

苹果枝条发酵复配基质对番茄生长及果实产量和品质的影响

杜 涵, 曲继松, 张丽娟, 朱倩楠, 魏文璐

(宁夏农林科学院园艺研究所 银川 750002)

摘 要:为促进农业废弃物资源化利用并降低栽培成本,探讨发酵苹果枝条部分替代草炭的复配基质对番茄生长、产量及品质的影响,以筛选优化配方并阐明其作用机制,为番茄优质栽培提供理论依据,以发酵苹果枝条、草炭和珍珠岩为原料,按体积比设置 4 个处理,以商品基质为对照(CK),采用槽式栽培模式,系统测定各基质理化性质,并分析其对番茄根系形态、光合特性、产量及果实品质的影响。结果表明,T3 处理(苹果枝条占比 40%)综合表现最佳,基质总孔隙度、持水孔隙度、速效氮含量、pH 及电导率(EC)均显著优于 CK。该处理显著促进了番茄根系发育,根系总表面积和总体积最大;同时,其盛果期净光合速率与气孔导度最高;番茄产量较 CK 显著提高 8.55%;果实可溶性固形物、可溶性总糖、维生素 C 和可溶性蛋白含量均显著高于 CK。相关性分析表明,基质 EC 值与 pH 是驱动番茄高产优质的关键环境因子。综上,发酵苹果枝条可有效替代部分草炭用于配制番茄栽培基质。其中,T3 处理(苹果枝条、草炭、珍珠岩体积比 4:3:3)能通过优化根际物理化学环境,有效促进番茄根系生长与光合性能,从而实现产量与品质的协同提升,是兼具环境友好与栽培高效优势的最优配方。

关键词:番茄;废弃枝条;光合作用;基质营养;果实品质

中图分类号:S641.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)06-149-07

Effects of apple branch fermentation compound substrate on tomato growth, yield and quality of fruit

Du Han, Qu Jisong, Zhang Lijuan, Zhu Qiannan, Wei Wenlu

(Horticulture Research Institute, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, Ningxia, China)

Abstract: To promote the resource utilization of agricultural waste and reduce cultivation costs, this study investigated the effects of compound substrates formulated by partially substituting peat with fermented apple branches on tomato growth, yield, and fruit quality. The aim was to identify an optimal substrate formulation and elucidate the underlying mechanisms, thereby providing a theoretical basis for high-quality tomato cultivation. Using fermented apple branches, peat, and perlite as raw materials, four treatments were prepared based on volume ratios: T1 (2:5:3), T2 (3:4:3), T3 (4:3:3), and T4 (5:2:3), with a commercial substrate as the control (CK). A trough culture system was adopted, and the physicochemical properties of each substrate were systematically determined. Their effects on tomato root morphology, photosynthetic characteristics, yield, and fruit quality were analyzed. The results showed that T3 (containing 40% apple branches) exhibited the best overall performance, with total porosity, water-holding porosity, available nitrogen content, pH, and electrical conductivity (EC) all significantly superior to those of CK. This treatment significantly promoted root development, resulting in the largest total root surface area and total root volume. Moreover, it achieved the highest net photosynthetic rate and stomatal conductance during the full fruiting stage. Tomato yield in T3 was significantly increased by 8.55% compared with CK. The content of soluble solids, total soluble sugar, vitamin C, and soluble protein in fruit were also significantly higher than those in CK. Correlation analysis indicated that substrate EC and pH were key environmental factors driving high yield and quality. In conclusion, fermented apple branches can effectively substitute for a portion of peat in tomato cultivation substrates. The T3 formulation (apple branches: peat: perlite = 4:3:3) enhances root growth and photosynthetic performance by optimizing the physicochemical environment of the rhizosphere, thereby syner-

收稿日期:2025-12-02;修回日期:2026-03-12

基金项目:国家自然科学基金(U21A20226);宁夏科技领军人才项目(2023GKRLRX09);宁夏农业高质量发展项目(NGSB2021803);宁夏重点研发计划(2025BBF02011)

作者简介:杜 涵,女,助理研究员,主要从事设施环境调控和蔬菜高效栽培等研究工作。E-mail:1073802928@qq.com

通信作者:曲继松,男,研究员,主要从事设施环境调控和蔬菜高效栽培等研究工作。E-mail:qujs119@126.com

gistically improving both yield and quality. This formulation represents an optimal, environmentally friendly, and efficient solution for high-quality tomato cultivation.

Key words: Tomato; Waste branch; Photosynthesis; Substrate nutrient; Fruit quality

番茄(*Solanum lycopersicum* L.)作为全球最重要的蔬菜作物之一,其产量与品质深受栽培基质的影响。传统基质栽培过度依赖草炭,导致这一不可再生资源枯竭及生态环境被破坏^[1]。因此,开发环保、低成本的草炭替代基质已成为设施农业可持续发展的迫切需求。

果树产业每年冬季修剪会产生大量的木质化枝条废弃物。以我国苹果产业为例,其种植面积与产量均居世界前列,每年数以千万吨计的苹果修剪枝条处理转化存在争议^[2]。传统上,这些枝条大多被就地焚烧或随意堆放,不仅造成了生物质资源的极大浪费,而且焚烧还会产生严重的空气污染,而堆放则可能成为病虫害滋生的温床^[3]。如何将此类农业废弃物进行无害化、资源化和高值化利用,是发展循环农业、推动农业“碳中和”的关键课题。苹果枝条结构坚硬,经粉碎发酵后,能形成物理结构稳定的堆肥产物,可作为栽培基质的骨架材料,不仅能够有效处理废弃物,还能为作物根系提供不同于草炭的独特物理结构,从而改善根际环境^[4-5]。

近年来,已有研究开始探索将各种农业有机废弃物作为栽培基质的可行性,例如利用菇渣、稻壳、椰糠等部分替代草炭^[6]。然而,针对木质化程度高、降解缓慢的果树枝条,特别是苹果枝条堆肥在番茄栽培上的应用研究仍相对薄弱且不够系统^[7]。果树枝条作为果园每年修剪产生的大量农业废弃物,其资源化利用是循环农业的重要课题^[8]。苹果枝条富含木质素与纤维素,经发酵处理后可作为栽培基质的良好骨架材料,不仅能减少废弃物对环境的压力,也能为作物根系创造独特的物理结构^[9]。然而,关于苹果枝条堆肥与草炭、珍珠岩等材料复配后,对番茄植株生长、产量及果实品质的系统影响尚待深入研究。

鉴于此,笔者以苹果枝条堆肥为主要原料,与草炭、珍珠岩进行不同比例复配,以商品基质为对照,探究其对番茄根系形态、光合特性、产量及品质的影响,旨在明确苹果枝条复配基质的应用效果,筛选最优配方,并通过相关性分析揭示其关键作用机制,以期苹果枝条废弃物的资源化高效利用及番茄绿色优质栽培提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料

试验用番茄品种为中杂 9 号(F_1 杂交种,购自中国农业科学院蔬菜花卉研究所)。复配基质中苹果枝条选用国家苹果产业技术体系银川综合试验站苹果园 2023 年秋季修剪的木质化枝条;苹果枝条的粉碎及发酵、混合基质的配置、珍珠岩、草炭和牛粪均由宁夏中青生物科技有限公司提供;普通商品基质(草炭、蛭石、炉渣、珍珠岩按体积比 2:2:5:1 复配)由宁夏中青生物科技有限公司提供。

木质化苹果枝条预处理:收集国家苹果产业技术体系银川综合试验站苹果园秋季修剪的枝条,将其用粉碎机粉碎成 $\leq 3\text{ cm}^3$ 的碎屑,以 2:1 体积比添加牛粪,在 57℃左右条件下进行堆积发酵 70 d,发酵完成后备用。

1.2 试验设计

试验于 2024 年 9—11 月在宁夏贺兰山东麓金山产区国际葡萄园 8 号试验基地日光温室(长 60 m,宽 10 m)进行。以发酵后的苹果枝条、草炭、珍珠岩为原材料,复配基质配方见表 1。试验共设 4 个处理(T1~T4),以商品基质为对照(CK)。采用槽式双行栽培模式(长 3 m,宽 1.2 m,深 0.4 m)种植,栽培槽中心距为 2.25 m(行距),株距为 0.3 m;每个处理设 3 次重复,每个重复(小区)使用 1 个栽培槽,每槽定植 20 株,试验温室内各处理管理措施一致。

表 1 复配基质比例			
Table 1 Proportion of compound substrate			%
处理 Treatment	发酵后苹果枝条 Apple branches after fermentation	草炭 Turf	珍珠岩 Perlite
T1	20	50	30
T2	30	40	30
T3	40	30	30
T4	50	20	30
CK	商品基质 Commodity substrate		

1.3 项目测定与方法

1.3.1 基质理化性质测定 参考褚春年等^[10]的方法,定植前,将各处理复配基质取样并自然风干,采用环刀法测定基质容重、总孔隙度、通气孔隙度和持水孔隙度。使用 pH 计测定 pH;使用电导率仪测定 EC 值;采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮法测定全氮、全磷含量;采用碱解扩散法测定速效氮含量;采用碳酸氢钠法(Olsen 法)测定速效磷含量;采用乙酸铵浸

提-火焰光度法测定速效钾含量。

1.3.2 品质指标测定 参考张文静等^[11]的方法,在番茄盛果期时,于各处理植株的相同坐果位点选取质量相同的 5 个果实用于品质测定。采用水杨酸法测定硝酸盐含量;采用钼蓝比色法测定维生素 C 含量;采用蒽酮比色法测定可溶性总糖含量;采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定可溶性蛋白含量;采用氢氧化钠滴定法测定有机酸含量;采用硬度计测定果实硬度;采用手持糖度计测定可溶性固形物含量。采用称质量法统计单株产量,并折算为 667 m² 产量。

1.3.3 光合及根系形态指标测定 参考许泽华等^[12]的方法,分别在番茄幼苗期、开花结果期、盛果期和收获期于晴天 09:00—11:00,选择生长点向下的第 3 片叶,采用 TPS-2 光合仪测定不同处理的番茄叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、水分利用效率($WUE/\% = P_n/T_r \times 100$)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)、气孔导度(G_s),每个处理测定 6 片叶,重复测定 3 次。采用根系扫描仪(来因科技公司,IN-GX02)测定收获期根系总长度、根系总表面积和根系总体积。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2016 和 SPSS 22 进行数据处理和分析,采用 OriginPro 2021 绘图。

2 结果与分析

2.1 复配基质的物理性质

不同配方处理对基质的物理性质均有显著改善作用(表 2)。T3 处理对总孔隙度和持水孔隙度的提升效果最优,较 CK 分别显著提高了 6.41 和 20.14 百分点;各处理均显著降低了基质容重,其中 T2 处理效果最佳,较 CK 显著降低了 33.33%;不同复配基质的通气孔隙度均显著低于 CK,其中 T3 处理最低,较 CK 显著降低了 37.51%,这有利于增强基质的持水保肥能力。综合来看,所有处理均能有效改善基质的物理结构。其中,T2 处理在降低土壤

容重方面效果最为显著;而 T3 处理则在整体优化土壤孔隙结构方面表现最优,能显著提升总孔隙度和持水孔隙度,从而为作物生长创造更佳的水、肥、气、热环境。

表 2 不同处理对基质物理性质的影响

Table 2 Effects of different treatments on physical property of matrix

处理 Treatment	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	总孔隙度 Total porosity/%	通气孔隙度 Aeration porosity/%	持水孔隙度 Water holding porosity/%
CK	0.39±0.02 a	84.20±0.22 c	36.58±0.55 a	56.71±0.78 d
T1	0.31±0.02 b	87.86±0.17 b	29.36±0.41 b	68.99±0.58 c
T2	0.26±0.01 c	90.30±0.04 a	25.97±0.12 c	72.43±0.64 b
T3	0.28±0.04 c	90.61±0.15 a	22.86±0.35 d	76.85±0.98 a
T4	0.32±0.04 b	88.01±0.17 b	25.86±0.39 c	72.17±0.57 b

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference among treatments($P<0.05$). The same below.

2.2 复配基质的化学性质

不同配方处理对基质的化学性质产生了显著影响。如表 3 所示,与对照(CK)相比,T3 和 T4 处理显著提升了基质速效氮含量,其中 T3 处理效果最优,较 CK 显著提高了 6.76%。在速效磷含量方面,各处理均未表现出显著优于 CK 的效果,其中 T1 和 T3 处理较 CK 分别显著降低了 24.42% 和 24.64%。T2 处理的速效钾含量最为突出,较 CK 显著提高了 5.56%,而 T3 处理较 CK 显著降低了 3.70%。在基质全量养分方面,各施肥处理均未能维持 CK 水平的全氮和全磷含量,仅 T3 处理的全氮含量与 CK 无显著差异,保持了原有水平;其他处理的全氮及所有处理的全磷含量均显著低于 CK,其中 T1 处理的全磷含量降幅最大,达 71.09%。此外,不同复配基质处理对基质 pH 和 EC 值均产生了显著影响,其中 T3 处理对两者的提升作用均最为显著,较 CK 分别显著提高了 5.68% 和 13.98%。综合来看,T3 处理在扩充土壤

表 3 不同处理对基质养分的影响

Table 3 Effects of different treatments on substrate nutrients

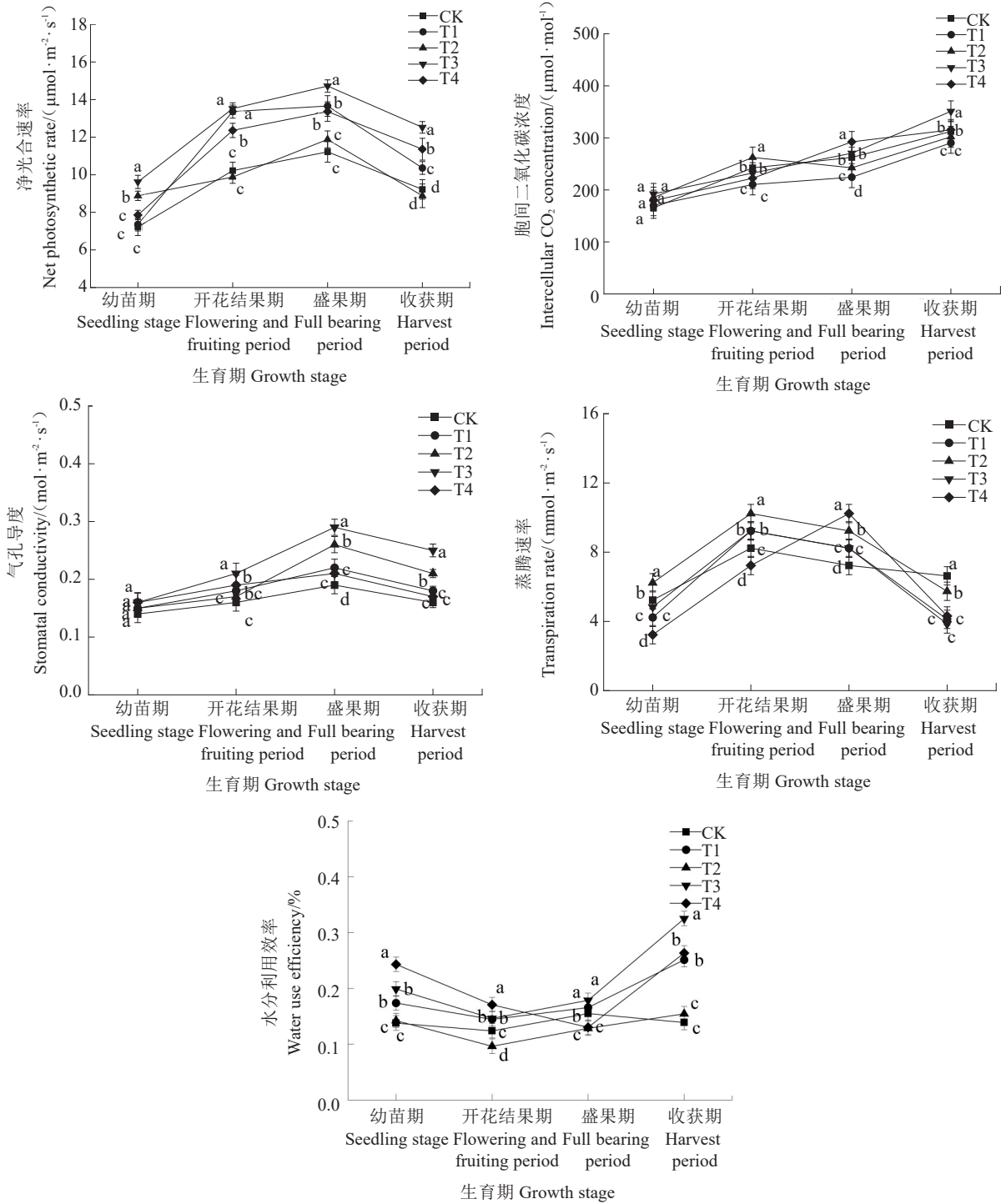
处理 Treatment	w(速效氮) Available N content/ (mg·kg ⁻¹)	w(速效磷) Rapid available P content/(mg·kg ⁻¹)	w(速效钾) Rapid available K content/(mg·kg ⁻¹)	w(全氮) Total N content/ (g·kg ⁻¹)	w(全磷) Total P content/ (g·kg ⁻¹)	pH	EC 值 EC value/ (mS·cm ⁻¹)
CK	44.24±0.48 b	70.02±1.45 a	85.43±1.00 c	0.053±0.001 a	2.56±0.28 a	6.34±0.08 bc	1.86±0.22 bc
T1	32.76±0.00 d	52.92±1.23 c	88.73±2.03 ab	0.030±0.001 c	0.74±0.01 c	6.27±0.09 c	1.71±0.06 c
T2	34.63±0.81 c	69.76±1.64 a	90.18±0.60 a	0.042±0.003 b	0.85±0.02 bc	6.52±0.02 abc	1.68±0.06 c
T3	47.23±0.81 a	52.77±0.92 c	82.27±1.00 d	0.053±0.004 a	0.92±0.04 bc	6.70±0.24 a	2.12±0.03 a
T4	46.76±1.40 a	61.34±1.59 b	87.15±1.65 bc	0.044±0.002 b	1.07±0.17 b	6.58±0.13 ab	2.02±0.05 ab

速效氮库、维持全氮水平及调整 pH 与 EC 值至更适宜番茄生长的区间方面表现最佳;T2 处理则在促进钾素有效性与维持较高磷含量方面具有优势。

2.3 复配基质对番茄不同生育期光合作用的影响

如图 1 所示,复配基质 T3 处理能够显著且持

续地提升番茄在整个生育期内的净光合速率。特别是在盛果期和收获期这两个决定产量与品质的关键阶段,T3 处理表现出最强的提升效应。T3 处理在开花结果期、盛果期及收获期均维持了最高的气孔导度(G_s),尤其在盛果期,其 G_s ($0.29 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)



Note: Different small letters indicate significant difference among different treatments of the same growth stage at 0.05 level.

图 1 复配基质对番茄不同生育期光合作用的影响

Fig. 1 Effects of compound matrix on photosynthesis of tomato at different growth stages

显著高于 CK,提升幅度达 52.63%,表明 T3 基质为番茄植株,特别是在生殖生长旺盛阶段,创造了更优的气体交换条件,有利于 CO₂的摄入。蒸腾速率(T_r)的变化模式较为复杂,不同处理在不同时期的优势各异。T2 处理在幼苗期和开花结果期的 T_r 最高,而 T4 处理在盛果期的 T_r 显著高于其他处理。胞间 CO₂浓度(C_i)是判断光合作用限制因素的关键指标。在盛果期和收获期, C_i 值普遍升高,且 T3 和 T4 处理的 C_i 在所有处理中位居前列(如收获期 T3 处理的 C_i 为 351.03 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)。结合此前 T3 处理具有最高净光合速率(P_n)和 G_s 的分析,这种高 C_i 水平强烈表明,T3 处理下的光合限制主要来自于叶肉细胞同化能力的非气孔因素,即其光合机构的活性极高,即便在胞间 CO₂浓度较高的情况下,也能够快速消耗 CO₂。水分利用效率体现了植物碳同化与水分消耗的权衡。在整个生育期内,T3 和 T4 处理在提升 WUE 方面展现出持续优势。T3 处理在收获期和盛果期的 WUE 最高,分别较 CK 显著提升了 133.81%和 15.48%;而 T4 处理则在幼苗期和开花结果期表现最优,表明特定的复配基质(T3 和 T4)能有效提高番茄植株对水分的利用能力。

2.4 复配基质对番茄品质的影响

如表 4 所示,不同处理对番茄果实品质各指标产生了显著影响。T3 处理在综合提升果实营养与风味物质含量方面表现最为突出,而 T1 和 T4 处理则显著降低了果实硬度,较 CK 分别显著降低了

22.95%和 23.97%。在营养与风味物质含量方面,T3 处理表现突出,维生素 C 与可溶性蛋白含量较 CK 分别显著提高了 21.17%和 19.54%;可溶性固形物与可溶性总糖含量虽高于 CK,但差异不显著。在有机酸含量方面,T3 处理最高,较 CK 显著提高了 19.09%,这可能有助于形成更浓郁的果实风味。T1 处理在维持较高可溶性固形物含量和提升可溶性蛋白含量方面也表现出积极效果。为评价果实风味,笔者在本研究中计算了糖酸比(可溶性总糖含量/有机酸含量)。CK 的糖酸比最高(6.82),而 T3 处理的糖酸比为 6.18,虽低于 CK,但高于 T1 (5.63)、T2(5.69)和 T4 处理(4.32),这表明 T3 处理在同步提高可溶性总糖、有机酸含量的同时,仍维持了相对适宜的糖酸平衡。综合来看,T3 处理是提升果实营养品质的最佳策略;若追求更高的糖酸比(偏甜风味),CK 具有优势;而 T1 与 T4 处理显著降低果实硬度,可能适用于需改善口感的鲜食品种,但需考量其对贮藏性的潜在影响。

2.5 复配基质对番茄产量和根系生长的影响

如表 5 所示,不同处理对番茄产量及根系构型产生了显著影响。在产量方面,T3 与 T4 处理的单株产量及折合产量均显著高于对照(CK),且这两个处理差异不显著。其中,T3 处理的单株产量最高(5.67 kg),T4 处理的产量最高(11 214.38 kg·667 m⁻²)。各处理对根系不同性状的调控存在差异。T2 处理对促进根系纵向延伸(根系总长度)的效果最为突出,其

表 4 不同处理对番茄品质的影响
Table 4 Effects of different treatments on tomato quality

处理 Treatment	硬度 Firmness/N	w(可溶性固形物) Soluble solids content/%	ρ (可溶性总糖) Total soluble sugar content/(g·L ⁻¹)	ρ (有机酸) Organic acid content/(g·L ⁻¹)	w(维生素 C) Vitamin C content/ (mg·100 g ⁻¹)	w(可溶性蛋白) Soluble protein content/(mg·g ⁻¹)	糖酸比 Sugar-acid ratio
CK	2.92±0.14 a	5.02±0.06 ab	0.75±0.06 a	0.110±0.001 bc	25.46±0.12 b	31.06±0.27 c	6.82±0.55 a
T1	2.25±0.06 bc	5.35±0.01 a	0.58±0.01 b	0.103±0.006 c	22.22±0.23 c	33.66±0.23 b	5.63±0.10 bc
T2	2.73±0.07 ab	4.63±0.06 c	0.58±0.12 b	0.102±0.003 c	23.84±0.31 c	30.20±0.15 c	5.69±1.18 bc
T3	2.76±0.07 ab	5.24±0.57 a	0.81±0.04 a	0.131±0.004 a	30.85±0.16 a	37.13±0.11 a	6.18±0.31 ab
T4	2.22±0.09 c	4.92±0.57 b	0.51±0.01 b	0.118±0.002 b	26.81±0.42 b	34.65±0.21 b	4.32±0.08 c

表 5 不同处理对根系指标和产量的影响
Table 5 Effects of different treatments on root system indicators and yield

处理 Treatment	单株产量 Single plant yield/kg	产量 Yield/(kg·667 m ⁻²)	根系总长度 Total length of root/m	根系总表面积 Total surface area of root/m ²	根系总体积 Total volume of root/cm ³
CK	5.20±0.11 bc	10 276.74±140 b	4.73±0.24 d	0.014±0.003 c	5.71±0.21 c
T1	4.91±0.21 c	9 701.42±142 c	5.33±0.54 c	0.017±0.002 b	6.35±0.22 b
T2	5.48±0.17 ab	10 821.32±102 b	8.14±0.44 a	0.011±0.002 d	5.42±0.18 c
T3	5.67±0.24 a	11 155.27±176 a	6.55±0.18 b	0.024±0.001 a	6.95±0.14 a
T4	5.54±0.16 a	11 214.38±195 a	5.60±0.13 c	0.016±0.004 b	6.09±0.23 bc

总长度较 CK 显著提高了 72.09%。然而,T3 处理在优化根系空间结构方面表现最优,其根系总表面积和根系总体积均为各处理中最高,较 CK 分别显著提升了 71.43%和 21.72%。

2.6 相关性分析

通过对基质理化性质与番茄植株生长、光合特性及果实品质指标进行 Pearson 相关性分析,结果(表 6)表明,基质中各养分因子和理化性质与番茄多项指标间存在广泛且显著的相关性,揭示了影响番茄生长发育与品质形成的关键土壤驱动因子。基质 EC 值与多项核心指标呈极显著或显著正相关,包括有机酸含量($r=0.975$)、维生素 C 含量($r=0.938$)、胞间 CO₂ 浓度($r=0.890$)和净光合速率($r=0.847$),表明适宜的土壤电导率有助于提升果实品质和光合效率。基质 pH 与单株产量($r=0.971$)和折合产量($r=0.946$)呈极显著正相关,是保证高产的关键因子。基质速效氮含量与有机酸和维生素 C 含量呈显著正相关,说明充足的氮素有利于品质形成。然而,速效磷含量与可溶性固形物含量、可溶性蛋白含量、根系总表面积和根系总体积均呈显著负相关,且全磷含量与总孔隙度和持水孔隙度呈显著负相关,提示磷积累可能通过改变基质结构产生不利影响。此外,速效磷含量与蒸腾速率呈显著正相关,而速效钾含量与品质指标呈负相关,揭示了养分管理中的复杂权衡关系。综上,基质 EC 值和 pH 是协同提升番茄产量与品质的关键驱动因子,生产中应注重调控基质盐分/养分平衡与酸碱度,并优化氮磷配施策略。

3 讨论与结论

本研究结果表明,以苹果枝条堆肥为核心的复配基质能显著改善栽培介质的理化性质,并通过优化根际环境,进而对番茄的光合性能、根系构建、产量及品质产生积极的调控效应。

3.1 复配基质通过优化根际环境促进番茄生长

本研究发现,T3 处理(苹果枝条、草炭、珍珠岩体积比 40:30:30)在物理结构上实现了总孔隙度与持水孔隙度的协同增加,同时适度降低了通气孔隙度。这种“疏松且保水”的孔隙结构为根系生长创造了理想的“水、肥、气、热”环境^[13],这可能是 T3 处理下番茄根系总表面积和总体积显著增大的直接原因,更大的根系表面积无疑增强了植株对水分和养分的获取能力^[14]。在化学性质方面,T3 处理显著提高了基质的 EC 值和 pH。相关性分析进一步证

表 6 基质性质与番茄生长及品质指标的相关性
Table 6 Correlation between substrate property and tomato growth and quality index

指标 Index	AN	APC	AK	TN	TP	pH	EC
FN	0.217	0.500	-0.392	0.741	0.579	0.139	0.049
TSS	0.071	-0.826*	-0.494	-0.176	-0.077	-0.235	0.282
TS	0.437	-0.116	-0.821*	0.716	0.434	0.214	0.437
TA	0.854*	-0.460	-0.895*	0.650	-0.036	0.773	0.975**
VC	0.860*	-0.291	-0.881*	0.771	0.032	0.835*	0.938**
SP	0.533	-0.854*	-0.688	0.145	-0.401	0.555	0.800
YPP	0.641	0.073	-0.424	0.640	-0.177	0.971**	0.666
YHM	0.674	0.085	-0.361	0.582	-0.178	0.946**	0.682
TRL	-0.303	0.175	0.310	-0.030	-0.568	0.518	-0.208
TSA	0.500	-0.829*	-0.817*	0.268	-0.256	0.479	0.756
TRV	0.382	-0.917*	-0.707	0.089	-0.361	0.387	0.671
P _n	0.597	-0.795	-0.694	0.208	-0.392	0.636	0.847*
G _s	0.113	-0.420	-0.421	0.261	-0.527	0.712	0.356
T _r	-0.099	0.921*	0.239	0.336	0.770	-0.397	-0.440
C _i	0.801	-0.300	-0.897*	0.777	0.033	0.811*	0.890*
WUE	0.530	-0.535	-0.272	-0.027	-0.417	0.529	0.685
BD	0.621	0.143	-0.968*	0.585	0.887	-0.430	0.490
TPO	-0.135	-0.398	0.030	-0.141	-0.861*	0.679	0.137
AP	-0.103	0.502	0.102	0.079	0.848*	-0.788	-0.380
WHP	0.025	-0.557	-0.063	-0.164	-0.893*	0.726	0.324

注:*表示在 0.05 水平显著相关;**表示在 0.01 水平极显著相关。BD. 容重;TPO. 总孔隙度;AP. 通气孔隙度;WHP. 持水孔隙度;AN. 速效氮含量;APC. 速效磷含量;AK. 速效钾含量;TN. 全氮含量;TP. 全磷含量;EC. 电导率;FN. 果实硬度;TSS. 可溶性固形物含量;TS. 可溶性总糖含量;TA. 有机酸含量;VC. 维生素 C 含量;SP. 可溶性蛋白含量;YPP. 单株产量;YHM. 产量;TRL. 根系总长度;TSA. 根系总表面积;TRV. 根系总体积;P_n. 净光合速率;G_s. 气孔导度;T_r. 蒸腾速率;C_i. 胞间二氧化碳浓度;WUE. 水分利用效率。

Note: * indicates significant correlation at the 0.05 level; ** indicates extremely significant correlation at the 0.01 level. BD. Bulk density; TPO: Total porosity; AP. Aeration porosity; WHP. Water-holding porosity; AN. Available nitrogen content; APC. Available phosphorus content; AK. Available potassium content; TN. Total nitrogen content; TP. Total phosphorus content; EC. Electrical conductivity; FN. Fruit firmness; TSS. Total soluble solids content; TS. Total soluble sugar content; TA. Titratable acid content; VC. Vitamin C content; SP. Soluble protein content; YPP. Yield per plant; YHM. Yield; TRL. Total root length; TSA. Total root surface area; TRV. Total root volume; P_n. Net photosynthetic rate; G_s. Stomatal conductance; T_r. Transpiration rate; C_i. Intercellular CO₂ concentration; WUE. Water use efficiency.

实,EC 值与净光合速率、维生素 C 含量及有机酸含量呈显著或极显著正相关,而 pH 与单株产量和折合产量也呈极显著正相关。这表明,T3 基质中较高的养分有效性(由 EC 值表征)和适宜的中性微环境

是驱动番茄高产优质的关键化学因子^[15]。值得注意的是,所有复配处理的全磷含量均显著低于对照,这可能与苹果枝条原料本身的磷含量较低及发酵过程中的固定作用有关,提示在实际应用中需关注磷素的额外补充。

3.2 光合性能的改善是产量与品质协同提升的生理基础

T3 处理在整个生育期,尤其是在决定产量的盛果期和收获期,均保持了最高的净光合速率(P_n)和气孔导度(G_s)。这表明,T3 基质提供的良好根际环境保障了叶片气孔的充分开放,从而保障了 CO_2 的充足供应^[16]。然而,在生长后期,T3 处理同时伴随着较高的胞间 CO_2 浓度(C_i)。通常, C_i 升高意味着 CO_2 供应充足而叶肉细胞的光合活性受限^[17]。但在本研究中,T3 处理的 P_n 在 C_i 升高的情况下依然维持最高水平,反映出其光合作用的限制因素并非气孔关闭,而是源于叶肉细胞光合活性的非气孔限制。即 T3 处理下的番茄叶片具有更高的光合机构活性和碳同化效率,能够快速固定并转运 CO_2 ,从而维持了较高的净光合速率^[18]。

3.3 果实综合品质的协同提升与关键驱动因子

T3 处理成功实现了番茄果实多项品质指标的协同提升,尤其是在营养品质(维生素 C、可溶性蛋白)和基础积累方面表现突出。相关性分析为解析其内在驱动机制提供了线索。土壤 EC 值与维生素 C 和有机酸含量均呈极显著正相关,而速效氮含量与这两项指标呈显著正相关,共同说明 T3 基质通过维持较高的氮素和盐基离子有效性,直接促进了果实中次生代谢物和风味物质的合成^[19]。而土壤 pH 通过影响养分有效性和根系生理状态,间接参与高产的形成。相比之下,速效磷含量与多项品质指标呈负相关,这可能与磷素过高会打破体内养分平衡或影响其他元素吸收有关^[20],其具体机制值得进一步探究。

综上所述,苹果枝条复配基质,特别是 T3 配方(苹果枝条、草炭、珍珠岩体积比为 40:30:30),通过创造一种“物理结构优良、化学环境适宜”的根际微域,促进了根系的形态建成,进而优化了植株的光合生理功能,最终协同驱动了产量与品质的提升。

参考文献

- [1] 辛竹琳,崔彦娟,杨小微,等.全球蔬菜产业现状及中国蔬菜育种发展路径研究进展[J].分子植物育种,2022,20(9):3122-3132.
- [2] 赵娇娇,郭利平.陕北山地苹果衰老园改造技术[J].果树实用技术与信息,2025(10):3-4.
- [3] Li Y, Kang Y, Ouyang Y, et al. Environmental impact and economic benefits analysis of composting apple pruning branches based on life cycle assessment[J]. Agricultural Engineering, 2024, 14(4): 74-79.
- [4] Duan Y M, Mehariya S, Kumae A, et al. Apple orchard waste recycling and valorization of valuable product: A review[J]. Bioengineered, 2021, 12(1): 476-495.
- [5] Atzori G, Pane C, Zaccardell M, et al. The role of peat-free organic substrates in the sustainable management of soilless cultivations[J]. Agronomy, 2021, 11(6): 1236.
- [6] Van Schoor L, Stassen P J C, Botha A. Effect of organic material and biological amendments on pear tree performance and soil microbial and chemical properties[J]. Acta Horticulturae, 2012(933): 205-214.
- [7] Liu X, Ren X, Dong J, et al. Preparation and physicochemical properties of biochar from the pyrolysis of pruning waste of typical fruit tree in north China[J]. BioResources, 2023, 18(4): 8536-8556.
- [8] 李周强,朱雷霞,刘芳鹏,等.渭北苹果园“五关十八环”精细化管理技术[J].西北园艺,2025(9):94-96.
- [9] 张培,李思锦,李金磊,等.炭化温度对果树枝条生物质炭理化性质的影响[J].东北林业大学学报,2025,53(9):90-100.
- [10] 褚春年,魏礼,姚雷,等.葡萄枝条还田模式对土壤养分及果实品质的影响[J].农业工程,2025,15(7):72-76.
- [11] 张文静,吴春祥,徐东波,等.优化灌溉施肥对设施番茄产量、品质及水肥利用的影响[J].灌溉排水学报,2025,44(11):10-17.
- [12] 许泽华,马军,马超,等.水溶肥配施酸化制剂对“赤霞珠”酿酒葡萄光合特性及品质的影响[J].宁夏农林科技,2025,66(7):28-33.
- [13] Shi Y F, Zang Y F, Yang H H, et al. Biochar enhanced phytostabilization of heavy metal contaminated mine tailings: A review[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 1044921.
- [14] Li Y B, Zhang R F, Zhang C, et al. Integrative approaches to nutrient management in tomato cultivation for improved sustainability and productivity[J]. Frontiers in Plant Science, 2025, 16: 1626136.
- [15] 宫彬彬,张斌,吴晓蕾,等.基质 EC 值与海藻酸添加量对番茄幼苗生长的影响[J].北方园艺,2020(21):39-44.
- [16] Liu J, Li H, Yuan Z Y, et al. Effects of microbial fertilizer and irrigation amount on growth, physiology and water use efficiency of tomato in greenhouse[J]. Scientia Horticulturae, 2024, 323: 112553.
- [17] 徐少南,李莹,叶林,等.不同光质对比对番茄幼苗生长、光合特性及抗氧化酶活性的影响[J].华北农学报,2025,40(增刊1):121-129.
- [18] Zakharov D, Stepanova E, Pashkin M, et al. Influence of limiting factors on the physiological processes of plants of the genus *Solanum*[J]. E3S Web of Conferences, 2023, 462: 02019.
- [19] 郭佳明,马跃.不同氮素浓度对盐碱地番茄果实大小的试验研究[J].中国农业综合开发,2025(6):52-55.
- [20] Shreevastav C, Subedi S, Gajurei S, et al. A review on nutrient deficiency symptoms and effects on tomato plant[J]. Food Agri Economics, 2022, 2(1): 34-36.