安徽农业大学学报, 2026, 53(4): 607-616
Journal of Anhui Agricultural University [DOI] 10.13610/j.cnki.1672-352x.20260910.004

贾永华，马　军，褚燕南，等. 覆膜与增施肥对宁夏引黄灌区苹果园土壤性状及‘岩富 10 号’品质的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2026, 53(4): 607-616.

Jia Yonghua, Ma Jun, Chu Yannan, et al. Effects of plastic film mulching combined with increased fertilization on soil physicochemical properties and 'Yanfu 10' fruit quality in apple orchards of the Ningxia Yellow River irrigation area[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2026, 53(4): 607-616.

覆膜与增施肥对宁夏引黄灌区苹果园土壤性状及‘岩富 10 号’品质的影响

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：【目的】改善苹果园土壤环境，提高土壤养分有效性。【方法】在苹果园设置常规施肥（CK）、单施蚯蚓肥（T1）、单施生物菌肥（T2）及二者配施（T3）4 个处理，所有处理均进行地表覆膜。于花后不同时期分层（(0，20] cm、(20，40] cm）采集土壤样品，测定土壤物理性质（含水量、容重、电导率）与化学性质（有机质、pH、全盐及速效养分），并测定成熟期苹果主要品质指标，采用 TOPSIS 法综合评价不同施肥处理对土壤理化性质及果实品质的影响。【结果】(1）各处理土壤含水量随土层加深而降低，容重则呈上升趋势；T3 处理显著提高(0，20] cm 土层的含水量（较 CK 增加 12.5%）并降低容重（降幅达 8.7%）。各处理土壤有机质、碱解氮及速效钾含量均在花后 90 d 达峰值，以 T3 处理提升效果最显著。(2）各施肥处理均显著降低土壤 pH 和全盐含量，其中 T3 处理对盐碱指标的改善效果最优。(3）T3 处理显著提高果实硬度和可溶性固形物含量，显著降低总酸含量，综合提升了果实品质。【结论】TOPSIS 综合评价表明，蚯蚓肥与生物菌肥配施可协同改善土壤理化性质、优化养分供应并提升果实品质。

关键词：蚯蚓肥；生物菌肥；理化性质；土壤养分；果实品质；TOPSIS 评价
中图分类号：S661.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672−352X (2026)04−0607−10

Effects of plastic film mulching combined with increased fertilization on soil physicochemical properties and 'Yanfu 10' fruit quality in apple orchards of the Ningxia Yellow River irrigation area

Jia Yonghua, Ma Jun, Chu Yannan, Yue Haiying, Xu Zehua, Li Xiaolong
(Institute of Horticulture, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Science, Yinchuan 750002, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to improve the soil environment and nutrient status. **[Method]** A field experiment was conducted with four treatments under surface mulching: conventional fertilization (CK), vermicompost alone (T1), biofertilizer alone (T2), and combined application of vermicompost and biofertilizer (T3). Soil samples were collected from two depths ((0,20] cm and (20,40] cm) at different stages after flowering. Soil physical properties (water content, bulk density, electrical conductivity) and chemical properties (organic matter, pH, total salt, and available nutrients) were analyzed. Key fruit quality indicators were measured at maturity, and the technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) was employed for comprehensive evaluation. **[Result]** (1) Soil water content decreased with increasing soil depth across all treatments, while bulk density increased. T3 treatment significantly increased water content in the (0,20] cm layer by 12.5% and reduced bulk density by 8.7% compared with CK. Soil organic matter, alkali-hydrolyzable nitrogen, and available potassium contents peaked at 90 days after flowering, with the most pronounced increase observed in T3. (2) All fertilization treatments significantly reduced soil pH and total salt content, with T3 showing the greatest improvement in salinity indicators. (3) T3 treatment significantly increased fruit firmness and soluble solids content, significantly reduced total acid content, and

收稿日期：2025-09-09；**录用日期：**2026-04-22；**网络出版日期：**2026-09-11
基金项目：中央财政林业科技推广示范资助项目（2023ZY06）；国家苹果产业技术体系资助项目（CARS-25）
作者简介：贾永华，副研究员，E-mail：529843423@qq.com
* **通信作者：**李晓龙，博士，副研究员，E-mail：262450313@qq.com

comprehensively improved fruit quality. **[Conclusion]** TOPSIS analysis indicated that the combined application of vermicompost and biofertilizer synergistically improves soil organic matter and optimizes nutrient supply.

Keywords: vermicompost; biofertilizer; physicochemical properties; soil nutrients; fruit quality; TOPSIS evaluation

我国西北地区是国内水资源最为匮乏的区域之一。在西北旱作农业区，土壤水分和养分含量是影响作物产量的关键因素[1]。覆膜是旱作农业区提高作物产量的一种重要技术手段，能够有效保温[2]，增加雨水入渗速率及保蓄率，改善土壤理化性质，已广泛应用于旱作农业生产中[3]。在苹果设施栽培中，大棚栽培常受早春寒潮等不利天气条件的影响[4]；覆膜可有效减轻外部环境的不利影响，改善土壤理化性质[5]，促进苹果生长。因此，本研究采用覆膜方式处理土壤。

合理施肥是保障作物高产和农业可持续发展的关键措施，其方式直接影响土壤养分迁移转化效率及作物根系对养分的吸收利用[6-7]。然而，当前农业生产中的过量施用化肥会导致土壤退化，包括土壤养分失衡、板结及酸化等[8]，同时还会降低作物的产量和品质。蚯蚓肥和生物菌肥作为新型生物改良剂，近年来在改善土壤质量和提高作物生产力方面展现出巨大潜力[9-10]。蚯蚓肥具有疏松多孔的结构并富含多种生物活性物质，能够有效降低盐碱土电导率，为盐碱地微生物提供适宜的生存环境[11-12]。生物菌肥则通过微生物的固氮和解磷作用，增加土壤中有机质含量和速效养分，将有机肥料的长效特性与化肥的速效特性相结合[13-14]。目前，这两种生物肥料在蔬菜、花卉及果树栽培中已取得显著成效[15-16]，但其在苹果生产体系中的应用研究仍较匮乏，尤其是在单施与配施的协同效应、对深层土壤理化性质的影响等方面尚缺乏系统研究。此外，现有关于土壤改良的研究多集中于耕作层（0～20 cm），而对剖面土壤有机质及养分动态变化的关注不足[17]，难以全面评估施肥后土壤的长期生态效应。因此，本研究以苹果栽培体系为对象，探究蚯蚓肥与生物菌肥单施及配施对土壤理化性质和果实品质的影响，以期为苹果园的土壤健康管理和可持续生产提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 种植地概况与试验材料

试验地位于宁夏农林科学院综合试验基地，地处宁夏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、年活动积温分别为 8.8 ℃和 3 300 ℃，年平均降水量、年平均蒸发量分别为 198 和 1 583 mm，年日照时数在 3 000 h 左右，平均无霜期为 160 d。土壤类型为淡灰钙土。基础养分条件为：pH，8.33；有机质，5.02 g·kg^{-1}；全氮，0.32 g·kg^{-1}；全磷，0.44 g·kg^{-1}；全钾，17.30 g·kg^{-1}；碱解氮，15.30 mg·kg^{-1}；速效磷，40.60 mg·kg^{-1}；速效钾，142.25 mg·kg^{-1}。

试验园主栽品种为‘岩富 10 号’（*Malus domestica* 'Yanfu 10'），基砧为‘青砧 1 号’，树龄 5 年，株行距为 1.5 m×4.0 m，试验园面积为 2 hm^2。2023 年秋季（10 月 1 日至 10 月 10 日）开沟深施基肥，沟深为 40 cm，混施有机肥（牛粪 3 m^3·667 m^{-2}+玉米芯 2 m^3·667 m^{-2}），供水模式为滴灌。

1.2 试验设计

2024 年 3 月 25 日（土壤返潮期）开始行内施肥处理。试验地设置 4 个区域，分别对应 4 个处理：T1 为单施蚯蚓肥；T2 为单施生物菌肥（枯草芽孢杆菌）；T3 为蚯蚓肥与生物菌肥配施；CK 为常规施肥（仅基肥）。基肥为牛粪 3 m^3·667 m^{-2}+玉米芯 2 m^3·667 m^{-2}。T1 处理蚯蚓肥按 1 t·667 m^{-2} 的用量均匀施入；T2 处理枯草芽孢杆菌菌肥按 15 L·667 m^{-2} 的用量喷施；T3 处理参考马凤捷等[18]的研究，按 3 倍于 T1 的蚯蚓肥与生物菌肥配施，即蚯蚓肥 3 t·667 m^{-2} 与枯草芽孢杆菌菌肥 15 L·667 m^{-2} 混合施用。各处理均施肥 3 行，总面积均为 600 m^2，采用随机区组排列。每行撒肥长度为 80 cm，于行内树下地表撒施，待全部撒施完成后覆盖园艺地布。蚯蚓肥来源于吴忠市绿谷源家庭农场，基本理化性质为：有机质含量，45%；全氮含量，9.91 g·kg^{-1}；全磷含量，4.75 g·kg^{-1}；全钾含量，12.5 g·kg^{-1}；pH 值，7.46；全盐含量，2.75 g·kg^{-1}。枯草芽孢杆菌购于潍坊益昊生物技术有限公司，有效活菌数 10^{11} 个·g^{-1}，按 40 g 配置母液。

1.3 样品采集

从花后 30 d（5 月 20 日）开始，每隔 30 d 取样 1 次，至成熟期（10 月底）结束，共取样 6 次（花后 30、60、90、120、150 和 180 d）。使用直径 7 cm 的土壤螺旋钻，采用对角线五点法对每个处理的(0，20] cm 和 (20，40] cm 土层进行采样（在“X”形对角线的两端各选 1 个点，交叉点选 1 个点，共 5 个点）；CK 处理则在行内裸露土壤处采样。将同一土层 5 个采样点的土壤混合均匀作为 1 个混合样，去除植物根系、石块等杂物后，共获得 72 个土壤样

品（3 个区域×4 个处理×3 次重复×2 个土层）。所有土壤样品经风干后分别过 2 mm 和 0.149 mm 筛，用于土壤理化性质测定。

1.4　样品测定

参考杨克明[14]和马凤捷[18]等方法测定指标：采用烘干法测定土壤含水量；采用环刀法测定容重；采用电位法测定 pH；采用电导法测定全盐含量；采用重铬酸钾外加热法测定有机质含量；采用碱解扩散法测定碱解氮含量；采用 $NaHCO_3$ 浸提-钼锑抗比色法测定速效磷含量；采用 NH_4OAC 浸提-火焰光度计法测定速效钾含量。从每个处理中随机选取 30 个果实，用于品质指标的测定：用电子天平称量单果质量；用 GY-1 型硬度计测定果实硬度；用手持折光仪测定可溶性固形物含量；采用 NaOH 滴定法测定总酸含量；固酸比为可溶性固形物含量与总酸含量的比值。

1.5　数据处理

试验所得数据采用 SPSS 18.0 统计软件进行差异显著性分析，不同处理间的多重比较采用 Duncan 新复极差法，利用 GraphPad Prism 作图。采用 Pearson 相关分析探究土壤理化性质与果实品质之间的关系。采用 TOPSIS 法[19] 对不同处理土壤理化性质及果实品质进行综合评价。

2　结果与分析

2.1　不同处理对土壤物理性质的影响

对土壤物理性质的检测结果（表 1 和表 2）显示：(0，20] cm 土层各项物理指标均高于(20，40] cm 土层。各处理土壤含水量在不同土层均呈先升后降趋势，于花后 90 d 达到峰值。在(0，20] cm 土层，花后 90 d 的 CK、T1、T2、T3 处理的土壤含水量较花后 30 d 分别上升了 39.58%、52.33%、48.72%和 61.23%；在(20，40] cm 土层分别上升 32.10%、44.83%、38.60%和 55.50%。土壤容重变化趋势与含水量相反，同期(0，20] cm 土层 CK、T1、T2、T3 处理的土壤容重较花后 30 d 分别下降了 5.71%、

表 1　(0，20] cm 土层不同处理土壤的物理性质

Table 1　Soil physical properties under different treatments in the (0,20] cm soil layer

处理	采样时间	含水量/%	容重/（$g\cdot cm^{-3}$）	电导率/（$\mu S\cdot cm^{-1}$）
CK	花后 30 d	9.29±0.68^{bc}	0.90±0.01^{ab}	327.67±4.26^{a}
	花后 60 d	12.83±0.24^{a}	0.88±0.01^{b}	322.67±3.28^{a}
	花后 90 d	12.97±0.67^{a}	0.85±0.05^{b}	291.00±2.89^{b}
	花后 120 d	12.48±0.59^{a}	0.89±0.01^{b}	287.67±1.86^{b}
	花后 150 d	10.74±0.57^{b}	0.90±0.02^{ab}	285.60±5.34^{b}
	花后 180 d	8.40±0.47^{c}	0.98±0.02^{a}	284.60±5.51^{b}
T1	花后 30 d	11.64±0.55^{bc}	0.88±0.01^{b}	304.00±3.21^{a}
	花后 60 d	16.90±0.18^{a}	0.84±0.01^{b}	292.67±5.55^{a}
	花后 90 d	17.74±0.57^{a}	0.78±0.03^{c}	256.37±3.85^{b}
	花后 120 d	13.72±0.80^{b}	0.86±0.01^{b}	249.80±4.18^{bc}
	花后 150 d	12.09±0.73^{bc}	0.86±0.03^{b}	238.33±4.91^{cd}
	花后 180 d	10.80±0.90^{c}	0.94±0.02^{a}	231.20±3.63^{d}
T2	花后 30 d	11.68±0.51^{c}	0.86±0.01^{b}	302.67±4.67^{a}
	花后 60 d	17.14±0.49^{a}	0.78±0.01^{c}	301.33±4.10^{a}
	花后 90 d	17.37±0.56^{a}	0.76±0.03^{c}	243.83±5.02^{b}
	花后 120 d	14.28±0.38^{b}	0.87±0.02^{b}	242.67±7.31^{b}
	花后 150 d	11.58±0.27^{c}	0.85±0.02^{b}	240.77±3.56^{bc}
	花后 180 d	9.94±0.47^{d}	0.94±0.01^{a}	226.77±1.84^{c}
T3	花后 30 d	13.36±0.67^{c}	0.86±0.03^{b}	289.33±4.48^{a}
	花后 60 d	22.40±0.34^{a}	0.78±0.01^{cd}	284.67±6.74^{a}
	花后 90 d	21.54±0.92^{a}	0.75±0.03^{d}	225.67±4.10^{bc}
	花后 120 d	17.27±0.81^{b}	0.81±0.02^{bc}	236.33±5.81^{b}
	花后 150 d	13.73±0.43^{c}	0.84±0.01^{bc}	217.13±4.47^{c}
	花后 180 d	11.74±0.61^{c}	0.94±0.01^{a}	214.73±3.32^{c}

注：同一列数据后不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著（$P<0.05$）。

11.90%、11.15%和 13.64%；(20，40] cm 土层 T1、T2、T3 处理分别下降了 11.73%、10.51%和 12.59%，CK 无显著差异。土壤电导率整体呈下降趋势，于花后 180 d 降至最低。(0，20] cm 土层 CK、T1、T2、T3 处理的土壤电导率较花后 30 d 分别下降了 13.14%、23.95%、25.08%和 25.78%；(20，40] cm 土层分别下降了 11.23%、19.84%、18.79%和 23.15%。T1、T2、T3 处理下的各指标较 CK 均有差异，其中以 T3 差异最为显著。所有指标在(20，40] cm 土层的变化幅度均低于(0，20] cm 土层，表明随土层加深，施肥对土壤物理性质的影响逐渐减弱。

表 2 (20，40] cm 土层不同处理的土壤物理性质

Table 2 Soil physical properties under different treatments in the (20,40] cm soil layer

处理	采样时间	含水量/%	容重/（g·cm^{-3}）	电导率/（μS·cm^{-1}）
CK	花后 30 d	8.26±0.62^{b}	1.03±0.04^{ab}	302.00±5.51^{a}
	花后 60 d	8.41±0.29^{b}	0.98±0.00^{b}	301.33±4.06^{a}
	花后 90 d	10.92±0.47^{a}	0.98±0.01^{b}	278.33±4.26^{b}
	花后 120 d	11.09±0.58^{a}	0.96±0.01^{b}	274.00±4.36^{b}
	花后 150 d	8.33±0.55^{b}	0.95±0.01^{b}	270.97±3.47^{b}
	花后 180 d	7.46±0.73^{b}	1.08±0.06^{a}	268.10±6.00^{b}
T1	花后 30 d	10.08±0.54^{c}	1.06±0.03^{ab}	286.33±5.46^{a}
	花后 60 d	13.50±0.41^{b}	0.97±0.02^{bc}	274.67±4.81^{a}
	花后 90 d	15.65±0.76^{a}	0.93±0.00^{c}	233.00±8.08^{b}
	花后 120 d	13.16±0.59^{b}	0.93±0.01^{c}	224.33±4.33^{b}
	花后 150 d	11.47±0.38^{c}	0.98±0.01^{bc}	220.70±5.07^{b}
	花后 180 d	10.46±0.33^{c}	1.14±0.06^{a}	220.17±2.46^{b}
T2	花后 30 d	10.31±0.55^{b}	0.94±0.01^{b}	282.67±4.37^{a}
	花后 60 d	15.30±0.40^{a}	0.88±0.01^{bc}	275.83±3.44^{a}
	花后 90 d	14.29±0.36^{a}	0.84±0.02^{c}	235.67±6.67^{b}
	花后 120 d	10.21±0.21^{b}	0.88±0.02^{bc}	230.20±3.80^{b}
	花后 150 d	9.64±0.39^{b}	0.90±0.02^{bc}	228.60±2.30^{b}
	花后 180 d	10.25±0.63^{b}	1.03±0.06^{a}	224.00±3.21^{b}
T3	花后 30 d	11.96±0.51^{c}	0.94±0.02^{b}	255.83±4.76^{a}
	花后 60 d	18.03±0.73^{a}	0.85±0.00^{c}	254.83±2.62^{a}
	花后 90 d	18.18±0.42^{a}	0.82±0.01^{c}	226.67±6.96^{b}
	花后 120 d	15.20±0.15^{b}	0.85±0.00^{c}	219.70±2.36^{b}
	花后 150 d	10.89±0.69^{cd}	0.88±0.01^{bc}	203.83±4.64^{c}
	花后 180 d	10.04±0.12^{d}	1.08±0.06^{a}	195.83±3.37^{c}

注：同一列数据后不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著（P<0.05）。

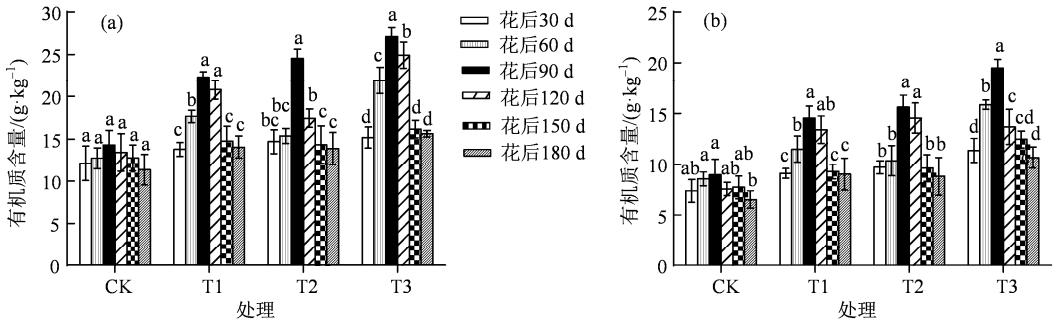
2.2 不同处理对土壤化学性质的影响

土壤有机质含量如图 1 所示。与常规施肥相比，各处理均能提高土壤有机质含量，且所有处理(0，20] cm 土层的有机质含量总体高于(20，40] cm 土层。在(0，20] cm 土层，花后 90 d 时，T1、T2、T3 处理的土壤有机质含量较花后 30 d 分别增加 61.50%、66.88%和 78.51%；在(20，40] cm 土层，各处理分别增加 59.55%、60.47%和 71.12%。CK 处理两个土层的土壤有机质含量均无显著变化。这表明施肥处理对土壤有机质含量的影响随土层深度增加而减弱。

土壤全盐含量测定结果（图2）显示，(0，20] cm 土层的全盐含量总体低于(20，40] cm 土层，且各处理全盐含量均呈下降趋势。在(0，20] cm 土层，花后 180 d 的 CK、T1、T2、T3 处理的土壤全盐含量较花后 30 d 分别下降了 49.41%、67.31%、59.43%和 69.01%；在(20，40] cm 土层，各处理全盐含量分别下降 37.44%、49.46%、45.35%和 51.75%。这表明随着土壤深度增加，施肥处理对土壤全盐含量的影响逐渐减弱，表层土壤的脱盐效率普遍高于深层土壤，其中 T3 处理在两个土层中均表现出最高的脱盐率。

土壤碱解氮含量测定结果（图 3）显示，不同施肥处理影响了土壤中碱解氮的含量。所有处理(0，

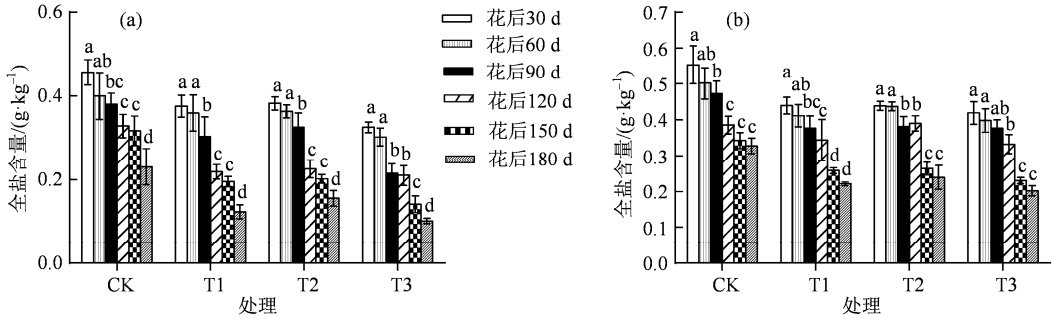
20] cm 土层碱解氮含量总体高于(20，40] cm 土层，且(0，20] cm 土层碱解氮含量在不同处理下均呈现先升后降的趋势。在(0，20] cm 土层，花后 90 d CK、T1、T2、T3 处理的土壤碱解氮含量较花后 30 d 分别上升了 40.49%、43.09%、52.04%和 58.56%；在(20，40] cm 土层，各处理碱解氮含量较花后 30 d 分别上升了 25.94%、24.53%、26.26%和 30.97%。



(a) (0，20] cm 土层；(b) (20，40] cm 土层。图中不同小写字母表示差异显著（$P < 0.05$）。

图 1　不同处理下土壤有机质含量

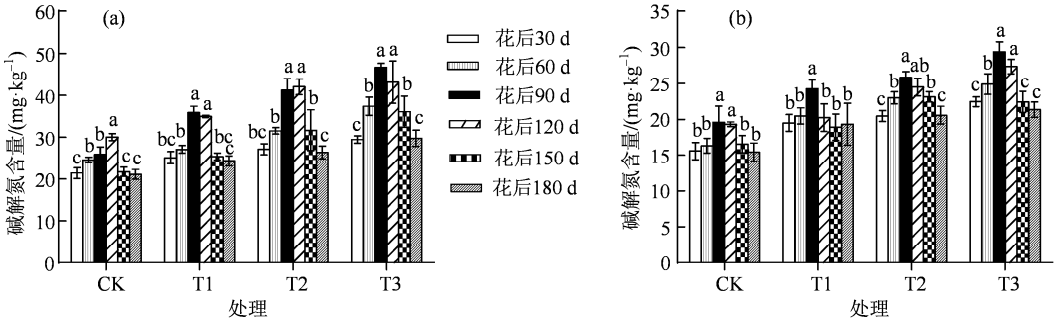
Figure 1　Organic matter contents in soils under different treatments



(a) (0，20] cm 土层；(b) (20，40] cm 土层。图中不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

图 2　不同处理下土壤全盐含量

Figure 2　Total salt contents in soils under different treatments



(a) (0，20] cm 土层；(b) (20，40] cm 土层。图中不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

图 3　不同处理下土壤碱解氮含量

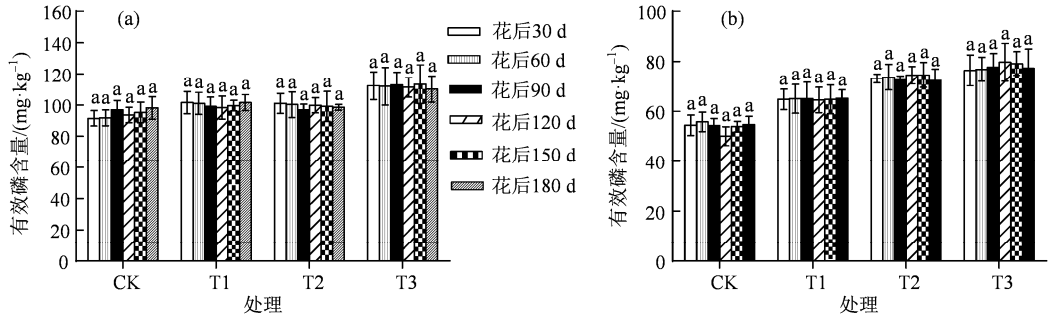
Figure 3　Contents of alkali-hydrolyzable nitrogen in soils under different treatments

土壤有效磷含量测定结果（图 4）显示，(0，20] cm 土层的有效磷含量总体高于(20，40] cm 土层；所有处理在花后不同时期的有效磷含量均无显著差异，但在各土层中，CK 处理的有效磷含量均低于其他施肥处理。这表明不同施肥处理对土壤有效磷含量的提升效果随土层深度增加而减弱，但对有效磷的影响小于对碱解氮的影响。

土壤速效钾含量测定结果（图 5）显示：在(0，20] cm 土层，花后 90 d 的 CK、T2、T3 处理的土壤速效钾含量较花后 30 d 分别上升了 9.61%、12.43%和 13.31%，T1 处理则无显著差异；在(20，40] cm 土层，花后 90 d 的 T2、T3 处理土壤速效钾含量较花后 30 d 分别上升了 8.42%和 10.91%，CK 和 T1 处理无显著差异。结果表明，各处理(0，20] cm 土层土壤速效钾含量均高于(20，40] cm 土层，且随生育期推进，呈上升趋势，其中 T2 与 T3 处理的提升

效果最为显著。

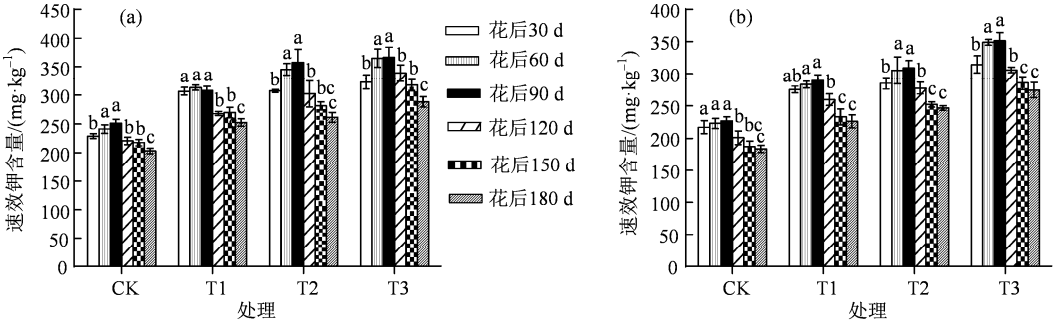
土壤 pH 测定结果（图 6）显示，不同土层间 pH 值无明显差异，所有处理在花后不同时间的 pH 值均呈现先降低后升高的趋势。在(0，20] cm 土层，花后 90 d 时，CK、T1、T2、T3 处理的土壤 pH 值较花后 30 d 分别下降 5.19%、5.94%、5.61%和 6.64%；在(20，40] cm 土层，花后 60 d 时，CK、T1、T2、T3 处理的土壤 pH 值较花后 30 d 分别下降 4.87%、5.86%、5.58%和 6.54%。所有处理在(20，40] cm 土层的土壤 pH 变化幅度均低于(0，20] cm 土层，表明施肥对土壤 pH 的影响随土层加深而逐渐减弱。



(a) (0，20] cm 土层；(b) (20，40] cm 土层。图中相同小写字母表示差异不显著（P>0.05）。

图 4 不同处理下土壤有效磷含量

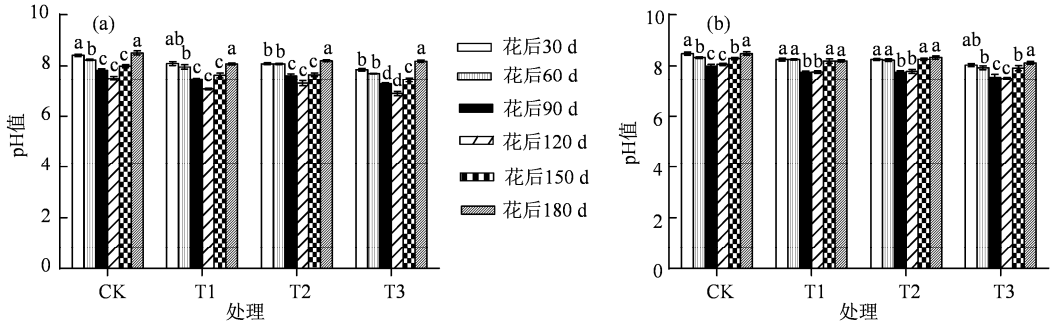
Figure 4 Available phosphorus contents in soils under different treatments



(a) (0，20] cm 土层；(b) (20，40] cm 土层。图中不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

图 5 不同处理下土壤速效钾含量

Figure 5 Available potassium contents in soils under different treatments



(a) (0，20] cm 土层；(b) (20，40] cm 土层。图中不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

图 6 不同处理下土壤的 pH 值

Figure 6 Soil pH values under different treatments

2.3 不同处理对果实品质的影响

由表 3 可知，T3 处理下的果形指数最高，显著高于其他处理，较 CK 处理升高了 2.38%。单果质量呈现相似趋势，T2 处理最低，T3 处理最高且显著高于其他处理，较 CK 处理增加 3.07%。果实硬度和可溶性固形物含量变化趋势一致，均在 T3 处理下达到最高值，在 CK 处理下达到最低值；T3 处理下的果实硬度和可溶性固形物含量较 CK 处理分别增加了 17.53%和 28.57%。总酸含量与上述指标呈相反趋势，在 T3 处理下达到最低值，较 CK 处理下降了 18.18%。可溶性固形物含量和总酸含量的变化与固酸比的变化趋势相呼应，T3 处理下固酸比最

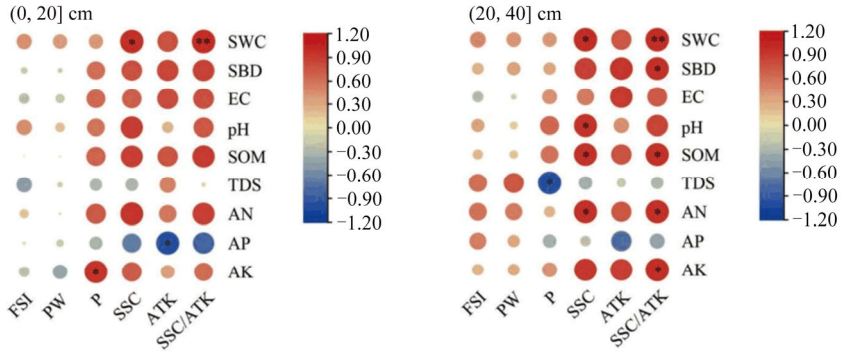
高，显著高于其他处理，较 CK 处理升高了 40.91%。结果表明，T3 施肥模式对苹果品质的改善效果较为全面，不仅显著提高了单果重、可溶性固形物含量和固酸比，还降低了总酸含量并增强了果实硬度。

表 3　不同施肥处理对苹果品质的影响

Table 3　Effects of different fertilization patterns on apple quality

处理	果形指数	单果质量/g	硬度（kg·cm^{-2}）	可溶性固形物/%	总酸/%	固酸比
CK	0.84±0.00^{b}	184.34±1.57^{b}	2.91±0.01^{c}	14.06±0.01^{c}	0.33±0.01^{a}	0.44±0.02^{c}
T1	0.82±0.01^{bc}	185.07±0.95^{b}	3.16±0.07^{b}	15.12±0.01^{bc}	0.28±0.02^{bc}	0.51±0.01^{b}
T2	0.81±0.00^{c}	179.36±2.20^{c}	3.25±0.05^{b}	16.73±0.01^{ab}	0.31±0.01^{ab}	0.52±0.01^{b}
T3	0.86±0.01^{a}	190.90±0.95^{a}	3.42±0.04^{a}	18.04±0.01^{a}	0.27±0.01^{c}	0.62±0.02^{a}

注：同一列数据后不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著(P<0.05)。



SWC=土壤含水量；SBD=土壤容重；EC=电导率；SOM=有机质；TDS=全盐量；AN=碱解氮；AP=有效磷；AK=速效钾；FSI=果形指数；PW=单果质量；P=硬度；SSC=可溶性固形物含量；ATK=总酸含量；SSC/ATK=固酸比。

图 7　土壤理化性质与果实品质的相关性分析

Figure 7　Correlation analysis between soil physicochemical properties and fruit quality

表 4　(0，20] cm 土层不同处理下 TOPSIS 法评价结果及排序

Table 4　Evaluation results and ranking of the TOPSIS method under different treatments at (0,20] cm

处理	D+	D-	C	排序
CK	0.947	0.385	0.289	4
T1	0.601	0.577	0.490	3
T2	0.378	0.786	0.676	2
T3	0.389	0.919	0.702	1

表 5　(20，40] cm 土层不同处理下 TOPSIS 法评价结果及排序

Table 5 Evaluation results and ranking of the TOPSIS method under different treatments at (20,40] cm depth

处理	D+	D-	C	排序
CK	0.910	0.723	0.443	3
T1	0.869	0.503	0.367	4
T2	0.657	0.573	0.466	2
T3	0.349	0.970	0.735	1

2.4　土壤理化性质与果实品质的相关性分析

由图 7 相关性分析可知，在两个土层中，土壤含水量与可溶性固形物、固酸比均呈显著正相关；在(20，40] cm 土层中，土壤容重与固酸比呈显著正相关，pH 值与可溶性固形物呈显著正相关。同时，随着土层加深，果实品质对土壤化学性质的响应增强。深层土壤中，有机质、碱解氮与可溶性固形物、固酸比呈显著正相关，全盐含量与果实硬度呈显著负相关。综上所述，不同施肥处理均能改变土壤理化特性，并显著影响果实品质指标。

2.5　TOPSIS 综合评价

TOPSIS 法根据评价对象与正、负理想解的距离进行排序。表 4 和表 5 中 D+和 D-分别表示评价对象与正、负理想解的距离，C 表示评价对象与最优方案的相对接近度，据此得出相对优劣评价结果。本研究选取(0，20] cm 和(20，40] cm 土层土壤理化指标（含水量、容重、电导率、pH 值、有机质、全盐、碱解氮、有效磷、速效钾）及果实品质指标（果形指数、单果质量、果实硬度、可溶性固形物、总酸、固酸比）进行 TOPSIS 综合评价。结果（表 4、表 5）显示：在(0，20] cm 土层，T3 处理的 C 值最高，CK 处理最低；在(20，40] cm 土层，T3 处理的 C 值最高，T1 处理最低。结果表明，同时施用蚯蚓肥和生物菌肥最有利于改善苹果生长状况，其综合评价最优。

3　讨论

3.1　不同处理对土壤物理性质的影响

土壤含水量和容重是反映土壤质量、密度和透水性等性质的重要指标[20]。通常土壤孔隙度越高，

其容重越低，透气性和保水能力则越强。土壤含水量受孔隙状况影响显著，但并非与容重呈简单的负相关关系[21]。覆盖地膜可以通过减少作物生长期间水分的无效蒸发，提升作物的水分利用效率，增强土壤的持水能力[22]。本研究中各处理土壤含水量随土层深度的增加而降低，土壤容重随土层深度增加而升高。这可能是因为表层土壤常受整地等措施影响，结构较为疏松，孔隙度较大，尽管蒸发量较大，但持水性能仍优于下层土壤，这与刘蓓青等[23]在陕南核桃园土壤理化性质研究中的结果一致。土壤容重降低可增加土壤孔隙度。覆膜处理下的土壤电导率通常低于露地处理。随着作物生长耗水以及部分盐分随水分蒸发向表层聚集[24]，土壤电导率随土层深度增加而降低，即表层土壤具有较高电导率，这与本文研究结果一致。土壤容重与电导率的季节性动态共同揭示了区域水盐运移规律。本研究中，土壤容重在花后的 60～90 d（雨季）降至最低，而电导率呈现“表聚性”并随生育期整体下降，这印证了宁夏灌区干湿交替主导水盐动态的核心特征[25-26]。该结果与樊会敏等[27]的研究一致：土壤水分变化直接影响盐分迁移，夏季高温时期，土壤盐分随水分蒸发向上迁移，“水去盐留”，导致深层土壤电导率下降。这种“以结构改良调控水盐”的机制，与叶静等[28]在滨海盐碱地通过改良剂调节孔隙来控制盐的研究思路相呼应，共同强调了物理改良在盐碱地治理中的作用。

3.2 不同处理对土壤化学性质的影响

土壤有机质含量通常呈现季节性波动，夏季含量相对高于其他季节。这与植物生长周期密切相关：春夏季植物生长旺盛，产生大量有机物质，增加了土壤有机质的输入[29]。本研究中，不同处理下各土层有机质含量均呈现先升后降的季节动态，且表层土壤有机质含量较高；碱解氮和速效钾含量随有机质含量变化呈相同趋势，而有效磷含量相对稳定，未出现大幅波动。这可能是因为外源有机物质的输入为功能微生物提供了充足基质，促进了养分矿化；同时，深层土壤受人为耕作影响较小，外源有机物质难以向下迁移[30]。土壤有机质周转是驱动氮、钾有效性的核心过程[31]，外源有机物能更高效地驱动有机质矿化，这也解释了碱解氮与速效钾含量为何呈现与有机质同步的季节性峰值。有效磷含量虽无显著时间动态差异，但各施肥处理在不同土层的含量均稳定高于 CK，表明施肥对土壤磷库具有持续补给作用[32]。本研究中单施生物有机肥均能显著提升土壤有机质与速效养分含量，这与司海丽等在宁夏盐碱地施用生物有机肥显著提高土壤碱解氮、速效钾及微生物生物量碳氮的研究结论高度吻合[33]，共同印证了生物有机肥在宁夏盐碱区提升土壤肥力的普遍有效性。

宁夏属于典型的干旱半干旱地区，盐碱地一直是阻碍当地农业发展的重要因素，改良和利用盐碱地对解决宁夏农业问题具有重要意义。盐碱土壤改良的关键是减少土壤交换性钠、降低土壤 pH 值并改善土壤结构[34]。覆膜可以提高土壤温度，增强微生物呼吸作用，增加土壤 CO_2 浓度，从而降低土壤 pH 值；施肥则会降低土壤酸碱缓冲能力[35]。本研究表明，施肥显著降低了土壤 pH 值和全盐含量；随着土层加深，pH 值呈增加趋势，这可能是受作物根系生长过程中分泌有机酸的影响[36]，导致深层土壤酸化程度相对较轻。刘政典[37]在新疆阿克苏苹果园的研究结果表明，施用生物有机肥能显著提升土壤碱解氮、速效磷和速效钾含量，这从跨区域角度验证了生物有机肥在提升盐碱地土壤养分方面的稳健效果。本研究进一步证实了有机-生物肥配施的协同改良效应，为盐碱地苹果园土壤理化性质调控提供了新的技术路径。

3.3 田间施肥方案选择

有研究表明，可通过施用蚯蚓肥来提高土壤养分利用率和保水性，改善土壤结构及微生物活性，显著缓解盐胁迫并促进植物生长[38]。本研究中，T1 处理较 CK 处理显著降低了土壤全盐含量和 pH 值，缓解了盐胁迫的负面影响。生物菌肥可增加土壤有益微生物丰度，从而提高土壤速效养分含量并增加土壤有机质[39]。施加不同配比的生物菌肥均能显著提高各土层土壤有机质和速效养分含量[40-41]。本研究中，T2 处理较 CK 处理显著增加了土壤有机质和速效养分含量，且在花后 60 d 大幅上升，这可能是由于温度升高促进了微生物活动，加速了养分的分解释放[42]。以往研究表明，与不施肥或单施化肥相比，化肥配施有机肥更能提高土壤速效磷含量[43]；无机肥与粪肥配施可为番茄生长提供适宜的土壤 pH 值[44]。本研究也得到了类似结果：不同处理下土壤 pH 值表现为 CK>T2>T1>T3，有机质含量表现为 T3>T2>T1>CK；T3 处理下碱解氮、有效磷和速效钾含量的变化更为显著。这表明蚯蚓肥与生物菌肥配施可增加土壤有机质含量，提供更多养分，从而改善土壤理化性质。

3.4 不同处理对果实品质的影响

果实品质是衡量苹果经济价值的重要指标。本研究中，T3 处理在果形指数、单果质量、硬度、可

溶性固形物含量及固酸比等关键品质指标上均显著优于其他处理。生物菌肥中的解磷解钾菌等微生物可活化土壤中难溶性磷钾[45]，为果实发育提供充足的矿质营养，进而提高单果质量和硬度；同时，果实硬度与可溶性固形物含量的同步提升表明 T3 处理促进了光合同化物向果实的转运与积累。已有研究表明，施用蚯蚓粪[46]和生物菌肥[47]均能不同程度地提高果实可溶性固形物含量和固酸比，降低总酸含量，从而改善果实风味品质。T3 处理对苹果品质指标的综合改善效果优于单施处理，这表明有机-生物肥配施模式可能通过优化根际微环境，增强果树对养分的吸收利用效率[48]，促进根系发育与养分高效吸收同化，最终实现果实品质的全面提升。

4　结论

本研究中，不同施肥处理均不同程度地影响了土壤理化性质和果实品质。施用蚯蚓肥能够有效缓解土壤盐胁迫，施用生物菌肥能够提高土壤养分含量；蚯蚓肥与生物菌肥配施显著提高了土壤含水量、有机质含量和养分含量，并降低了土壤容重、pH 值和全盐含量，对土壤结构和果实品质的改善效果最佳。相关性分析及 TOPSIS 综合评价结果进一步表明，蚯蚓肥与生物菌肥配施的综合效果最优。本研究证实，在宁夏盐碱地环境下，采用有机物料（蚯蚓肥）与功能微生物（生物菌肥）相结合的施肥策略，不仅能同步改善土壤理化性质，还能全面提升果实品质，是实现土壤健康维护与果实优质生产的可行栽培模式，可为宁夏盐碱地苹果园土壤改良与精准施肥提供参考。

参考文献：

[1] 张振龙, 孙慧, 苏洋, 等. 中国西北干旱地区水资源利用效率及其影响因素[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(11): 961-967.

[2] 何自涵, 蒲全明, 雍磊, 等. 覆膜对西南紫土区黄瓜早春栽培土壤水热效应及产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2025(3): 195-202.

[3] Liu C A, Jin S L, Zhou L M, et al. Effects of plastic film mulch and tillage on maize productivity and soil parameters[J]. Eur J Agron, 2009, 31(4): 241-249.

[4] 张笑艳, 刘海茹, 刘艳, 等. 陕西渭南市双膜葡萄设施栽培要点[J]. 农业工程技术, 2020, 40(8): 79.

[5] 郭冲, 曾淑华, 刘雅洁, 等. 烤烟全生育期覆膜栽培对植烟土壤理化性质及细菌群落结构的影响[J]. 广东农业科学, 2023, 50(8): 21-30.

[6] Nkebiwe P M, Weinmann M, Bar-Tal A, et al. Fertilizer placement to improve crop nutrient acquisition and yield: a review and meta-analysis[J]. Field Crops Res, 2016, 196: 389-401.

[7] 高延庆, 李晓艳, 孙溪唯, 等. 不同施肥方式对玉米农艺性状及产量的影响[J]. 现代农业科技, 2025(12): 19-21.

[8] 卢一叶, 李金礼, 区灿松, 等. 不同施肥方式对六堡茶品质及茶园土壤质量的影响[J]. 安徽农学通报, 2025, 31(14): 28-32.

[9] 苏利荣, 曾成城, 何铁光, 等. 不同含水量蚯蚓粪基质性质及其对番茄幼苗生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(10): 275-279.

[10] 赵玉鹏, 王治国, 付彦博, 等. 不同有机物料对南疆黏质土壤化学性质及微生物数量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2025, 53(3): 93-101.

[11] 赵明雨, 刘派, 姚名泽, 等. 蚯蚓粪肥对土壤环境及作物生长影响的研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2023, 54(7): 91-98.

[12] 符琼, 周文化, 张家铭, 等. 蚯蚓粪处理对阳光玫瑰葡萄贮藏品质的影响[J]. 农产品加工, 2024(7): 28-32.

[13] 崔佳, 崔莹, 张晓红, 等. 生物菌肥配施土壤调理剂对连作番茄产量及土壤微生态的影响[J]. 北方园艺, 2025(10): 103-110.

[14] 杨克明, 刘国宏, 胡西旦·买买提, 等. 生物菌肥对甜瓜不同质地土壤养分淋失的影响[J]. 中国瓜菜, 2025, 38(6): 120-129.

[15] 王佳, 李明聪. 微生物菌肥在植物减肥增效中的应用研究进展: 以果树为例[J]. 微生物学通报, 2024, 51(11): 4394-4415.

[16] 李治锋, 何瑞, 王倩, 等. 基于蚯蚓粪的栽培基质对酿酒葡萄苗木生长发育的影响[J]. 西北园艺, 2025(6): 47-51.

[17] 郝翔翔, 邹文秀, 韩晓增. 长期不同利用方式对黑土剖面中有机质化学组成的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(5): 1228-1237.

[18] 马凤捷, 杨春胤, 王振龙, 等. 蚯蚓粪与微生物菌剂配施对蜜瓜土壤理化性质及微生物群落的影响[J]. 中国瓜菜, 2025, 38(12): 77-87.

[19] Ranganath N, Sarkar D, Patel P, et al. Application of fuzzy TOPSIS method for risk evaluation in development and implementation of solar park in India[J]. Int J Constr Manag, 2022, 22(14): 2764-2774.

[20] 高日平, 赵沛义, 刘小月, 等. 长期施肥对农牧交错带栗钙土土壤理化性质及生物学特性的影响[J]. 生态学杂志, 2023, 42(3): 552-560.

[21] 李富, 刘方田, 郑大劲, 等. 玉米秸秆还田对冻融期土壤理化性质的影响[J]. 农业与技术, 2025, 45(13): 87-94.

[22] 张丽光, 杨亚星, 范雅琦, 等. 不同覆膜方式对旱作玉米产量与土壤理化性质的影响[J]. 山西农业科学, 2025, 53(4): 11-19.

[23] 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.

[24] 杨红, 徐唱唱, 赛曼, 等. 不同土地利用方式对土壤含水量、pH 值及电导率的影响[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(11): 1922-1927.

[25] 刘小梅, 吕殿青. 土壤容重对红壤坡地降雨侵蚀和入渗的影响[J]. 长沙大学学报, 2013, 27(2): 13-15.
[26] 郭李娜, 樊贵盛. 旱作农田土壤表层容重年内变化特性的试验研究[J]. 节水灌溉, 2018(1): 19-23.
[27] 樊会敏, 张蓉蓉, 许明祥, 等. 渭北地区土壤剖面电导率年内动态变化及影响因素[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(8): 107-115.
[28] 叶静, 陈影, 屈爽, 等. 不同微生物菌肥对滨海盐渍土土壤质量及玉米产量的影响[J]. 环境科学, 2024, 45(7): 4279-4292.
[29] 张秀, 赵永存, 谢恩泽, 等. 土壤有机碳时空变化研究进展与展望[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 673-679.
[30] 胡瑞芝, 王书伟, 林静慧, 等. 湖南省典型农田土壤养分现状及近 30 年变化趋势[J]. 土壤, 2013, 45(4): 585-590.
[31] 刘学彤, 郑春莲, 曹薇, 等. 长期定位施肥对土壤有机质、不同形态氮含量及作物产量的影响[J]. 作物杂志, 2021(4): 130-135.
[32] 周启运, 郑重谊, 荊永锋, 等. 湘南稻作烟区不同土层土壤有机质含量与氮磷钾关系研究[J]. 作物杂志, 2021(5): 114-119.
[33] 司海丽, 纪立东, 李磊, 等. 生物有机肥对宁夏盐碱地土壤养分和生物学特性的影响[J]. 土壤, 2022, 54(6): 1124-1131.
[34] Teixeira L A J, Natale W, Bettiol Neto J E, et al. Nitrogênio e potássio em bananeira via fertirrigação e adubação convencional-atributos químicos do solo[J]. Rev Bras Frutic, 2007, 29(1): 143-152.
[35] Haynes R J, Zhou Y F. Competitive and noncompetitive adsorption of silicate and phosphate by two acid Si-deficient soils and their effects on P and Si extractability[J]. Soil Sci Plant Nutr, 2018, 64(4): 535-541.
[36] 刘永红, 马舒威, 岳霞丽, 等. 土壤环境中的小分子有机酸及其环境效应[J]. 华中农业大学学报, 2014, 33(2): 133-138.
[37] 刘政典. HPS 微生物菌肥对阿克苏地区苹果园土壤及果实品质的影响[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2022.
[38] Liu X Y, Zhang L. The effectiveness of composted green waste amended with vermiculite and humic acid powders as an alternative cultivation substrate for cornflower cultivation[J]. Commun Soil Sci Plant Anal, 2021, 52(22): 2945-2957.
[39] Dębska B, Długosz J, Piotrowska-Długosz A, et al. The impact of a bio-fertilizer on the soil organic matter status and carbon sequestration: results from a field-scale study[J]. J Soils Sediments, 2016, 16(10): 2335-2343.
[40] 刘浩杨, 孙俊盼, 吴翠云, 等. 不同肥料配施生物菌肥对骏枣生长和土壤养分的影响[J]. 绿色科技, 2025, 27(7): 70-75.
[41] 陈哲, 赵永锋, 张建嶺. 长期施用复合微生物肥对农田土壤速效养分的影响[J]. 现代农业科技, 2014(19): 241,245.
[42] 王梦雅, 符云鹏, 贾辉, 等. 不同菌肥对土壤养分、酶活性和微生物功能多样性的影响[J]. 中国烟草科学, 2018, 39(1): 57-63.
[43] 王娟娟, 朱紫娟, 钱晓晴, 等. 减施化肥与不同有机肥配施对稻季土壤细菌群落结构的影响[J]. 土壤, 2021, 53(5): 983-990.
[44] 杨程, 刘秋香. 有机无机肥配施对土壤理化性质和番茄生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(6): 256-258.
[45] 罗娜, 周德明, 徐睿, 等. 降香黄檀、檀香根际解钾菌的筛选与活性研究[J]. 热带作物学报, 2016, 37(5): 964-970.
[46] 李百云, 许泽华, 郭鑫年, 等. 不同土壤改良措施对富士苹果生长、果实品质和土壤肥力的影响[J]. 中国果树, 2023(2): 5-10.
[47] 冯旭东, 刘元士. 复合生物菌肥对清脆李的品质及产量的影响[J]. 黑龙江粮食, 2024(12): 56-58.
[48] 许泽华, 马军, 李百云, 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.