

贾永华, 马 军, 褚燕南, 等. 有机肥与生物菌肥配施对旱区果园土壤酶活性和果树光合能力的影响[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(7): 1378-1386.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2026.07.009

有机肥与生物菌肥配施对旱区果园土壤酶活性和果树光合能力的影响

贾永华, 马 军, 褚燕南, 岳海英, 许泽华, 李晓龙

(宁夏农林科学院园艺研究所, 宁夏 银川 750002)

摘要: 为明确园艺地布覆膜情况下, 有机肥和生物菌肥配施对旱区苹果园土壤性质与果树叶片光合能力的影响, 本研究以苹果品种岩富 8 号为试验材料, 设置不施肥对照 (CK)、蚯蚓粪 (T1)、生物菌肥 (T2) 及蚯蚓粪和生物菌肥 3 : 1 (质量比) 配施 (T3) 等处理, 分析不同肥料处理对苹果园土壤理化性质、酶活性以及果树光合参数的影响。结果表明, 与 CK 相比, T1、T2 和 T3 处理果实收获期表层 (0~20.0 cm) 土壤含水量分别提升 40.48%、18.33% 和 51.67%, pH 值分别降低 6.86%、5.20%、13.24%。除苹果花后 60 d T3 处理表层土壤碱性磷酸酶活性低于 CK 外, 花后 60~180 d T3 处理表层土壤过氧化氢酶活性、过氧化物酶活性、蔗糖酶活性、碱性磷酸酶活性、脲酶活性均显著高于 CK。T3 处理对土壤酶活性的增加效果总体高于 T1 和 T2 处理。与 CK 相比, T1、T2、T3 处理果实收获期果树叶片胞间 CO₂ 浓度分别降低 13.30%、7.62%、6.20%, 净光合速率分别增加 67.36%、47.97%、81.74%, 气孔导度分别增加 37.50%、53.12%、84.38%。综上所述, 蚯蚓粪与生物菌肥 3 : 1 (质量比) 配施能通过土壤理化性质改良、土壤酶活性提高、植株光合能力增强等途径提升土壤生态功能, 促进果树生长。

关键词: 旱区果园; 有机肥; 生物菌肥; 土壤性质; 土壤酶活性; 光合特性

中图分类号: S154.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2026)07-1378-09

Effects of combined application of organic fertilizer and bio-fertilizer on soil enzyme activities and photosynthetic capacity of fruit trees in dryland orchards

JIA Yonghua, MA Jun, CHU Yannan, YUE Haiying, XU Zehua, LI Xiaolong

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

Abstract: To clarify the effects of combined application of organic fertilizer and bio-fertilizer on soil properties and leaf photosynthetic capacity of fruit trees in apple orchards in arid areas under mulching with horticultural ground fabric, this study used apple variety Yanfu 8 as the test material, and set up no fertilization control (CK), vermicompost treatment (T1), bio-fertilizer treatment (T2) and vermicompost and bio-fertilizer (3 : 1) combined application treatment (T3) to analyze the effects of different fertilizer treatments on soil physical and chemical properties and enzyme activities in apple

orchards and photosynthetic parameters of fruit trees. The results showed that compared with CK, the water contents of surface soil (0~20.0 cm) in T1, T2 and T3 treatments at harvest stage increased by 40.48%, 18.33% and 51.67%, respectively, and the pH values decreased by 6.86%, 5.20% and 13.24%, respectively. At 60–180 days after anthesis, except that the alkaline phosphatase activity in surface soil under T3 treatment was lower than

收稿日期: 2025-07-30

基金项目: 国家苹果产业技术体系项目 (CARS-25); 中央财政林业科技推广示范项目 (2023ZY06)

作者简介: 贾永华 (1979–), 男, 山西柳林人, 硕士, 副研究员, 主要从事果树栽培生理与贮藏等研究工作。(E-mail) 529843423@qq.com

通讯作者: 李晓龙, (E-mail) 262450313@qq.com

that under CK at 60 days after anthesis, the catalase activity, peroxidase activity, sucrase activity, alkaline phosphatase activity and urease activity in surface soil under T3 treatment were significantly higher than those under CK. The effect of T3 treatment on the increase of soil enzyme activity was higher than that of T1 and T2 treatments. Compared with CK, the intercellular CO_2 concentration in fruit tree leaves at harvest stage under T1, T2 and T3 treatments decreased by 13.30%, 7.62% and 6.20% respectively, the net photosynthetic rate increased by 67.36%, 47.97% and 81.74% respectively, and the stomatal conductance increased by 37.50%, 53.12% and 84.38% respectively. In summary, the combined application of vermicompost and bio-fertilizer at 3 : 1 mass ratio can improve soil ecological functions and promote fruit tree growth through the improvement of soil physical and chemical properties, enhancement of soil enzyme activities, and strengthening of plant photosynthetic capacity.

Key words: dryland orchards; organic fertilizer; bio-fertilizer; soil properties; soil enzyme activities; photosynthetic characteristics

农业生产中,部分种植者为片面追求高产过度使用化肥、除草剂和杀虫剂,这不仅导致严重的水体污染、土壤退化及土壤微生物多样性下降等环境问题,还降低了肥料利用效率和种植经济效益^[1]。为改善土壤质量、降低化肥使用量,近年来,利用有机肥替代或部分替代化肥已成为现代可持续农业的主要发展方向^[2-3]。此外,含芽孢杆菌、假单胞菌、固氮菌等的功能生物菌肥能够分解与转化土壤中难溶性的磷、钾等物质,或将空气中的氮气固定为氨,增加土壤氮素供应,亦在现代农业生产中得到广泛应用^[4]。

有机肥与生物菌肥的配施对作物生长具有较好的加乘效应。生物菌肥能加速有机肥中有机物质的矿化。有机肥配施解淀粉芽孢杆菌肥能显著提升土壤呼吸强度,增强过氧化氢酶等氧化还原酶活性,而有机肥中的有机质和腐殖酸能为生物菌肥中的菌群发育提供碳源,延长菌群定殖时间^[5]。与单施有机肥(蚯蚓粪)相比,有机肥与生物菌肥配施处理能显著提高土壤微生物生物量氮含量 20% 以上,增强蔗糖酶活性与脲酶活性 15% 以上^[6-8]。因此,有机肥与生物菌肥配施能通过土壤理化性质改良、土壤微生物激活、土壤酶活性增强等途径协同提升土壤生态功能,推动农业绿色转型^[9]。

宁夏引黄河水灌溉区具有优良的温光资源和水资源,已逐渐成为宁夏苹果主要栽培区^[10]。为解决宁夏引黄河水灌溉区降水稀少、冬季寒冷的现状,覆膜技术在该地区的农业生产中得到了大面积应用^[11]。尽管有机肥对大田作物和果树生长影响已有较多研究^[12],但有机肥与生物菌肥配施对宁夏引黄河水灌溉区苹果园土壤理化性质和酶活性的影响研究尚未见报道。蚯蚓粪肥是蚯蚓对有机物分解后形成的营养丰富且具有微生物活性的有机改良剂,

具有较高的孔隙率、比表面积和持水能力。目前,蚯蚓粪肥在大田作物、蔬菜和水果的种植中得到了越来越多的应用^[13]。本研究以种植苹果品种岩富 8 号 3 a 的苹果园为试验地,分析园艺地布覆膜情况下,蚯蚓粪与生物菌肥配施对土壤理化性质、酶活性及果树叶片光合参数的影响,旨在为该地区苹果栽培技术优化提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验基地与材料

试验于宁夏农林科学院综合试验基地苹果园进行。试验地位于银川市西夏区芦花乡(38°38'N, 106°09'E),海拔 1 113 m,年平均气温 8.8 °C, ≥ 10 °C 年活动积温 3 300.0 °C,年平均降水量 198.0 mm,年平均蒸发量 1 583.0 mm,年日照时数约 3 000.0 h,平均无霜期 160.0 d。试验果园土壤类型为黏质土,有机质(SOM)含量 6.02 g/kg、全氮(TN)含量 0.32 g/kg、全磷(TP)含量 0.44 g/kg、全钾(TK)含量 17.30 g/kg、碱解氮(AN)含量 20.30 mg/kg、速效磷(AP)含量 14.60 mg/kg、速效钾(AK)含量 142.25 mg/kg。

蚯蚓粪来源于吴忠市绿谷源家庭农场,有机质含量 45.00%,全氮含量 9.91 g/kg,全磷含量 4.75 g/kg,全钾含量 12.50 g/kg, pH 值 7.46,全盐含量 0.75 g/kg。生物菌肥(枯草芽孢杆菌)购于潍坊益昊生物技术有限公司,每 1 g 菌肥含 1×10^{11} 个有效活菌。

1.2 试验设计

试验苹果园主栽品种为岩富 8 号,基砧为青砧 1 号,树龄 3 a,株距 1.5 m,行距 4.0 m,试验果园面积 2.0 hm^2 。2023 年秋(10 月 1-10 日),顺着行向在树冠投影的两侧开沟,沟宽 30~50 cm,深 30~50

cm, 施入基肥, 用量为牛粪 36 t/hm² 和玉米芯 15 t/hm²。供水模式为滴灌。2024 年春(3 月 25 日-4 月 5 日)进行萌发肥处理。以不施肥为对照, 设置 4 500 kg/hm² 蚯蚓粪(T1)、4 500 kg/hm² 生物菌肥(T2)、3 375 kg/hm² 蚯蚓粪与 1 125 kg/hm² 生物菌肥混合(T3)3 个施肥处理。将试验地划分为 3 个区组, 每个区组内随机排列 4 个处理(T1、T2、T3 和 CK), 共 12 个试验小区。每个小区面积为 200 m², 小区间设保护行, 所有处理均为一次性行内均匀撒施, 施肥后, 所有小区(包括 CK)立即统一覆盖园艺地布。

1.3 样品采集及测定

苹果树于 2024 年 4 月 20 日开花, 10 月底果实成熟。花后 30 d、60 d、90 d、120 d、150 d、180 d 利用直径 7 cm 的土壤螺旋钻, 在每个小区内按对角线法布设 5 个采样点, 分别采集 0~20.0 cm 和 20.1~40.0 cm 土层土样。将各小区同一土层的 5 个土样混合均匀, 得到 1 个混合样。然后, 剔除土样中植物根以及石块等杂质, 共获得 24 份土壤样品。每份土壤样品过孔径为 2 mm 的筛子后 4 ℃ 储藏, 用于土壤酶活性测定。于果实收获期, 参照上述方法在各小区另外采集 1 份土样, 风干后用于土壤理化性质测定。

参照文献[14]、[15]的方法进行土壤理化性质测定。采用环刀法测定土壤容重(Bulk density, BD), 采用凯氏定氮法测定土壤 TN 含量; 采用酸溶性铝锑电阻比色法测定土壤 TP 含量; 采用布雷-1(Bray-1)法萃取后, 利用钼蓝比色法测定土壤 AP 含量; 采用火焰光度法测定土壤 AK 含量; 100 mL 2 mol/L KCl 溶液对 20 g 风干土样进行振荡浸提 1 h, 利用 AA3 连续流动分析仪(德国 SEAL 公司产品)测定土样 NO₃⁻-N 含量和 NH₄⁺-N 含量; 10 g 风干土样和 25 mL 去离子水制备土壤-水悬浮液, 利用玻璃电极法土壤 pH 值。

参照文献[16]、[17]的方法测定土壤酶活性。以 4-甲基伞形酮磷酸盐为底物, 利用 Infinite 200 PRO 多功能酶标仪(瑞士 Tecan 公司产品)在激发波长 365 nm、发射波长 450 nm 条件下检测荧光强度, 进而得到土壤碱性磷酸酶(ALP)活性; 以 Amplex Red 为底物, 在激发波长 350 nm、发射波长 460 nm 条件下检测荧光强度, 进而得到土壤过氧化物酶(POD)活性; 利用靛酚蓝比色法检测土壤脲酶(UE)活性。采用 3,5-二硝基水杨酸比色法检测土

壤蔗糖酶(SSC)活性; 采用紫外速率法检测土壤过氧化氢酶(CAT)活性。

于苹果果实收获期(2024 年 10 月下旬)选取晴朗天气条件于上午 9:00-11:00, 采用 TPS-2 光合仪(美国 PP Systems 公司产品)进行果树叶片光合特性测定, 每个处理测定 6 张叶片, 重复 3 次。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 软件进行数据统计分析, 采用 Duncan 氏法和 SPSS26.0 软件进行处理间差异显著性分析, 采用 OriginPro 2024b 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对果实收获期土壤理化性质的影响

不同施肥处理对土壤理化性质的影响如表 1 所示。从表中可以看出, T1、T2 和 T3 处理 0~20.0 cm 土层土壤含水量分别比 CK 提升 40.48%、18.33% 和 51.67%, T1 和 T3 处理 0~20.0 cm 土层土壤含水量分别比 T2 处理提升 18.71% 和 28.17%。T1~T3 处理 20.1~40.0 cm 土层土壤含水量均显著高于 CK, T1、T2、T3 处理间差异不显著。T1~T3 处理 2 个土层土壤 pH 值均显著低于 CK, 更偏向中性, 其中, T3 处理 0~20.0 cm 土层和 20.1~40.0 cm 土层土壤 pH 值分别比 CK 降低 13.24% 和 8.94%。不同施肥处理对 2 个土层土壤容重均无显著影响。综合来看, 3 个施肥处理均能有效增加土壤含水量, 降低 pH 值, 其中 T3 处理的效果更佳。

表 1 不同处理对果实收获期土壤理化性质的影响

Table 1 Effects of different treatments on soil physicochemical properties at fruit harvest stage

土层深度 (cm)	处理	含水量 (%)	pH	容重 (g/cm ³)
0~20.0	CK	8.40±0.47c	8.46±0.06a	0.98±0.06a
	T1	11.80±0.90a	7.88±0.03c	1.03±0.06a
	T2	9.94±0.47b	8.02±0.02b	0.98±0.07a
	T3	12.74±0.61a	7.34±0.08d	1.02±0.05a
20.1~40.0	CK	7.46±0.73b	8.61±0.06a	1.08±0.06a
	T1	10.46±0.33a	8.12±0.04b	1.14±0.04a
	T2	10.25±0.63a	8.24±0.03b	1.03±0.03a
	T3	10.04±0.12a	7.84±0.02c	1.08±0.05a

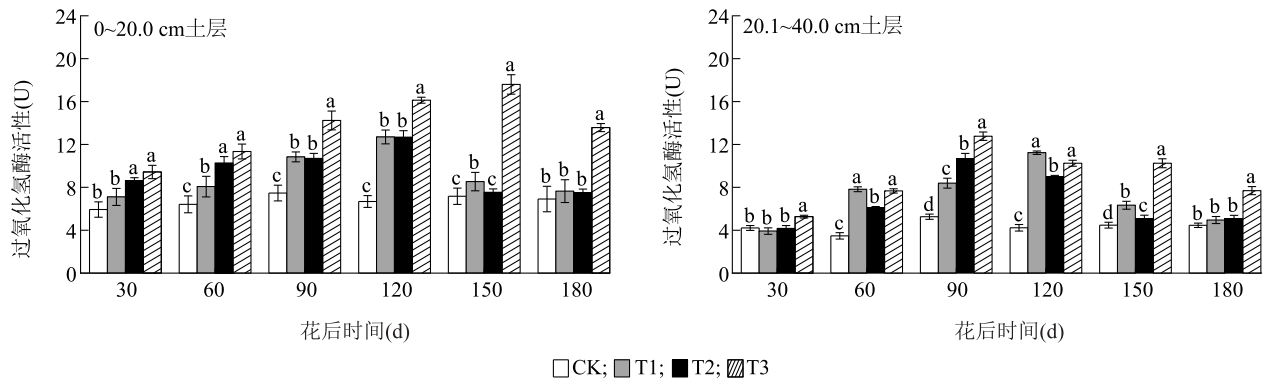
CK: 不施肥对照; T1: 4 500 kg/hm² 蚯蚓粪处理; T2: 4 500 kg/hm² 生物菌肥处理; T3: 3 375 kg/hm² 蚯蚓粪+1 125 kg/hm² 生物菌肥处理。同一土层同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

2.2 不同处理对土壤酶活的影响

不同施肥处理对土壤过氧化氢酶(CAT)活性的影响如图1所示。从图中可以看出,随着果树的生长,T1、T2、T3处理表层(0~20.0 cm)土壤CAT活性总体表现为先升高后降低的变化趋势,峰值分别出现于花后120 d、120 d和150 d。不施肥对照(CK)花后60~180 d,CAT活性无显著变化。花后30~180 d,T3处理表层土壤CAT活性均显著高于T1处理和CK;花后30~60 d,T3处理表层土壤CAT活性与T2处理无显著差异,花后90~180 d,T3处理表层土壤CAT活性显著高于T2处理。花后150 d,T3处理表层土壤CAT活性达到峰值(17.59 U,分别比T1、T2处理和CK增加1.06倍、1.33倍和1.45倍。花后60~120 d,T1处理与T2处理表层土壤CAT活性显著高于CK,而花后180 d T1处理与T2处理表层土壤CAT活

性与CK无显著差异。

深层(20.1~40.0 cm)土壤CAT活性整体低于表层土壤,这说明土壤中CAT活性存在垂直异质性。花后30~180 d,T3处理CAT活性显著高于CK和T2处理;花后60 d和120 d,T3处理CAT活性与T1处理无显著差异,其他时间T3处理CAT活性显著高于T1处理。这证明蚯蚓粪与生物菌肥的协同施用同样能提高深层土壤CAT活性,改善根区的整体微环境。花后30 d和180 d,T1处理和T2处理深层土壤CAT活性无显著差异,花后60 d、120 d、150 d,T1处理深层土壤CAT活性显著高于T2处理,花后90 d,T1处理深层土壤CAT活性低于T2处理。综上所述,从花后时间和土壤剖面来看,T3处理土壤过氧化氢酶活性的提升效果高于T1、T2处理。



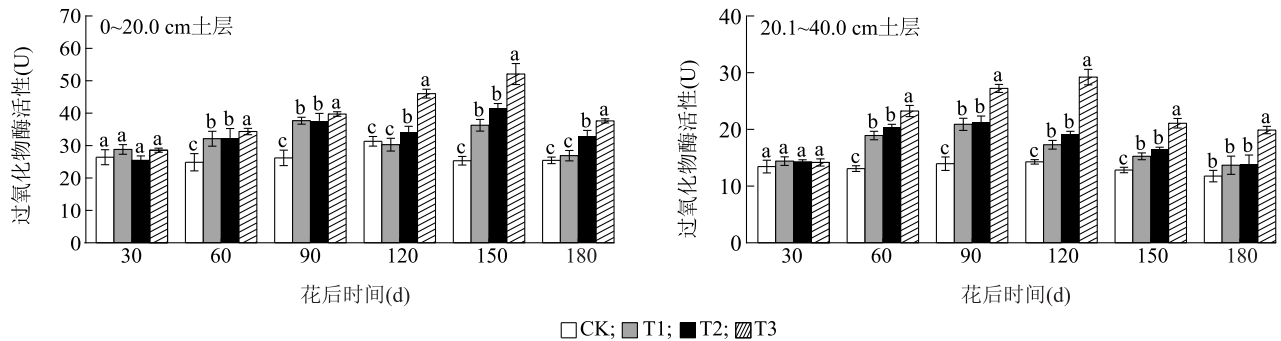
CK、T1、T2、T3 见表1注。同一花后时间图柱中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

图1 不同施肥处理对花后土壤过氧化氢酶活性的影响

Fig.1 Effects of different fertilization treatments on soil catalase activity after anthesis

不同施肥处理对土壤过氧化物酶(POD)活性的影响如图2所示。从图中可以看出,花后30 d,T1~T3处理表层(0~20.0 cm)土壤POD活性与CK均无显著差异;花后60~90 d,T1~T3处理表层土壤POD活性均显著高于CK,且T3处理表层土壤POD活性显著高于T1和T2处理;花后120~180 d,T3处理表层土壤POD活性显著高于T1、T2处理和CK,T2处理表层土壤POD活性显著高于CK。上述结果说明,蚯蚓粪和生物菌肥的单独施用虽能提高部分苹果花后时间表层土壤POD活性,但稳定性较差,而蚯蚓粪和生物菌肥配施(T3处理)能稳定提高苹果花后表层土壤POD活性。

同CAT活性一致,不同处理深层(20.1~40.0 cm)土壤POD活性整体低于表层,这与POD主要参与地表凋落物初始分解的生态功能相符。花后30 d,T1~T3处理深层土壤POD活性与CK无显著差异;花后60~150 d,T3处理深层土壤POD活性显著高于T1、T2处理和CK,且T1、T2处理深层土壤POD活性显著高于CK;花后180 d,T3处理深层土壤POD活性显著高于CK和T1、T2处理,而T1、T2处理深层土壤POD活性均与CK无显著差异。上述结果表明,蚯蚓粪和生物菌肥的施用均能提高土壤POD活性,蚯蚓粪和生物菌肥配施(T3处理)对苹果花后不同土层土壤POD活性的提高效果优于单一处理。



CK、T1、T2、T3 见表 1 注。同一花后时间图柱中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

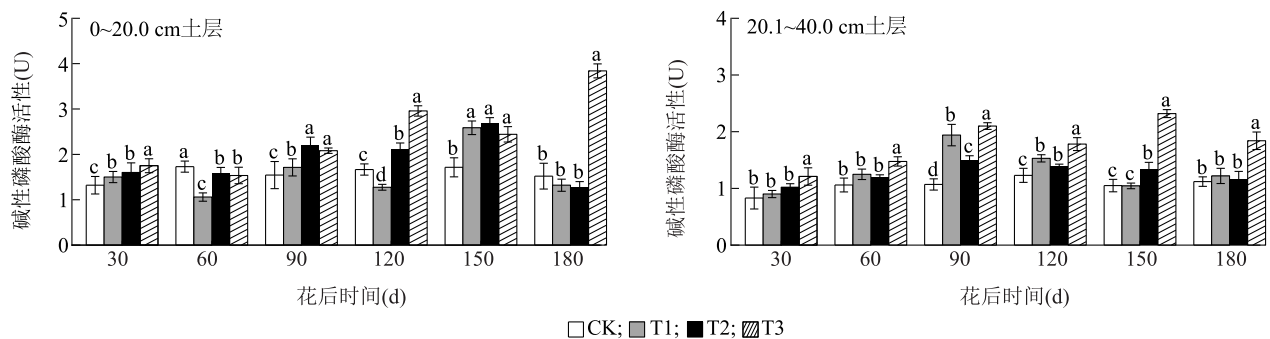
图 2 不同施肥处理对土壤过氧化物酶活性的影响

Fig.2 Effects of different fertilization treatments on soil peroxidase activity after anthesis

不同施肥处理对土壤碱性磷酸酶 (ALP) 活性的影响如图 3 所示。从图中可以看出,花后 30 d, T3 处理表层 (0~20.0 cm) 土壤 ALP 活性显著高于 T1、T2 处理和 CK;花后 60 d, T1~T3 处理表层土壤 ALP 活性均低于 CK,这可能是由于施肥初期,外源养分的投入能暂时抑制土壤微生物分泌磷酸酶以获取磷的“饥饿诱导”效应。随着时间推移,施肥处理的优势逐渐显现。花后 90~150 d, T3 处理和 T2 处理表层土壤 ALP 活性均显著高于 CK。花后 180 d, T3 处理表层土壤 ALP 活性分别是 T1、T2 处理和 CK 的 2.91 倍、3.05 倍和 2.53 倍, T1、T2 处理表层土壤 ALP 活性与 CK 无显著差异。上述结果说明, T3 处理能稳定提高苹果花后表层土壤 ALP 活性,实现土

壤持续稳定的磷素供应。

花后 30~180 d, T3 处理深层 (20.1~40.0 cm) 土壤 ALP 活性均显著高于 T1、T2 处理和 CK,其中,花后 150 d, T3 处理深层土壤 ALP 活性达到峰值,分别是 T1、T2 处理和 CK 的 2.22 倍、1.74 倍和 2.21 倍。这说明蚯蚓粪和生物菌肥配施能有效活化深层土壤中的磷素,提高作物根系对磷的吸收。花后 90~120 d, T1、T2 处理深层土壤 ALP 活性均显著高于 CK,其他时间, T1、T2 处理深层土壤 ALP 活性总体与 CK 差异不大。上述结果说明, T3 处理能有效提升苹果花后深层土壤 ALP 活性,这对保障土壤磷素供应具有重要意义。



CK、T1、T2、T3 见表 1 注。同一花后时间图柱中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 3 不同施肥处理对花后土壤碱性磷酸酶活性的影响

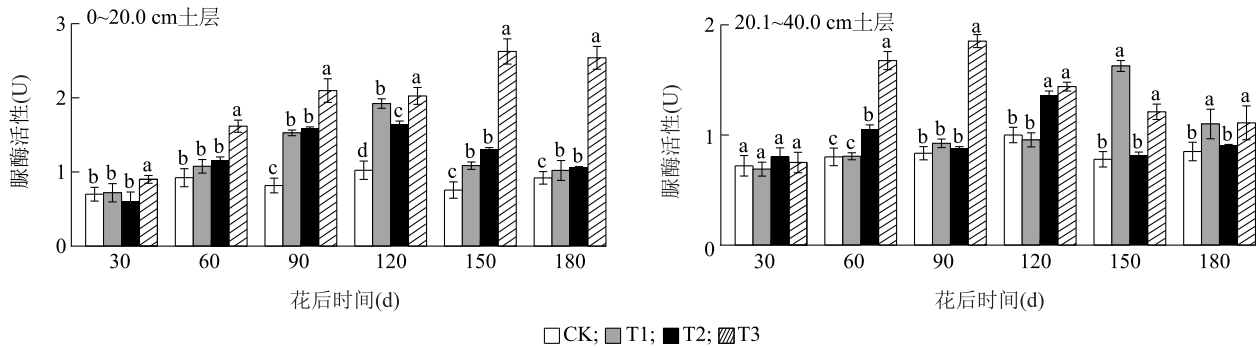
Fig.3 Effects of different fertilization treatments on soil alkaline phosphatase activity after anthesis

不同施肥处理对土壤脲酶 (UE) 活性的影响如图 4 所示。从图中可以看出,随着苹果树的生长,不同处理土壤 UE 活性总体均呈现先上升后下降的趋势。花后 30~180 d, T3 处理表层 (0~20.0 cm) 土

壤 UE 活性显著高于 T1、T2 处理和 CK。花后 150 d, T3 处理表层土壤 UE 活性分别是 T1、T2 处理和 CK 的 2.42 倍、2.02 倍和 3.47 倍。花后 90~180 d, T1 处理和 T2 处理表层土壤 UE 活性显著高于 CK。

不同施肥处理深层(20.1~40.0 cm)土壤脲酶活性整体低于表层。花后30 d, T1~T3处理深层土壤脲酶活性与CK无显著差异;花后60~90 d, T3处理深层土壤脲酶活性显著高于T1、T2处理和CK。花后120 d, T3处理和T2处理深层土壤脲酶活性

无显著差异,且均显著高于T1处理和CK。花后150~180 d, T1处理和T3处理深层土壤脲酶活性均显著高于T2处理和CK。上述结果表明,T3处理能有效促进氮素在土壤中的转化与供应,其对土壤脲酶活性的提升效果优于T1处理和T2处理。



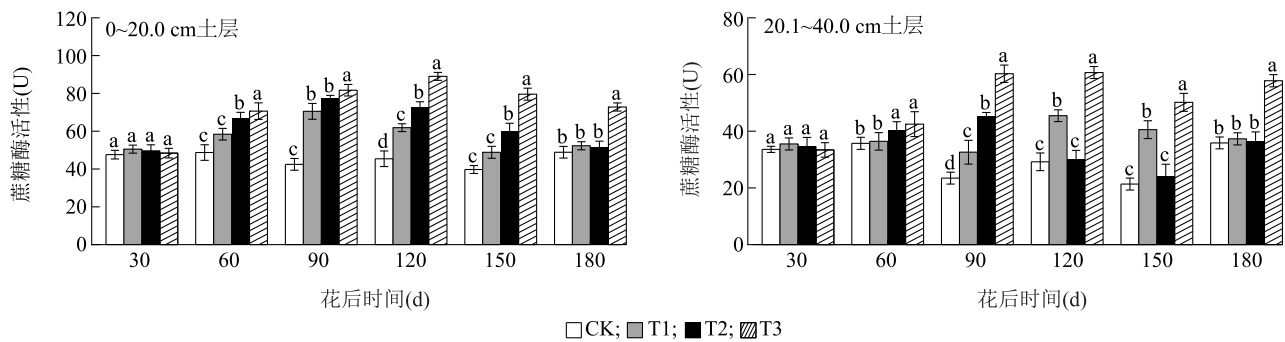
CK、T1、T2、T3 见表 1 注。同一花后时间图柱中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 4 不同施肥处理对花后土壤脲酶活性的影响

Fig.4 Effects of different fertilization treatments on soil urease activity after anthesis

不同施肥处理对土壤蔗糖酶活性的影响如图 5 所示。从图中可以看出,不同处理表层(0~20.0 cm)土壤蔗糖酶活性总体呈现先升高后降低的趋势。花后30 d, T1~T3处理表层土壤蔗糖酶活性与CK无显著差异。花后60~150 d, T3处理和T2处理表层土壤蔗糖酶活性均显著高于CK,且T3处理

表层土壤蔗糖酶活性显著高于T2处理。花后120 d, T3处理表层土壤蔗糖酶活性分别比T1、T2和CK处理提高43.9%、22.7%和96.0%。花后180 d, T3处理表层土壤蔗糖酶活性分别是T1、T2处理和CK的1.39倍、1.41倍和1.49倍,增加显著。



CK、T1、T2、T3 见表 1 注。同一花后时间图柱中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 5 不同施肥处理对花后土壤蔗糖酶活性的影响

Fig.5 Effects of different fertilization treatments on soil sucrase activity after anthesis

花后30 d, 不同处理深层(20.1~40.0 cm)土壤蔗糖酶活性无显著差异。花后60 d, T3、T2处理深层土壤蔗糖酶活性高于T1处理和CK。花后90 d, T3处理深层土壤蔗糖酶活性分别是T1、T2和CK的1.85倍、1.33倍和2.57倍。花后120~150 d, T3处理深层土壤蔗糖酶活性显著高于T1

处理,且两者均显著高于T2处理和CK。花后180 d, T3处理深层土壤蔗糖酶活性显著高于T1、T2处理和CK。上述结果表明,T1、T2处理虽能提高部分苹果花后时间深层土壤蔗糖酶活性,但稳定性较低,而T3处理能稳定有效提高深层土壤蔗糖酶活性。

2.3 不同处理对果实收获期叶片光合特性的影响

不同处理对果实收获期叶片光合特性的影响如表 2 所示。从表中可以看出, T1、T2、T3 处理胞间 CO_2 浓度 (C_i) 分别比 CK 降低 13.30%、7.62%、6.20%; T1、T2、T3 处理净光合速率 (P_n) 分别比 CK 增加 67.36%、47.97%、81.74%, T1、T2、T3 处理气

孔导度 (G_s) 分别比 CK 增加 37.50%、53.13%、84.37%, 不同施肥处理叶片蒸腾速率 (T_r) 无显著差异。因此, T3 处理对岩富苹果光合特性提升效果总体优于 T1、T2 处理。这与该处理对土壤物理性质和酶活力的影响效果较优一致。

表 2 不同施肥处理对果实成熟期叶片光合特性的影响

Table 2 Effects of different fertilization treatments on photosynthetic characteristics of leaves at fruit maturity stage

处理	细胞间 CO_2 浓度 ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)	蒸腾速率 [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	气孔导度 [$\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	净光合速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]
T1	320.52±6.99c	2.52±0.17a	0.44±0.11b	17.69±0.19b
T2	341.51±5.78b	2.47±0.21a	0.49±0.07b	15.64±0.18c
T3	346.75±5.54b	2.69±0.15a	0.59±0.09a	19.21±0.16a
CK	369.67±3.61a	2.41±0.12a	0.32±0.08c	10.57±0.25d

CK、T1、T2、T3 见表 1 注。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 不同施肥处理对土壤理化性质的影响

过度使用化肥不但会导致氮素淋失、土壤酸化、土壤有机质减少和土壤碳损失, 还会降低肥料利用率和经济效益^[18]。施用有机肥料和生物菌肥既可增加土壤保水能力、改善土壤理化特性, 又可提高土壤微生物多样性、改善土壤微生物组成^[19-21]。蚯蚓粪作为一种优质有机改良剂, 具有丰富的孔隙结构和巨大的比表面积, 施入土壤后能够有效改善土壤团粒结构, 增强土壤持水能力^[22]。覆盖园艺地布是减少土壤水分蒸发的有效措施, 其与有机肥配合使用能形成协同的保水与持水效应^[23]。本研究结果表明, 与不施肥对照 (CK) 相比, 蚯蚓粪与生物菌肥配施处理 (T3) 表层土壤 (0~20.0 cm) 含水量提升 51.67%, pH 值降低 13.24%, 其效果优于蚯蚓粪和生物菌肥的单独处理。其原因在于蚯蚓粪等有机肥料能改善土壤孔隙状况、促进土壤颗粒团聚体形成^[24], 生物菌肥中枯草芽孢杆菌等能分泌多种有机酸, 活化土壤中的难溶性磷素, 释放 H^+ 离子, 从而降低土壤 pH 值^[25-26]。在宁夏等地区的偏碱性土壤中配施蚯蚓粪与枯草芽孢杆菌类生物菌肥能产生显著的酸化效应, 这种适度的酸化作用不同可以增强土壤中难溶性磷以及铁、锌等微量元素的有效性, 还能提高土壤酶活性^[27]。

3.2 不同施肥处理对土壤酶活性的影响

土壤酶活性与土壤微生物群落组成、有效养分

含量和理化性质有关^[28-30]。作物根际环境及土层深度对土壤酶活性均有较大影响^[31-32]。本研究结果表明, 蚯蚓粪与生物菌肥配施 (T3 处理) 能显著提高苹果花后土壤过氧化氢酶 (CAT) 活性和过氧化物酶 (POD) 活性, 花后 150 d, 表层土壤 CAT 活性和 POD 活性均达到峰值, 这与此时期果树旺盛的生理代谢相匹配^[33]。T3 处理 CAT 活性和 POD 活性的提升, 一方面与蚯蚓粪提供的大量有机底物有关, 这些有机质在微生物作用下分解可能产生对植物根系有毒的过氧化物, 从而诱导微生物分泌更多的过氧化氢酶以消除毒性^[34]; 另一方面, 生物菌肥中的枯草芽孢杆菌本身也能分泌 CAT 和 POD 等酶类, 进而提高了酶活性。土壤碱性磷酸酶活性和脲酶活性呈现出较为复杂的变化特征, 这与 Rutkowski 等^[35]的研究结果一致。花后 60 d, 不施肥对照 (CK) 表层土壤碱性磷酸酶活性高于 T1~T3 处理, 这一现象可能与“酶学抑制效应”有关, 即外源养分的投入能暂时降低微生物分泌磷酸酶以获取磷的“饥饿驱动”^[36]。随着生育期的推进, 花后 180 d, T3 处理表现出极强的“激发效应”^[37], 表层土壤碱性磷酸酶活性达到 CK 的 2.53 倍, 这可能与有机质矿化释放的有机磷化合物诱导微生物大量合成磷酸酶相关^[38]。苹果花后 90~180 d, T3 处理表层土壤和深层土壤蔗糖酶活性显著高于其他处理, 这与蚯蚓粪提供丰富的碳源和生物菌肥增强微生物代谢水平相关^[39]。此外, T3 处理表层土壤酶活性的提升效果总体高于深层土壤, 这与有机物料、作物根系及土壤微生物在

土壤表层中密集分布有关。

3.3 不同施肥处理对果树光合特性的影响

光合作用是作物产量形成的基础^[40-46],不同施肥处理对土壤结构及作物光合能力有显著影响^[47]。本研究结果表明,施肥类型对苹果叶片的光合参数有显著影响。蚯蚓粪与生物菌肥配施(T3处理)能显著提高果实收获期苹果叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s),降低胞间 CO_2 浓度,这与丁守鹏等^[48]和 Ye 等^[49]的研究结果一致。

4 结 论

蚯蚓粪和生物菌肥配施可有效提高土壤含水量,降低 pH 值,增加土壤过氧化氢酶、过氧化物酶、磷酸酶、脲酶、蔗糖酶等土壤酶的活性,提升苹果树叶净光合速率、气孔导度,促进果树生长,且配施效果总体优于蚯蚓粪和生物菌肥的单独施用。

参考文献:

- [1] 杨佳妮,朱柏菁,任竹红,等. 减施化肥配施有机物料对旱地红壤团聚体尺度上线虫群落的影响[J/OL]. 土壤学报. [2025-07-25]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1119.P.20250730.1018.002>.
- [2] 夏乐斋. 我国农业可持续发展中土壤肥料问题研究[J]. 低碳世界,2020,10(7):226,228.
- [3] 鲁 飞. 有机肥助力农业可持续发展[J]. 农经,2020(12):46-49.
- [4] 黄国东,宋清晖,王晓慧,等. 含枯草芽孢杆菌肥料对大豆叶片光合作用及土壤酶活性的影响[J]. 土壤与作物,2021,10(1):99-107.
- [5] Edwards C A, Arancon N Q. Biology and ecology of earthworms [M]. 4th edition. New York:Springer US,2022:233-274.
- [6] Raja Sekar K, Karmegam N. Earthworm casts as an alternate carrier material for biofertilizers; assessment of endurance and viability of *Azotobacter chroococcum*, *Bacillus megaterium* and *Rhizobium leguminosarum* [J]. Scientia Horticulturae, 2010, 124(2):286-289.
- [7] 许泽华,马 军,李白云,等. 不同用量有机肥和生物菌肥配施对设施番茄土壤性能和品质的影响[J]. 中国瓜菜,2025,38(3):131-137.
- [8] 李 想,刘艳霞,陈风雷,等. 长期不同施肥处理对贵州植烟土壤酶活及微生物群落的影响[J]. 中国烟草学报,2019,25(6):50-59.
- [9] Amadou A, Song A L, Tang Z X, et al. The effects of organic and mineral fertilization on soil enzyme activities and bacterial community in the below- and above-ground parts of wheat [J]. Agronomy, 2020, 10(10):1452.
- [10] 褚燕南,贾永华,岳海英,等. 宁夏引黄灌区果园间作长柔毛野豌豆的土壤碳氮转化特征[J]. 北方园艺,2025(12):111-120.
- [11] 王晓芳. 果园黑色园艺地布的使用方法[J]. 落叶果树,2017,49(3):5.
- [12] 刘宝龙,付旭坤,孟祥宇,等. 地膜覆盖与有机肥施用对稻田土壤养分与酶活性的影响[J]. 东北师大学报(自然科学版),2024,56(3):121-128.
- [13] 张 卓,聂江力,邱晓坤,等. 蚯蚓粪肥部分替代化肥对兰州百合光合特性、品质和产量的影响[J/OL]. 作物杂志. [2025-07-29]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1808.S.20250729.1521.004>.
- [14] 刘蓓青,巴婷婷,张建国,等. 长期不同施肥模式对陕南核桃园土壤理化性质及经济效益的影响[J]. 西北林学院学报,2025,40(4):76-84.
- [15] 生态环境部(原环境保护部). 土壤总磷的测定 碱熔-钼锑抗分光光度法: HJ 632-2011[S]. [2025-07-05].
- [16] Ma J, Li G Z, Tian J W, et al. Assessing and quantifying the carbon, nitrogen, and enzyme dynamics effects of inter-row cover cropping on soils and apple tree development in orchards [J]. HortScience, 2024, 59(8):1088-1096.
- [17] 中华人民共和国国家卫生健康委员会,国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中脲酶的测定:GB 5009.183-2025[S]. [2025-07-25].
- [18] Zhang Y J, Ye C, Su Y W, et al. Soil acidification caused by excessive application of nitrogen fertilizer aggravates soil-borne diseases: evidence from literature review and field trials [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2022, 340:108176.
- [19] 刘 闯,姜 悦,罗 然,等. 有机无机肥配施对紫苏生长及土壤微生物群落的影响[J]. 北方园艺,2025(17):102-109.
- [20] Rattan B, Dhobale K V, Saha A, et al. Influence of inorganic and organic fertilizers on the performance of water-absorbing polymer amended soils from the perspective of sustainable water use efficiency [J]. Soil and Tillage Research, 2022, 223:105449.
- [21] 邓 炯. 肥料在土壤可持续利用中的作用研究[J]. 农村科学实验,2024(1):48-50.
- [22] Sainju U M, Liptzin D, Dangi S M. Enzyme activities as soil health indicators in relation to soil characteristics and crop production [J]. Agrosystems, Geosciences & Environment, 2022, 5(3):e20297.
- [23] 张 翔,耿孝宇,汪璐璐,等. 生物炭改良盐碱地土壤的效应与机制研究进展[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版),2025,46(3):1-10.
- [24] 童文彬,郑则华,杨海峻,等. 畜禽有机肥与化肥配施条件下橘园土壤细菌群落分布与氮代谢的剖面分析[J]. 浙江农业科学,2025,66(3):760-768.
- [25] 于功霞,李 迎,刘宏元,等. 我国盐碱地改良与利用技术研究进展[J]. 黑龙江农业科学,2025(7):96-103.
- [26] Frankenberger W T, Johanson J B. Effect of pH on enzyme stability in soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1982, 14(5):433-437.
- [27] Bo H J, Li Z J, Wang W, et al. Combining organic and inorganic fertilization enhances soil enzyme activity, the bacterial community,

- and molecular ecological network complexity in coal mine reclamation areas[J]. *Agronomy*, 2024, 14(7):1427.
- [28] 殷浩凯, 李倩, 赵宇航, 等. 不同培肥措施对褐土土壤微生物群落和酶活性的影响[J]. *环境科学*, 2026, 47(2):1366-1378.
- [29] 孙建波, 畅文军, 李文彬, 等. 香蕉不同生育期根际微生物生物量及土壤酶活的变化研究[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(6):1169-1174.
- [30] 金珊, 刘雪, 陈卓昂, 等. 有机肥配施生物菌肥对设施黄瓜土壤改良效果[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(9):1995-2003.
- [31] Farmer J, Zhang B, Jin X X, et al. Long-term effect of plastic film mulching and fertilization on bacterial communities in a brown soil revealed by high through-put sequencing[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2017, 63(2):230-241.
- [32] 王继涛, 刘世伟, 刘晓娇, 等. 不同堆肥方式有机肥对设施土壤性质、西瓜生长发育及品质的影响[J]. *现代园艺*, 2025, 48(15):18-21.
- [33] 王照, 宋喜梅, 杨倩, 等. 调控热带果树成花的因素和机理研究进展[J]. *热带亚热带植物学报*, 2025, 33(5):596-606.
- [34] Kureljušić J M, Veskovic Moracanin S M, Dukic D A, et al. Comparative study of vermicomposting: apple pomace alone and in combination with wheat straw and manure[J]. *Agronomy*, 2024, 14(6):1189.
- [35] Rutkowski K, Łysiak G P, Zydlík Z. Effect of nitrogen fertilization in the sour cherry orchard on soil enzymatic activities, microbial population, and fruit quality[J]. *Agriculture*, 2022, 12(12):2069.
- [36] Lü F L, Zheng W, Zhai B N, et al. Cover cropping and chemical fertilizer seasonally mediate microbial carbon and phosphorus metabolisms in an apple orchard: evidence from the enzymatic stoichiometry method[J]. *Applied Soil Ecology*, 2022, 178:104579.
- [37] Kai T, Adhikari D. Effect of organic and chemical fertilizer application on apple nutrient content and orchard soil condition[J]. *Agriculture*, 2021, 11(4):340.
- [38] 张迪, 邓旭, 张青, 等. 不同栽植年限、土层深度苹果梨园土壤中磷酸酶与磷素变化研究[J]. *延边大学农学学报*, 2020, 42(1):8-14.
- [39] 叶宁, 韩德峰, 戚凯铭, 等. 桃枝有机肥对桃园土壤养分及酶活性的影响[J]. *北京农学院学报*, 2025, 40(4):1-7.
- [40] 陈玲, 宋思言, 董天宇, 等. 不同光质和砧木对‘巨峰’葡萄叶片光合特性和糖、酸代谢的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2025, 48(4):802-811.
- [41] 艾伟伟, 林珊, 张月, 等. 高含量 CO₂ 对不同品种小麦光合性能的影响[J]. *江苏农业学报*, 2025, 41(2):231-241.
- [42] 韩冰, 高文瑞, 孙艳军, 等. 不同 LED 光照对番茄幼苗生理特性及定植后开花结果的影响[J]. *江苏农业学报*, 2024, 40(12):2219-2225.
- [43] 李喜梅, 赵君静, 回祎, 等. 郑州市 4 种园林树木光合特性及其影响因素研究[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2024, 48(5):105-112.
- [44] 樊小雪, 李德翠, 李远, 等. 基于 RGB 模型的草莓叶片光合作用指标估测[J]. *江苏农业学报*, 2024, 40(4):675-681.
- [45] 汤伟华, 刘叶琼, 张子楠, 等. 高产优质同源四倍体不结球白菜新材料的创制与评价[J]. *南京农业大学学报*, 2025, 48(2):312-320.
- [46] 罗春燕, 耿红凯, 王秀军, 等. NaCl 胁迫下外源水杨酸对银杏生长和光合作用的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2024, 48(6):91-101.
- [47] 姜雅轩, 孔德馨, 雷培, 等. 生物菌肥对四倍体刺槐植株生长的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2023, 43(8):27-35.
- [48] 丁守鹏, 张国新, 姚玉涛, 等. 蚯蚓粪生物炭配施对盐碱地设施番茄生长及光合作用的影响[J]. *北方园艺*, 2021(18):60-67.
- [49] Ye S L, Liu T C, Niu Y. Effects of organic fertilizer on water use, photosynthetic characteristics, and fruit quality of pear jujube in northern Shaanxi[J]. *Open Chemistry*, 2020, 18(1):537-545.

(责任编辑:石春林)