,增加土壤肥力,改善果实品质<sup>[26]</sup>。

我国柑橘产业在规模化发展进程中,面临着土壤退化、化肥利用率低等生态问题<sup>[27-29]</sup>。果品安全质量和果园生态环境问题受到越来越多的关注和重视,需要从果树肥水效应提高和果园生态环境优化两大方面改善。生草栽培作为提升肥水利用效率的重要技术手段,已成为柑橘绿色生产研究的热点领域<sup>[30-31]</sup>。晚熟品种大雅柑(*Citrus reticulata* Dayagan)作为四川省武胜县特色产业<sup>[32-34]</sup>,当前其栽培模式以清耕为主,这种传统模式对土壤理化性质、肥水利用和果实产量品质都有较大的影响<sup>[35]</sup>。本研究系统评估紫花苜蓿、箭筈豌豆、绛三叶、蓝花子这 4 种果园草种在四川省武胜县龙女镇青岩村幼龄果园中对菌根形成、土壤理化性质及树体生长的影响,旨在筛选出适配西南丘陵区的高效生草品种组合,为柑橘产业可持续发展提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地设于四川省武胜县龙女镇青岩村果园,柑桔树为 3 年生大雅柑,种植密度株行距 3 m×4.5 m,年

平均气温为 17.5 °C, 年均降雨量为 1 180 mm, 年均无霜期 330 d, 地势平坦, 土壤为紫色土。园区采取机械旋耕与人工浅耕相结合的方式, 行间全部采用机械旋耕。耕地结束即播种结束时间为 2020 年 10 月。在重复小区进行五点采样法, 于 2022 年 2 月选取 20 cm 土层采集样品。

## 1.2 试验材料

试验果园为大雅柑(*Citrus reticulata* Dayagan)栽培园, 草种为紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、箭筈豌豆(*Vicia sativa*)、蓝花子(*Raphanus sativus*)、绛三叶(*Trifolium incarnatum*) (图 1)。采取单一播种、间行分布等进行生草比对, 播种量为每 667 m<sup>2</sup> 播种 3 kg 草种, 每个草种设定一个处理, 667 m<sup>2</sup> 为一个小区, 3 次重复, 随机区组排列, 以清耕作为对照。同步做好日常水肥管理, 进行杂草清除和病虫害防治, 并全程跟踪记录。种子均来自四川省农业农村厅草业技术推广中心。

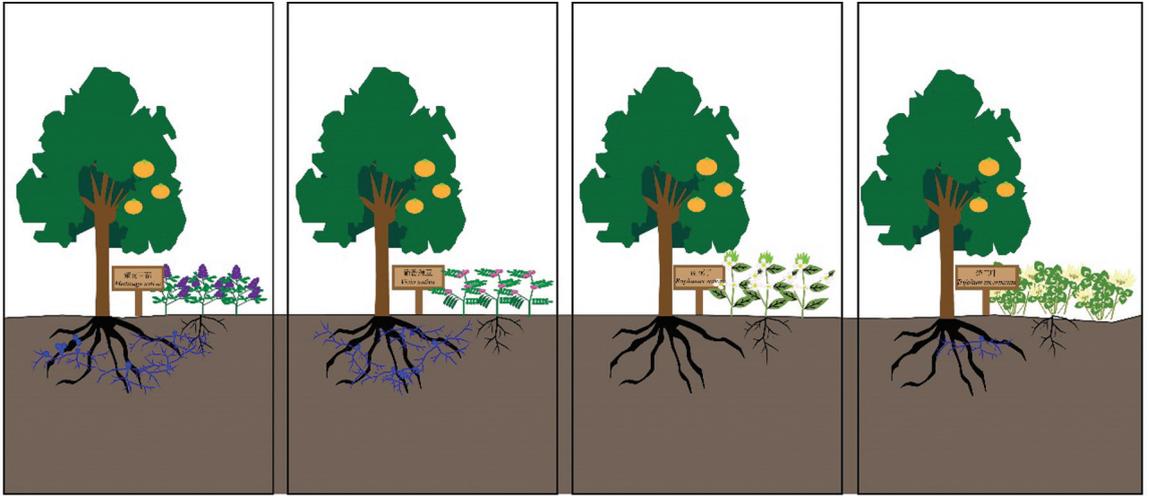


图 1 4 个草种(紫花苜蓿、箭筈豌豆、蓝花子、绛三叶)生草栽培处理的模式图

## 1.3 根围土壤和植物根系的采集与处理

在重复小区进行五点采样法, 于 2022 年 2 月选取 20 cm 土层采集样品。将处理草种连根拔起, 采用冲洗法清除土壤, 将干净的根、叶分离后分别装在带有标记的封口袋中, 统计单株根瘤数量及质量。柑橘苗取春梢叶片和根系, 用清水进行清洗, 滤纸吸干水分后放置在对编号的保鲜袋中。将采回的样品分成两部分, 一半的植物根系用于测定菌根侵染率等; 将叶片和另一半根系用植物粉碎机分别磨碎, 使用 70 目(孔径 0.25 mm)筛网筛过后, 封存到对应的标签样品袋, 于阴凉干燥的环境中保存。

## 1.4 豆科作物的根瘤计算和菌根计算指标

用刻度尺测量草种的株高、根长等, 电子天平测定根瘤鲜质量, 根瘤数量用计数法, 菌根侵染率用墨水醋染色法测定菌根侵染率。

## 1.5 根系活力的测定

采用四氮唑法(TTC)测定根系活力。

$$\text{根系活力}(\mu\text{TTF} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}) = (C \times V) / (W \times T)$$

式中:  $C$  表示标准曲线查出的每管 TTF 含量( $\mu\text{g}/\text{mL}$ );  $V$  表示提取液总体积( $\text{mL}$ );  $W$  表示样品质量( $\text{g}$ );  $T$  表示反应时间( $\text{t}$ )。

## 1.6 根系土壤常规八项分析

土壤常规八项参考鲍士旦进行测定。土壤 pH 值按照水土比 1 : 2.5 加入  $\text{CaCl}_2$  震荡 1 h 后用 pH 计直接读数; 有机质用重铬酸钾外加热法, 全氮用凯氏定氮法, 全磷用钼锑抗试剂显色法, 全钾用  $\text{NaOH}$  熔融—火焰原子吸收光度法, 碱解氮用碱解扩散法, 速效磷用碳酸氢钠浸提法, 速效钾用火焰分光光度计法进行分析。

## 1.7 果实产量与品质测定

分别于 2023 年 3 月 5 日、2024 年 3 月 5 日采样进行柑橘果实产量品质分析。随机选取 5 株长势一致、挂果正常的植株,从东、南、西、北、中部采摘 5 个果实采样对柑橘果实产量品质分析,全株采样测定单株产量,常规方法测定单果质量,手持测糖仪测定可溶性固形物含量。

## 1.8 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 22.0 统计软件进行数据处理,并进行 LSD 检验和方差分析。

# 2 结果与分析

## 2.1 生草栽培处理对大雅柑菌根形成的影响

### 2.1.1 4 种草种生长情况

4 种草种均未进行刈割,4 种草种的具体生长情况见表 1。在生长量方面,蓝花子和绛三叶生长量明显高于试验中的 2 种豆科草种(紫花苜蓿和箭筈豌豆)。其中蓝花子株高最高,达到 68.7 cm,草产量最大,为 2 684 kg/667 m<sup>2</sup>,其次为绛三叶,紫花苜蓿与箭筈豌豆的株高和草产量不及蓝花子和绛三叶。在根瘤形成方面,蓝花子和绛三叶均未形成根瘤,但紫花苜蓿和箭筈豌豆均形成较好的根瘤,其中紫花苜蓿根瘤量略大于箭筈豌豆,而单株根瘤质量略低于箭筈豌豆,两者在根瘤量和单株根瘤质量上差异无统计学意义。与蓝花子和绛三叶相比,2 个豆科草种的根瘤形成有利于增大植物吸收面积,有利于果树对水分、氮、磷的吸收和利用,促进根系活动和活化果树生理机能,进而可能对园区土壤性质和果树生长造成影响。

表 1 4 种草种生长情况

处理	株高/ cm	667 m <sup>2</sup> 草产量/ kg	根瘤量/ 个	单株根瘤质量/ mg	花果期/ 月-日
紫花苜蓿	38.6±1.7c	2 014±17.5b	10.4±1.1a	10.7±2.2a	04-11
箭筈豌豆	39.4±1.6c	2 035±15.8b	8.2±1.3a	11.17±2.5a	03-18
蓝花子	68.7±2.3a	2 684±21.4a	0b	0b	03-06
绛三叶	60.2±2.1b	2 251±18.1b	0b	0b	03-20
对照	—	—	—	—	—

注:表中数据为重复 3 次测定的平均值±标准误,不同小写字母表示在 5%水平下差异有统计学意义。

### 2.1.2 对柑橘菌根侵染率、柑橘酸性磷酸酶活性及根系活力的影响

不同草种对柑橘菌根侵染率、柑橘酸性磷酸酶活性及根系活力均有较大影响(表 2)。从草种菌根侵染率看,4 种草种菌根侵染率从大到小依次为紫花苜蓿、箭筈豌豆、绛三叶、蓝花子;具体为豆科属的紫花苜蓿、箭筈豌豆生草处理后形成了良好的菌根侵染,草种菌根侵染率达到 25.6%和 24.4%;绛三叶菌根侵染率仅 12.2%,效果远不及豆科的紫花苜蓿和箭筈豌豆,而十字花科的蓝花子未形成菌根侵染。

试验结果表明,草种的菌根侵染率与柑橘根系侵染率、柑橘酸性磷酸酶活性及柑橘根系活力呈现出明显的相关性,其柑橘酸性磷酸酶活性及柑橘根系活力从大到小依次为紫花苜蓿、箭筈豌豆、绛三叶、蓝花子,其中紫花苜蓿组与箭筈豌豆组的柑橘酸性磷酸酶活性分别为对照组的 2.6 倍和 2.53 倍;绛三叶的酸性磷酸酶活性为对照组的 1.83 倍,蓝花子则与对照无显著差异。数据显示菌根的形成同时能提高柑橘的根系活力,从大到小依次为紫花苜蓿、箭筈豌豆、绛三叶、蓝花子,其中紫花苜蓿组与箭筈豌豆组分别为对照组的 2.19 倍和 1.59 倍,绛三叶组和蓝花子组分别为对照组的 1.33 倍和 1.15 倍,这说明柑橘根系活力除受草种菌根侵染率影响,可能还与其他条件相关。

表 2 4 种草种菌根侵染率

处理	草种菌根 侵染率/%	柑橘根系 侵染率/%	柑橘酸性磷酸 酶活性/( $\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ )	柑橘根系活力/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ )
紫花苜蓿	25.6±1.3c	15.6±1.3a	324.5±31.3a	0.59±0.01a
箭筈豌豆	24.4±1.8c	18.2±1.1a	316.2±21.3a	0.43±0.01a
蓝花子	0±0a	8.6±0.1c	136.7±26.5c	0.31±0.03bc
绛三叶	12.2±1.6b	12.2±1.6b	227.4±25.1b	0.36±0.03b
对照	—	5.8±0.1d	124.6±22.4c	0.27±0.02c

注: 表中数据为重复 3 次测定的平均值±标准误, 不同小写字母表示在 5% 水平下差异有统计学意义。

### 2.1.3 草种菌根观察

对经紫花苜蓿、箭筈豌豆及绛三叶处理后所形成的菌根观察如图 2, 已将菌丝和孢子在图中标出。图中可以看出, 紫花苜蓿和箭筈豌豆这两个豆科草种形成了较多的菌丝和孢子, 结合表 2 可知前两者能够形成较高的菌根侵染率, 这与该两个草种能形成根瘤有关。绛三叶的菌丝和孢子没有前两者丰富, 在菌根侵染率上也不如紫花苜蓿和箭筈豌豆。观察结果显示, 草种菌根形成上, 从多到少依次为紫花苜蓿、箭筈豌豆、绛三叶。

## 2.2 生草栽培处理对果园土壤理化性质的影响

### 2.2.1 土壤 pH 值、有机质、容质量和总孔隙度

为探究 4 种草种生草栽培处理对土壤性质影响, 首先统计了柑橘果园土壤 pH 值、有机质、容质量和总孔隙度, 如表 3 所示。与对照相比, 经 4 种草种生草处理后果园土壤 pH 值均有小幅降低, 但与对照组处理结果相比差异无统计学意义。经生草处理后, 果园土壤有机质较对照组显著增加, 最高为箭筈豌豆组的 68.45 g/kg, 较对照组增加 22.47%; 其次为紫花苜蓿组和蓝花子组, 增加最少的是绛三叶组, 较对照组上调了 11.88%。土壤容质量降低最显著的为箭筈豌豆组, 较对照组降低 21.12%; 土壤总孔隙度均上升, 绛三叶组最高, 为 56.4%, 较对照组上调 9.72%, 其次为箭筈豌豆组的 56.17%, 较对照组上升 9.28%。试验表明 4 个草种处理组对柑橘果园土壤性质有调节作用, 具体表现为土壤有机质增加, 且箭筈豌豆表现最佳, 土壤容质量降低和总孔隙度上升, 说明生草栽培对柑橘果园土壤有疏松作用, 或可为土壤含氧量增加提供基础。

表 3 4 种草种处理后部分土壤性质

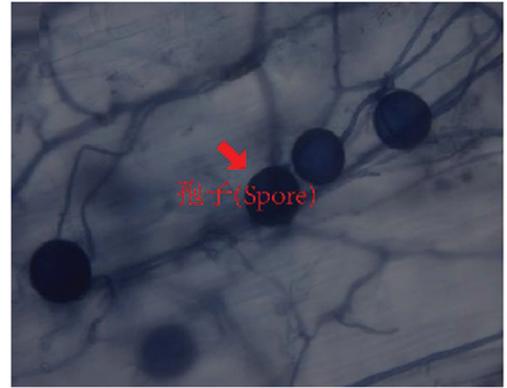
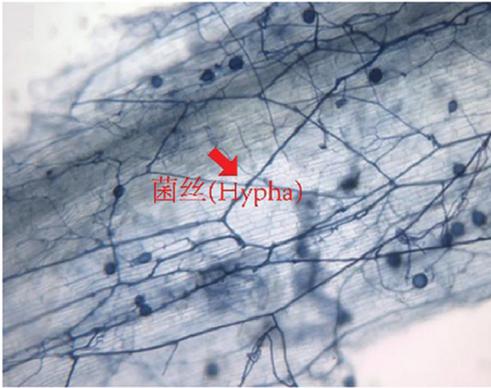
处理	pH 值	土壤有机质/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	土壤容质量/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	土壤总孔隙度/ %
紫花苜蓿	7.16±0.04a	67.26±3.5b	1.13±0.2b	54.7±2.2a
箭筈豌豆	7.14±0.02a	68.45±3.8b	1.12±0.2b	56.17±1.5a
蓝花子	7.17±0.03a	66.74±2.3b	1.23±0.1b	53.5±1.6a
绛三叶	7.12±0.01a	62.53±3.1b	1.21±0.1b	56.4±1.3a
对照	7.25±0.03a	55.89±3.4a	1.42±0.1a	51.4±0.3b

注: 表中数据为重复 3 次测定的平均值±标准误, 不同小写字母表示在 5% 水平下差异有统计学意义。

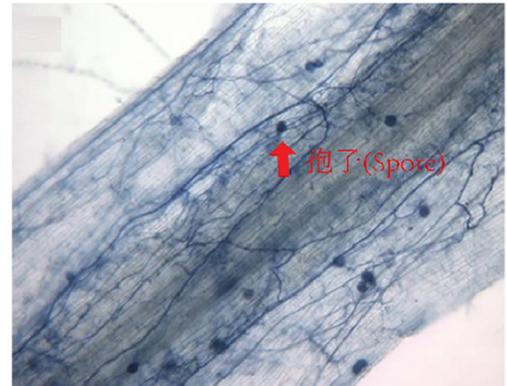
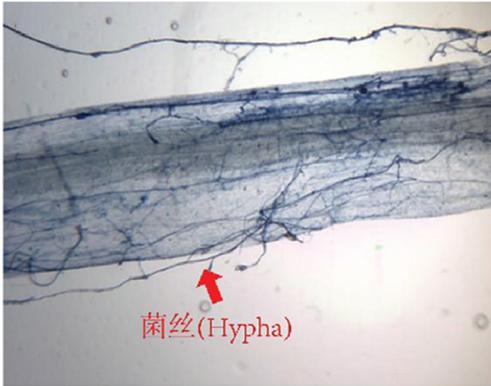
### 2.2.2 土壤养分

为探究 4 种草种生草栽培处理对土壤养分影响, 统计了柑橘果园土壤全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷和速效钾含量, 如表 4 所示。与对照相比, 经 4 种草种生草处理后, 果园中土壤的营养增加, 全氮、全磷、速效磷、速效钾均有增加。在对全氮的增加上, 紫花苜蓿和箭筈豌豆处理后的土壤全氮分别为 2.64 g/kg 和 2.51 g/kg, 较对照组分别增加了 22.79% 和 16.74%; 蓝花子和绛三叶处理的含

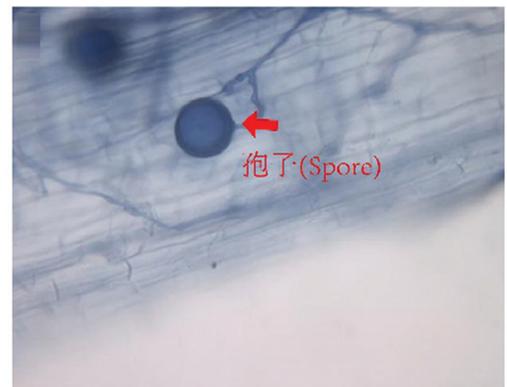
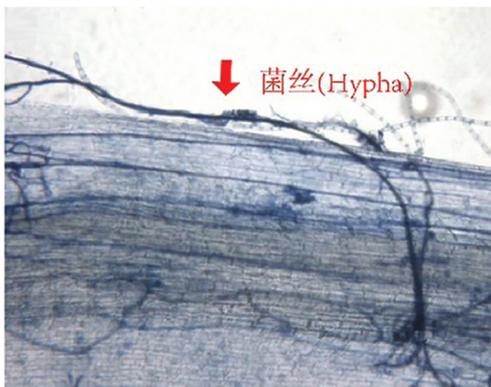
量低于前两种豆科植物,但较对照组依然有明显上升,分别为 12.09% 和 7.9%。4 个草种对土壤全磷的提升差异无统计学意义。土壤全钾含量从大到小依次为紫花苜蓿组、对照组、绛三叶组、蓝花子组、箭筈豌豆组,生草处理后的土壤中全钾含量除紫花苜蓿组外均有下降趋势。在碱解氮的影响上,箭筈豌豆生草处理后,土壤中碱解氮显著下降,仅为对照组的 84.43%。在对速效磷和速效钾的影响上,紫花苜蓿对土壤中速效磷的提升显著,较对照增加了 17.68%;其次为绛三叶,增加了 8.40%;紫花苜蓿对速效钾的增加表现最佳,达到 149.19 mg/kg;其次为绛三叶、箭筈豌豆、蓝花子。试验结果表明在对土壤养分的改善上,紫花苜蓿处理组表现最佳,对园区土壤全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷和速效钾上均有提升。



a. 紫花苜蓿菌根



b. 箭筈豌豆菌根



c. 绛三叶菌根

图 2 菌根形成观察

表 4 4 种草种处理后土壤养分情况

处理	全氮/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全钾/ (g · kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效磷/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg · kg <sup>-1</sup> )
紫花苜蓿	2.64±0.02a	0.74±0.02a	10.97±0.37a	206.23±7.19a	96.44±2.35a	149.19±4.41b
箭筈豌豆	2.51±0.03a	0.74±0.03a	10.23±0.32b	145.47±6.17c	82.75±1.21c	147.20±5.28b
蓝花子	2.41±0.06b	0.75±0.06a	10.31±0.37ab	183.65±7.62ab	84.18±2.31c	129.33±4.52ab
绛三叶	2.32±0.05b	0.77±0.05a	10.37±0.41ab	179.86±5.70b	88.83±2.66bc	148.15±1.72b
对照	2.15±0.06c	0.71±0.03a	10.39±0.14a	172.29±4.53a	81.95±2.73c	128.56±3.24a

注: 表中数据为重复 3 次测定的平均值±标准误, 不同小写字母表示在 5% 水平下差异有统计学意义。

### 2.2.3 土壤含水量

土壤含水量是果园环境重要指标, 影响果树生长, 为探究不同时间生草对柑橘园土壤含水量的影响, 分别于 1 月、8 月测定土壤含水量, 如表 5 所示。果园土壤经 4 种草种生草处理后, 表明在 1 月生草对土温、土壤含水量影响差异无统计学意义, 但在高温时期, 4 组生草处理一方面能明显降低土温, 表现为紫花苜蓿、蓝花子、箭筈豌豆、绛三叶, 分别降低了 7.53 °C、7.45 °C、7.04 °C 和 6.36 °C。另一方面, 果园生草能显著增加土壤含水量, 蓝花子组的 8 月土壤含水量最高, 达 19.35%, 其次为紫花苜蓿和箭筈豌豆, 绛三叶为 19.24%。保水降温有利于柑橘苗在夏季高温时期根系生长, 生草栽培或能有效防止干旱、高温对果树生长造成不利影响。

表 5 4 种草种处理后土壤含水量

处理	20 cm 土温(1 月)/ °C	20 cm 土温(8 月)/ °C	1 月土壤含水量/ %	8 月土壤含水量/ %
紫花苜蓿	6.4±0.01a	27.66±3.2b	22.03±0.2a	19.27±1.2a
箭筈豌豆	6.4±0.01a	28.15±3.1b	20.32±0.2a	19.27±1.2a
蓝花子	6.4±0.01a	27.74±2.3b	21.43±0.1a	19.35±1.3a
绛三叶	6.4±0.01a	28.83±3.1b	21.22±0.1a	19.24±1.2a
对照	6.3±0.01a	35.19±3.4a	21.42±0.1a	16.41±1.5b

注: 表中数据为重复 3 次测定的平均值±标准误, 不同小写字母表示在 5% 水平下差异有统计学意义。

## 2.3 生草栽培处理对大雅柑生长发育的影响

### 2.3.1 柑橘果树生长

树木营养生长是果实产量形成的物质基础。为探究 4 种草种生草栽培处理对大雅柑果树生长影响, 统计柑橘果树的株高、茎粗、秋梢叶面积和秋梢长度如表 6 所示。试验结果表明, 生草处理对柑橘果树株高、茎粗的影响差异无统计学意义。但是生草栽培对 2021 年秋梢和叶片面积抽生具有良好的促进作用, 紫花苜蓿处理组的秋梢叶面积达 1 647.31 mm<sup>2</sup>, 秋梢长度达 37.68 cm, 分别为对照组的 1.28 倍和 1.33 倍。紫花苜蓿处理的促生长效应或与其根际微生态改善密切相关。

表 6 4 种草种处理后柑橘苗木生长情况

处理	株高/ cm	茎粗/ cm	秋梢叶面积/ mm <sup>2</sup>	秋梢长度/ cm
紫花苜蓿	136.81±3.06a	2.17±0.15a	1 647.31±84.27b	37.68±0.13b
箭筈豌豆	138.15±2.13a	2.66±0.22a	1 534.31±50.32b	32.32±0.12b
蓝花子	133.91±1.68a	2.20±0.12ba	1 556.42±66.98b	34.56±0.15b
绛三叶	132.84±2.32a	2.42±0.42a	1 637.28±65.41b	36.18±0.13b
对照	134.28±2.27a	2.26±0.18a	1 282.54±101.45a	28.26±0.22a

注: 表中数据为重复 3 次测定的平均值±标准误, 不同小写字母表示在 5% 水平下差异有统计学意义。

### 2.3.2 树体营养

为探究 4 种草种生草栽培处理对大雅柑树体营养影响,统计柑橘秋叶片 N、P、K、Ca、Mg 如表 7 所示。试验结果显示生草处理后,与对照组比较,柑橘叶片对以 N、P、K 为代表的大量元素的吸收明显提高。其中在对叶 N 的影响上表现为紫花苜蓿组叶 N 最高,占比 2.68%,箭筈豌豆次之,为 2.6%,这或许与两者形成良好菌根有关。在对叶 P 和叶 K 的影响上,表现分别为绛三叶组的叶 P 和叶 K 最高,蓝花子表现最差。对叶 Ca 和叶 Mg 的改善上,生草处理后柑橘叶片对中量元素吸收的差异则并不显著。

表 7 秋叶片分析

处理	叶 N /%	叶 P /%	叶 K /%	叶 Ca /%	叶 Mg /%
紫花苜蓿	2.68±0.01a	0.123 262±0.003b	0.578 903±0.005b	1.25±0.2a	0.15±0.01a
箭筈豌豆	2.6±0.02a	0.126 815±0.002b	0.572 032±0.003b	1.29±0.2a	0.18±0.02a
蓝花子	2.4±0.01a	0.132 774±0.003b	0.562 143±0.004b	1.31±0.3a	0.16±0.01a
绛三叶	2.25±0.01a	0.138 163±0.003b	0.596 422±0.004b	1.24±0.2a	0.14±0.02a
对照	2.13±0.01b	0.113 517±0.003a	0.532 442±0.006a	1.24±0.1a	0.14±0.02a

注:表中数据为重复 3 次测定的平均值±标准误,不同小写字母表示在 5%水平下差异有统计学意义。

### 2.3.3 产量品质

为探究 4 种草种处理对柑橘的产量品质的影响,连续两年对柑橘果实产量品质进行分析,结果如表 8 所示。对比两年柑橘的产量品质可以发现,2024 年 5 组的单株产量和单果质量均较 2023 年均有增加,说明 2024 年的单株产量和单果质量较 2023 年有明显改善。以对照组为例,2024 年的对照组单株产量 26.2 kg,优于 2023 年对照组和紫花苜蓿组,甚至达到绛三叶组水平;2023 年对照组单果质量仅为 127.5 g,2024 年单果质量到达 132.8 g,平均增加了 5.3 g。对可溶性固形物分析可知,2023 年和 2024 年对照组的可溶性固形物均为 12.1%,紫花苜蓿组上升 0.3%,箭筈豌豆组上升 0.4%,蓝花子组仍为 13.6%,绛三叶增加了 1%,即 2024 年的柑橘果实可溶性固形物在紫花苜蓿、箭筈豌豆、绛三叶处理后较 2023 年结果均上升,蓝花子和对照组持平。对比 2023 年和 2024 年柑橘果实产量品质可知,2024 年总体表现较 2023 年好,这暗示 2024 年和 2023 年分别为果树栽培中的“大年”和“小年”。

分别对 2023 年和 2024 年结果分析发现,经 4 种草种处理后,柑橘单株产量与对照相比均增加。2023 年箭筈豌豆组表现最佳,单株产量达到 28.5 kg,优于蓝花子组的单株产量 27.6 kg,再次为绛三叶组的 26.2 kg,紫花苜蓿组在单株产量上表现最差,为 25.2 kg,但 4 个处理的差异并未达到显著标准。2024 年箭筈豌豆组仍表现最佳,单株产量达到 29.6 kg,尽管其余处理也表现增加,但差异无统计学意义。2023 年生草后的单果质量较对照也有所增加,表现依次为箭筈豌豆、紫花苜蓿、蓝花子、绛三叶;2024 年生草后的单果质量较对照也有所增加,表现依次为箭筈豌豆、蓝花子、紫花苜蓿、绛三叶,但两年结果均显示生草后的单果质量与单株产量类似并未出现显著差异。值得关注的是,与对照相比,4 种草种处理后柑橘果实的可溶固形物在连续两年的测定结果中均表现显著增加。2023 年箭筈豌豆处理组表现最佳,可溶性固形物含量达到 14.1%,另外 3 组依次为蓝花子处理组、紫花苜蓿处理组以及绛三叶处理组;2024 年箭筈豌豆处理组仍表现最佳,可溶性固形物含量达到 14.5%,另外 3 组依次为绛三叶处理组、紫花苜蓿处理组和蓝花子处理组,且箭筈豌豆处理组明显优于另外 3 种草种处理。综上所述,生草处理能够显著提升柑橘果实的可溶性固形物含量,但单株产量和单果质量增加不显著,且在对柑橘产量品质影响上箭筈豌豆表现最佳。

表 8 4 种草种处理后柑橘的产量品质

年份	处理	单株产量/kg	单果质量/g	可溶性固形物/%
2023 年	紫花苜蓿	25.2±5.4a	136.7±11.3a	13.5±1.2a
	箭筈豌豆	28.5±4.3a	137.5±13.2a	14.1±1.1a
	蓝花子	27.6±3.5a	135.3±12.6a	13.6±1.2a
	绛三叶	26.2±5.1a	131.7±11.5a	13.3±1.1a
	对照	22.4±4.6a	127.5±10.4a	12.1±1.3b
2024 年	紫花苜蓿	28.7±3.2a	135.4±6.3a	13.8±1.7b
	箭筈豌豆	29.6±2.1a	140.1±5.6a	14.5±1.3a
	蓝花子	28.2±3.4a	136.6±4.3a	13.6±1.0b
	绛三叶	28.8±2.6a	134.7±5.5a	14.3±1.2b
	对照(清耕)	26.2±2.4a	132.8±4.6a	12.1±1.1c

注: 表中数据为重复 3 次测定的平均值±标准误, 不同小写字母表示在 5% 水平下差异有统计学意义。

## 3 讨论与结论

### 3.1 讨论

#### 3.1.1 生草栽培处理促进大雅柑菌根形成和根系生长

生草栽培尤其以豆科植物为代表的草种在柑橘菌根形成方面表现优异, 良好菌根的形成有利于增强寄主植物根系的吸收能力, 显著提升柑橘根系 AM 侵染率, 改善寄主植物的生长发育状况<sup>[36, 26]</sup>, 显著增强果树根系对 Fe、Ca 等离子吸收效率<sup>[37]</sup>。本试验结果表明, 在大雅柑园区内进行紫花苜蓿和箭筈豌豆生草处理均形成较好的根瘤, 有较高菌根侵染率, 优于非豆科草种; 在柑橘酸性磷酸酶活性及柑橘根系活力从大到小依次为紫花苜蓿、箭筈豌豆、绛三叶、蓝花子。

#### 3.1.2 生草栽培处理改善果园土壤理化性状

果园生草栽培通过改善根际微环境提升果树营养吸收效率, 进而优化果实品质与产量<sup>[38, 17]</sup>。Poeplau 等<sup>[39]</sup>研究发现果园长期种植黑麦草后的土壤有机碳显著增加。常年生草的果园 40 cm 内的土层中全氮、全磷含量明显增加<sup>[40]</sup>。王吕等<sup>[41]</sup>发现毛苕子因高生物量与养分富集特性成为猕猴桃园理想草种。杜毅飞等<sup>[42]</sup>试验表明果园生草丰富土壤微生物, 利于土壤微生物利用碳源。亢晓丽等<sup>[43]</sup>发现生草能调节樱桃园土壤温度、抑制杂草生长、减少有害昆虫, 其中以光叶苕子应用效果最为显著。生草栽培还可降低果园土壤容质量, 提高土壤含水量<sup>[44]</sup>, 尤其对丘陵地果园防治水土流失具有重要意义<sup>[45]</sup>。在本研究中, 生草处理年限较短对果园土壤 pH 值并无显著影响, 但可能是由于刈割翻埋增加了果园土壤有机质, 从多到少依次为箭筈豌豆、紫花苜蓿、蓝花子、绛三叶。各处理均表现出土壤容质量降低与总孔隙度提升的协同效应, 显著改善土壤通透性能。值得注意的是, 紫花苜蓿对果园土壤全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷和速效钾上均有提升, 含氮量增加可能与根瘤固氮有关。在微环境调控方面, 紫花苜蓿在温度调控方面表现最优, 蓝花子则在保水性能上最为突出, 这种差异化调控效果可有效缓解高温干旱胁迫, 为果树生长创造稳定的根际环境。

#### 3.1.3 生草栽培处理促进柑橘生长发育和改善果实品质

利用白三叶草进行生草栽培能培肥土力, 改善红肉脐橙单果质量和果实品质, 提高生态与经济效益<sup>[46]</sup>。在本研究中, 4 个草种生草栽培促进柑橘果树秋梢和叶片面积抽生, 紫花苜蓿处理通过“固氮—解磷—促吸收”的协同效应表现最佳。尽管箭筈豌豆处理的单株产量与单果质量较对照差异无统计学意

义,但其可溶性固形物显著优于其他处理,这可能与其较高的磷素活化能力有关。2024 年产量提升可能与树龄增长及生草系统的持续效应有关,需通过长期定位试验进一步验证。而生草栽培能促进果树菌根形成和根系生长,提高根系活力,改善果园土壤理化性质,这些都对果树生长发育和果实产量品质的优化打下了重要基础。

### 3.2 结论

综上,利用 4 个草种进行生草栽培对大雅柑的影响主要体现在生态功能、土壤改良和生产效益 3 个方面,即通过 AM 真菌共生体系和生物固氮促进大雅柑菌根形成和根系生长,改善果园土壤理化性状形成“固氮—保水—抗逆”的良性循环,促进柑橘生长发育和改善果实品质进而实现生态与经济效益的协同提升。因此,建议在四川武胜及相似生态区选择紫花苜蓿和箭筈豌豆草种进行大雅柑生草栽培,并进一步开展长期定位研究(>5 年)以评估其对土壤酸化的调控潜力,优化果园生态环境,提升果园效益。

### 参考文献:

- [1] 王艳廷,冀晓昊,吴玉森,等. 我国果园生草的研究进展 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1892-1900.
- [2] 董桑婕,葛诗蓓,李岚,等. 不同光质补光对辣椒幼苗生长、丛枝菌根共生和磷吸收的影响 [J]. 园艺学报, 2022, 49(8): 1699-1712.
- [3] 杨梅,王亚亚,陆皎云,等. 典型果园生草模式及果草系统资源调控研究进展 [J]. 草业学报, 2017, 26(9): 189-199.
- [4] 王华生,王丽. 果园生草栽培技术的研究与应用 [J]. 广西植保, 2019, 32(2): 27-31.
- [5] 徐雄飞. 果园生草技术 [J]. 安徽农学通报, 2022, 28(3): 69-70, 78.
- [6] 李尝君,彭华,谢运河,等. 基于不同用途的南方果园生草栽培及管理利用技术 [J]. 湖南农业科学, 2019(3): 63-67, 72.
- [7] 刘传和,陈杰忠. 我国果园生草栽培研究概况 [J]. 亚热带植物科学, 2005, 34(2): 76-80.
- [8] 张小凤,郭雁君,蒋惠,等. 橘园生草栽培的研究进展 [J]. 湖北农业科学, 2018, 57(3): 5-9, 15.
- [9] 林玲,唐卫东,李华雄. 柑橘果园生草栽培技术 [J]. 农村百事通, 2019(2): 37-38.
- [10] REDECKER D, KODNER R, GRAHAM L E. Glomalean Fungi from the Ordovician [J]. Science, 2000, 289(5486): 1920-1921.
- [11] 林双双,孙向伟,王晓娟,等. 我国菌根学研究进展及其应用展望 [J]. 草业学报, 2013, 22(5): 310-325.
- [12] 贾冰冰,周昕南,丁胜利,等. 接种丛枝菌根真菌对不同类型盐碱胁迫下向日葵生长及盐离子积累的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(3): 45-54.
- [13] BRUNDRETT M C, TEDERSOO L. Evolutionary History of Mycorrhizal Symbioses and Global Host Plant Diversity [J]. New Phytologist, 2018, 220(4): 1108-1115.
- [14] FERNANDEZ C W, SEE C R, KENNEDY P G. Decelerated Carbon Cycling by Ectomycorrhizal Fungi is Controlled by Substrate Quality and Community Composition [J]. New Phytologist, 2020, 226(2): 569-582.
- [15] BARNI E, SINISCALCO C. Vegetation Dynamics and Arbuscular Mycorrhiza in Old-Field Successions of the Western Italian Alps [J]. Mycorrhiza, 2000, 10(2): 63-72.
- [16] 金文豪,邵帅,陈俊辉,等. 不同类型菌根对土壤碳循环的影响差异研究进展 [J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38(5): 953-962.
- [17] 王娜,李乐,勾蒙蒙,等. 长期生草对柑橘园土壤化学及生物学性质的影响 [J]. 生态学报, 2023, 43(14): 5890-5901.
- [18] YANG Z F, NIE G, FENG G Y, et al. Genome-Wide Identification, Characterization, and Expression Analysis of the NAC Transcription Factor Family in Orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.) [J]. BMC Genomics, 2021, 22(1): 178.
- [19] 李会科,张广军,赵政阳,等. 渭北黄土高原旱地果园生草对土壤物理性质的影响 [J]. 中国农业科学, 2008, 41(7): 2070-2076.
- [20] 刘蝴蝶,郝淑英,曹琴,等. 生草覆盖对果园土壤养分、果实产量及品质的影响 [J]. 土壤通报, 2003(3): 184-186.
- [21] 李国怀,伊华林. 生草栽培对柑橘园土壤水分与有效养分及果实产量、品质的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(2): 161-163.

- [22] 肖力婷,杨慧林,黄文新,等. 生草栽培对南丰蜜橘园土壤酶活性及氮循环功能微生物的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(6): 1476-1484.
- [23] 肖力婷,杨慧林,黄文新,等. 生草栽培对南丰蜜橘园土壤微生物群落结构与功能特征的影响 [J]. 核农学报, 2022, 36(1): 190-200.
- [24] 张朋朋,胡雯,管增辉,等. 生草对苹果园土壤养分、酶活性及细菌群落的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(9): 86-96.
- [25] 彭玲,文昭,安欣,等. 果园生草对<sup>15</sup>N利用及土壤累积的影响 [J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 950-956.
- [26] 姜莉莉,孙瑞红,张甘雨,等. 连续3 a生草对苹果园土壤理化性质及微生物群落的影响 [J]. 西北农业学报, 2023, 32(9): 1456-1465.
- [27] 宋晓婵,程瀚远,赵珍梅,等. 近10年柑橘芽变选种新进展 [J]. 中国果树, 2024(5): 1-10.
- [28] 郭文武,叶俊丽,邓秀新. 新中国果树科学研究70年——柑橘 [J]. 果树学报, 2019, 36(10): 1264-1272.
- [29] 邓秀新. 中国柑橘育种60年回顾与展望 [J]. 园艺学报, 2022, 49(10): 2063-2074.
- [30] 张规富,谢深喜. 果园生草栽培的研究动态 [J]. 湖北林业科技, 2011(6): 37-41.
- [31] 付学琴,杨星鹏,陈登云,等. 南丰蜜橘果园生草栽培对土壤团聚体和有机碳特征及果实品质的影响 [J]. 园艺学报, 2020, 47(10): 1905-1916.
- [32] 张姬雯,刘丽丽,陈骏,等. 不同采收期对设施栽培大雅柑果实品质指标的影响 [J]. 浙江柑橘, 2023, 40(3): 15-17.
- [33] 刘先.“武胜大雅柑”区域公用品牌发展的现状、问题及对策 [J]. 中国果业信息, 2023, 40(4): 27-29.
- [34] 占爽,杨静,胡军华,等. 大雅柑枯斑病斑的病原鉴定及防治药剂的筛选 [J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(5): 535-539.
- [35] 陈政,温铿,王海峰,等. 覆盖地布对花椒园土壤理化性质与杂草生长的影响 [J]. 贵州农业科学, 2024, 52(1): 100-106.
- [36] 宋劲刚. 生草对果树根系发育及丛枝菌根(AM)的影响 [J]. 现代园艺, 2020(6): 4-5.
- [37] 唐振尧,何首林. VA菌根对柑桔吸收铁素效应研究初报 [J]. 园艺学报, 1990, 17(4): 257-262.
- [38] 黄国华,宁心怡,卢玉鹏,等. 基于果园生草模式的固碳潜力及影响研究进展 [J]. 北方园艺, 2023(14): 146-153.
- [39] POEPLAU C, ARONSSON H, MYRBECK Å, et al. Effect of Perennial Ryegrass Cover Crop on Soil Organic Carbon Stocks in Southern Sweden [J]. Geoderma Regional, 2015, 4: 126-133.
- [40] 霍颖,张杰,王美超,等. 梨园行间种草对土壤有机质和矿质元素变化及相互关系的影响 [J]. 中国农业科学, 2011, 44(7): 1415-1424.
- [41] 王吕,秦宇航,吴玉红,等. 猕猴桃园绿肥品种筛选和生草管理对土壤养分的影响 [J]. 果树学报, 2023, 40(9): 1885-1893.
- [42] 杜毅飞,方凯凯,王志康,等. 生草果园土壤微生物群落的碳源利用特征 [J]. 环境科学, 2015, 36(11): 4260-4267.
- [43] 亢晓丽,胡利红. 3种果园草在洛阳市樱桃园的生长表现分析 [J]. 河南农业, 2019(29): 14-15.
- [44] 孙计平,张玉星,吴照辉,等. 生草对梨园土壤物理特性的影响 [J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 194-199.
- [45] 赵海洲,王如刚,李克磊,等. 丘陵地苹果园生草对根际土壤理化性状及微生物的影响 [J]. 北方园艺, 2024(6): 79-85.
- [46] 郭昌勋,谢宗周,潘志勇,等. 生草栽培对橘园土壤肥力和红肉脐橙果实品质的影响 [J]. 华中农业大学学报, 2016, 35(4): 25-28.

