

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2025.04.040

CSTR:32310.14.stbcbx.2025.04.040

倪文乐,雷舒晨,郝爱妮,等.渭北旱塬苹果园集雨保墒措施对土壤水分、根系及降雨利用的影响[J].水土保持学报,2025,39(4):304-312.

NI Wenle, LEI Shuchen, HAO Aini, et al. Impact of rainwater harvesting and moisture conservation measures in apple orchards of Weibei dryland on soil moisture, root systems, and rainfall utilization[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(4):304-312.

渭北旱塬苹果园集雨保墒措施对土壤水分、 根系及降雨利用的影响

倪文乐¹, 雷舒晨¹, 郝爱妮¹, 封嘉成¹, 卢帅宇¹,

赵西宁^{2,3,4}, 邹养军¹, 宋小林^{1,3}

(1.西北农林科技大学园艺学院,作物抗逆与高效生产全国重点实验室,陕西省苹果重点实验室,陕西杨凌712100;

2.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院,陕西杨凌712100;3.西北农林科技大学旱区节水农业研究院,

陕西杨凌712100;4.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨凌712100)

摘要: [目的] 渭北旱塬为典型的雨养农业区,降雨时空分布不均,果树关键生育期水分供应不足,为探讨苹果园降水集蓄促渗保墒增碳措施对渭北旱塬区降水资源的利用效果。[方法] 以苹果生产园区常规有机覆盖管理为对照(CK),探讨果园降水集蓄促渗保墒增碳方法(rain collection and infiltration carburizing technology, RCIC)对苹果园土壤水分及其亏缺状态、苹果树根系生长、光合特征、苹果产量与降雨利用效率的影响。[结果] RCIC系统通过“表层截留—深层渗透”机制显著促进土壤水分向深层渗透,有效入渗深度达80 cm,最大水分利用层由CK的20~40 cm下移至40~60 cm,2021年、2022年20~80 cm土层平均蓄水量较对照(CK)分别提升14.71%和8.57% ($p < 0.01$);在2022年干早期,RCIC使40~80 cm土层储水亏缺度(W_D)降低3.09%,突破传统灌溉模式下果园土壤表层补水的空间限制;技术实施后,0~100 cm土层苹果树细根根长密度增加21.3%~25.8%,叶片光合水分利用效率(WUE)提升24.01%~80.49% ($p < 0.01$),2021—2022年苹果产量与降雨利用效率(RUE)较CK显著提高14.1%~16.64% ($p < 0.05$)。[结论] RCIC技术可实现雨季苹果园树行内降水汇聚—蓄积—浅层入渗—深层入渗—再分配,补偿深层土壤水分,促进根系延伸;进一步提高苹果叶片净光合速率、降雨利用效率与产量。研究结果可为降水资源与灌溉水资源协同高效利用提供理论和数据支撑。

关键词: 渭北旱塬;矮化密植苹果园;土壤水分;根系分布;降雨利用效率

中图分类号: S156.92

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)04-0304-09

Impact of Rainwater Harvesting and Moisture Conservation Measures in Apple Orchards of Weibei Dryland on Soil Moisture, Root Systems, and Rainfall Utilization

NI Wenle¹, LEI Shuchen¹, HAO Aini¹, FENG Jiacheng¹, LU Shuaiyu¹,

ZHAO Xining^{2,3,4}, ZOU Yangjun¹, SONG Xiaolin^{1,3}

(1.State Key Laboratory for Crop Stress Resistance and High-Efficiency Production, Shaanxi Key Laboratory of Apple, College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.Institute of Water-Saving Agriculture in Arid Areas (IWSA), Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4.Institute of Soil and Water Conservation,

Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The Weibei dryland is a typical rain-fed agricultural area characterized by uneven temporal

收稿日期:2025-04-15

修回日期:2025-05-07

录用日期:2025-05-25

网络首发日期(www.cnki.net):2025-06-03

资助项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1900700);唐仲英基金会项目

第一作者:倪文乐(2000—),女,硕士研究生,主要从事旱区苹果水土资源高效利用研究。E-mail:niwenle1@163.com

通信作者:宋小林(1984—),男,副教授,博士,硕士生导师,主要从事旱区农业水土资源高效利用和工程实践研究。E-mail: song-xiaolin@nwfau.edu.cn

<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

and spatial rainfall distribution, leading to insufficient water supply during key growth stages of fruit trees. This study aims to evaluate the effectiveness of a rain collection and infiltration carburizing technology (RCIC) in improving the utilization of precipitation resources in apple orchards on the Weibei dryland. [Methods] This study used conventional organic mulching management as the control (CK), and investigated the impact of RCIC on orchard soil moisture and its deficit status, apple tree root growth, photosynthetic characteristics, apple yield, and rainfall use efficiency (RUE). [Results] RCIC significantly promoted soil water infiltration into deeper layers through a "surface interception-deep infiltration" mechanism. The effective infiltration depth reached 80 cm, and the main water use layer shifted from 20–40 cm in CK to 40–60 cm under RCIC. Compared with CK, the average water storage in the 0–80 cm soil layer increased by 14.71% in 2021 and 8.57% ($p < 0.01$) in 2022. During the drought period in 2022, RCIC reduced water deficit (W_D) in the 40–80 cm soil layer by 3.09%, overcoming the spatial limitation of surface-level irrigation in traditional systems. After RCIC implementation, the fine root length density in the 0–100 cm soil layer increased by 21.3% to 25.8%, and photosynthetic water use efficiency (WUE) improved by 24.01% to 80.49% ($p < 0.01$). The apple yield and RUE during 2021–2022 were significantly increased by 14.1% to 16.64% ($p < 0.05$) compared to CK. [Conclusion] RCIC enables precipitation in apple orchards to converge, accumulate, infiltrate shallowly and deeply, and redistribute along tree rows during the rainy season. This process compensates for deep soil moisture loss and promotes root extension. It further enhances net photosynthetic rate, rainfall utilization efficiency, and yield. These findings provide theoretical and data support for the coordinated and efficient use of both precipitation and irrigation water resources in rain-fed orchard systems.

Keywords: Weibei dryland; dwarfing and densely planting apple orchards; soil moisture; root distribution; rainfall utilization efficiency

Received: 2025-04-15

Revised: 2025-05-07

Accepted: 2025-05-25

Online(www.cnki.net): 2025-06-03

渭北旱塬是黄土高原关键生态屏障区,农业生产以旱作为主,光热资源丰富,更是中国乃至世界的优质苹果生产基地^[1]。该区域苹果产业面临着果农老龄化、果园老化及果园用工成本上涨等问题,大面积落后乔化苹果园因此遭到淘汰^[2]。在土地流转大规模实施和苹果产业转型升级的大背景下,苹果产业逐渐向矮化密植和集约化栽培模式发展。

该区作为典型的雨养农业区,干旱缺水,降雨时空分布不均,且与苹果关键生育期需水错位^[3],加之苹果树蒸腾耗水作用极其强烈,导致果树生长关键期内所需水分供求关系矛盾突出。果树关键生育期水分供应不足,将直接导致苹果产量和品质的下降,容易造成大面积的低效生态经济林^[4]。由此可见,土壤水分不足及其低利用效率已成为制约当地苹果产业可持续发展的主要障碍。土壤水资源作为农业生产最直接的水分源泉,处于不断地运动和变换之中,一切形式的水只有转化为土壤水才能被农作物吸收利用^[5-6]。大气降水作为该地区矮化密植苹果园土壤水分补充的主要来源,如何在区域水资源刚性约束前提下提升果树根区土壤水分的续存增容能力,实现降水资源与灌溉水资源协同高效利用,是解决该

地区矮化密植苹果园干旱缺水问题和推动旱区与半干旱区农业发展的有效途径。宋小林等^[7]集成构建一种果园降水集蓄促渗保墒增碳方法、有益间作系统,通过“土—气”和“根—土”双界面水碳协同调控,实现降水资源与灌溉水资源协同高效利用。

因此,本研究以矮化密植苹果园常规有机覆盖管理为对照(CK),在不使用节水灌溉措施的前提下,基于集雨保墒增碳措施(果园降水集蓄促渗保墒增碳方法, rain collection and infiltration carburizing technology, RCIC),探讨RCIC处理对苹果园土壤水分及其亏缺状态、果树根系生长、光合特征、瞬时WUE、苹果产量及降雨利用效率的影响,以期为旱区与半干旱区苹果园土壤水分精准管理提供科学依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2021—2022年在陕西省西北农林科技大学旬邑苹果试验站进行,该站位于渭北旱塬咸阳市旬邑县土桥镇第一季现代农业园区(34°57' N, 108°08' E),海拔960~1 350 m,年日照时间2 390 h,平均年降水量606 mm,年平均气温9℃,无霜期180 d。试验园土壤主

要为褐土和黑垆土,耕层(0~20 cm)土壤有机质、全氮分别为 8.51、0.81 g/kg,硝态氮、铵态氮、速效磷、速效钾分别为 8.10、4.01、13.01、110.47 mg/kg, pH 为 8.06,土壤体积质量为 1.48 g/cm³,0~100 cm 土层土壤田间持水量为 20.35%。试验前果园土壤管理为自然生草。

1.2 试验设计

田间试验于 2021—2022 年进行,其中 2021 年与 2022 年累计降水量分别为 1 284.6、698.2 mm(图 1)。试验地苹果树(*Malus pumila* M.)种植于 2017 年,与果园中株高、胸径、冠幅直径等长势相似,位于同一田面上的矮化砧苹果树‘富士’作为试验用树,砧木为 M26,株行距为 1.5 m×3.5 m。

本试验主要设计 2 个水平,分别为:1)降水集蓄促渗保墒增碳技术处理(RCIC);2)试验果园已有的有机物(杂草、树叶、麦草、厩肥)覆盖处理(CK)。每个处理重复 3 次,每个重复 5 株果树。试验期间,全年不进行灌溉,仅靠天然降水,其他施肥、除虫等田间管理措施均与 CK 处理保持一致。

试验果园配套集雨保墒措施统一按照中国发明专利“果园降水集蓄促渗保墒增碳方法、系统及

其果园智能补灌系统”中果园降水集蓄促渗保墒增碳方法的具体操作进行实施,具体施工步骤为土地平整、作垄并铺设垄内有机物料填充层、开设集雨沟、填充发酵填料、安装促渗导流管、铺设保水促渗有机发酵填充体、覆盖地布。试验设计示意和降水集蓄促渗保墒增碳技术布设剖面示意分别见图 2、图 3。

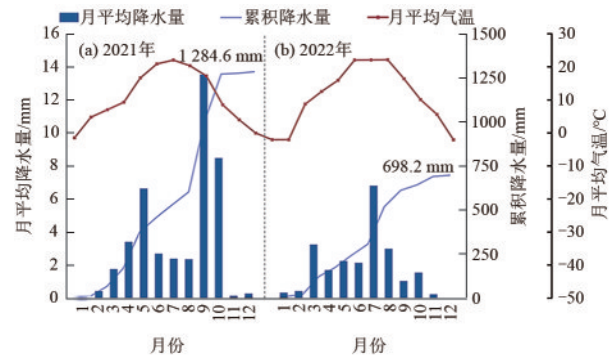


图 1 2021—2022 年月平均降水量、年累计降水量及月平均气温

Fig. 1 Monthly average precipitation, annual cumulative precipitation, and monthly average temperature for 2021–2022

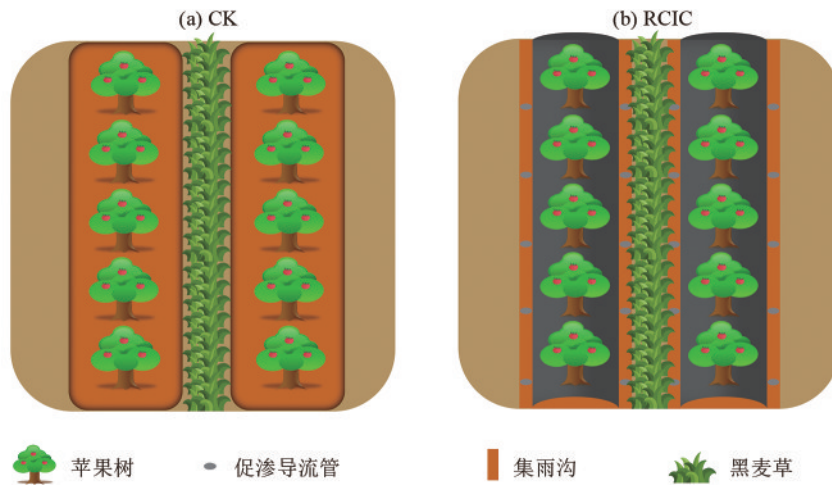


图 2 试验设计示意

Fig. 2 Schematic diagram of experimental design

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤水分体积分数(SMC)测定 土壤水分体积分数(SMC)采用 ECH₂O 水分监测系统(FWMEC-10 土壤传感器,陕西飞沃,中国)测定,系统每隔 10 min 录 1 次数据,测定深度为 0~20、20~40、40~60、60~80 cm。

1.3.2 土壤储水亏缺度(W_D)与土壤储水亏缺补偿度(W_S)计算 土壤水分动态的时空异质性是影响作物水分利用效率的关键因素^[8],半干旱气候下,土壤水分与养分不足对苹果树生理特性及果实品质与产量有较大的负面影响^[9],传统研究多关注土壤质量含水

率的变化特征,但仅凭土壤质量含水率难以量化水分供需矛盾的实际程度,如水分亏缺深度与补偿潜力,尤其在气候波动和果树生育期差异背景下,亟须引入能够表征土壤水分收支平衡的综合指标。因此,本研究通过计算土壤储水亏缺度(water deficit, WD)与储水亏缺补偿度(water supplement, WS),以更精准地解析不同处理对土壤水分盈亏状态的调控机制。

土壤储水亏缺度公式^[10]为:

$$WD = \frac{D_i}{F_c} \times 100\% \quad (1)$$

$$D_i = F_c - SWS_i \quad (2)$$

$$SWS_i = SWC \times h_i \times 10/100 \quad (3)$$

式中:WD为土壤储水亏缺度,%; D_i 为*i*土层深度范围内的土壤储水亏缺量,mm; F_c 为0~80 cm土体的平均田间持水量,mm; SWS_i 为*i*土层的土壤储水量,mm; h_i 为*i*土层高度,cm。

土壤储水亏缺补偿度公式为:

$$WS = \frac{\Delta SWS_i}{D_{ai}} \times 100\% \quad (4)$$

$$\Delta SWS_i = SWS_{fi} - SWS_{ii} \quad (5)$$

$$D_{ai} = F_c - SWS_{ii} \quad (6)$$

式中:WS为土壤储水亏缺补偿度,%; ΔSWS_i 为雨季前后土壤储水量间的差值,mm; SWS_{fi} 为雨季最后日期(雨后)的土壤储水量,mm; SWS_{ii} 为雨季最初日期(雨前)的土壤储水量,mm; D_{ai} 为雨季最初日期(雨前)的土壤储水亏缺量,mm; F_c 为0~80 cm土体的平均田间持水量,mm。

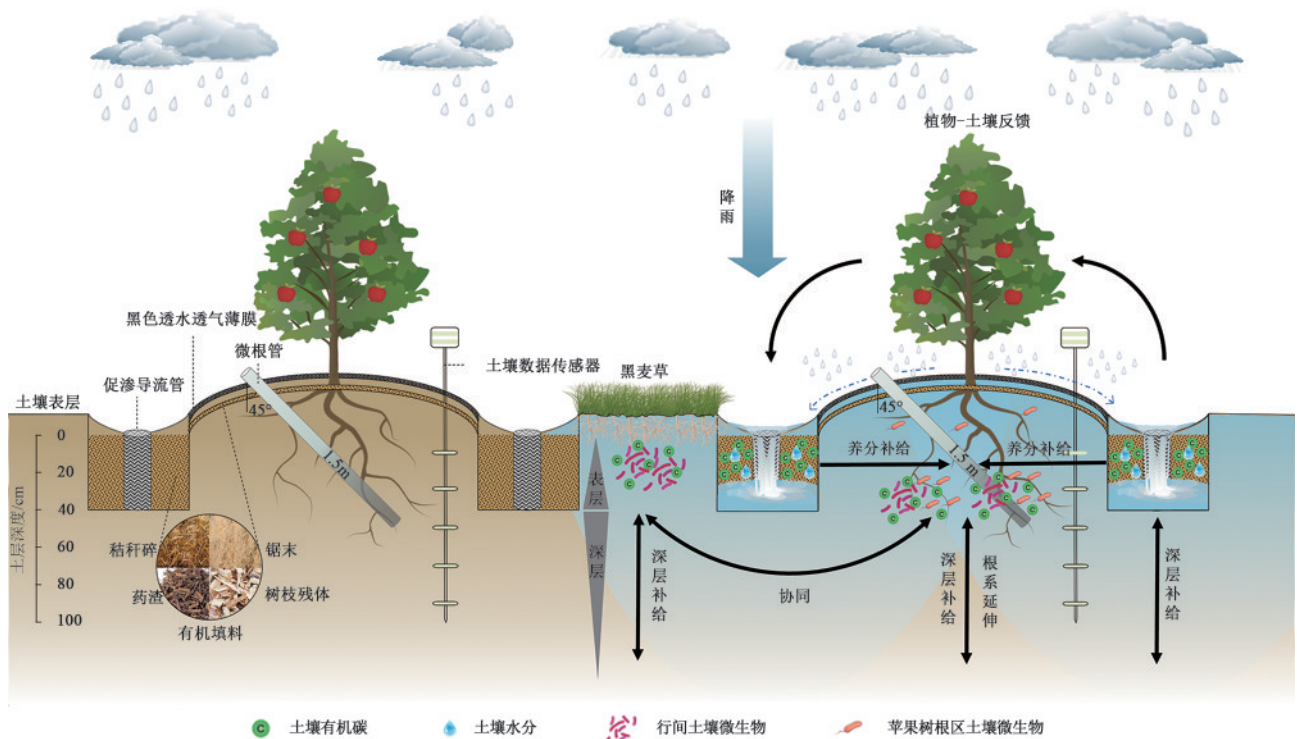


图3 降水集蓄促渗保墒增碳技术布设剖面示意

Fig. 3 Schematic cross-sectional layout of rain collection and infiltration carburizing technology

1.3.3 根长密度、根表面积密度与根体积密度计算 采用CI-600植物根系监测系统(美国CID, Inc),在每个处理中安装3根有机透明微根管(简称根管),根管与地面角为45°,地下埋深约90 cm,管子露出地面约10 cm,观察根系生长状态,参考吉光鹏等^[11]的方法,对2个处理果树在0~100 cm 5个土层中的细根(<2 mm)进行扫描与分析。根系相关指标的计算公式^[11]为:

$$LD = \frac{L}{V_s} \quad (7)$$

$$SAD = \frac{SA}{V_s} \quad (8)$$

$$VD = \frac{V}{V_s} \quad (9)$$

式中:LD为根长密度,cm/cm³;L为根长,cm;SAD为根表面积密度,mm²/cm³;SA为根表面积,mm²;VD为根体积密度,mm³/cm³;V为根体积,mm³;V_s为土体体积,cm³。

1.3.4 叶片净光合速率(Pn)与光合水分利用效率(WUE)测定 光合特性参考陈悦等^[12]的方法使用光合仪(CIRAS-3,美国)进行测定,每个叶片最少测量3次。

1.3.5 苹果果实产量测定与降雨利用效率(RUE)计算 果实成熟后对每个处理挑选20棵试验树,测定果实产量。

降雨利用效率(rainfall use efficiency, RUE)计算公式^[10]为:

$$RUE = \frac{Y}{P} \quad (10)$$

式中:RUE为降雨利用效率,kg/(hm²·mm);Y为苹果产量,kg/hm²;P为试验期间的总降雨量,mm。

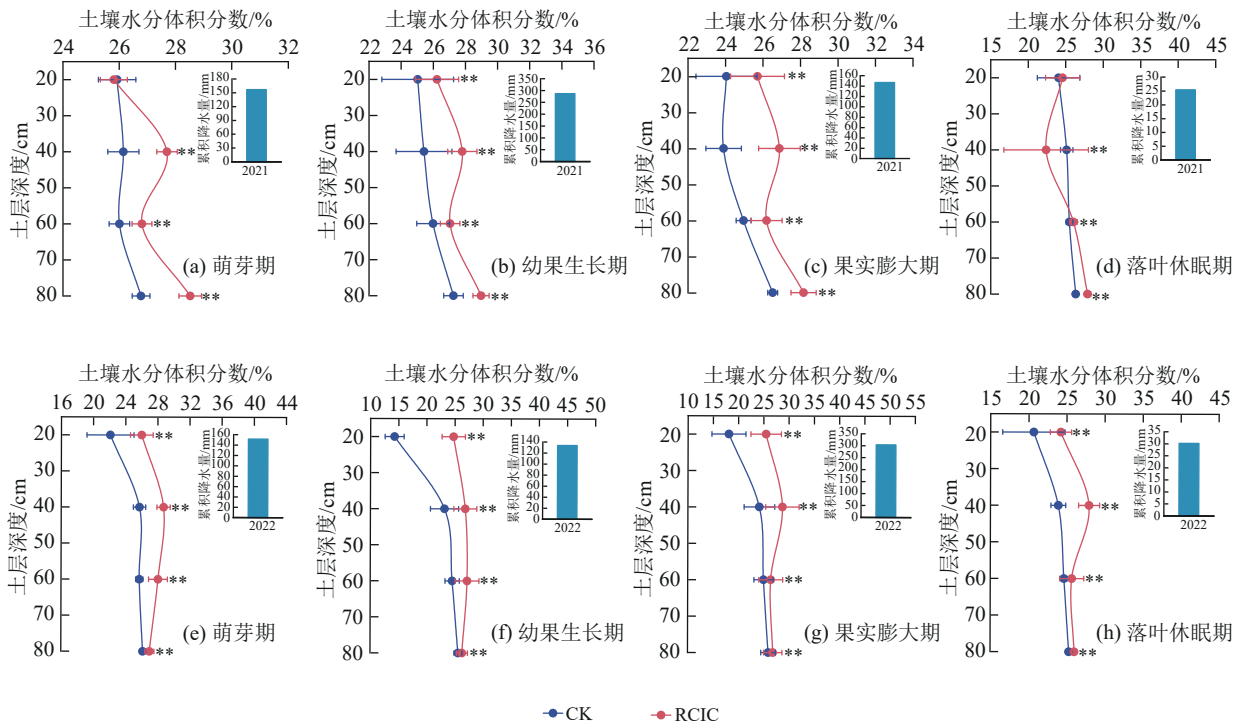
1.4 数据处理

运用Excel 2021软件对2021—2022年土壤水分数据进行初步处理,采用SPSS 20.0软件中的独立样本T检验对统计数据进行显著性检验,使用Origin 2022软件绘制图形。

2 结果与分析

2.1 苹果不同生育期果园土壤水分体积分数的时空分布特征

2021—2022年不同处理下0~80 cm土层土壤体积含水率(SMC)的时空分布特征见图4。RCIC技术显著改变0~80 cm土层的土壤水分分布格局。RCIC处理在幼果生长期0~80 cm各土层SMC始终极显著高于对照,深层土壤(40~80 cm)水分动态均受RCIC系统显著调控。2021



注:**表示 $p < 0.01$; *表示 $p < 0.05$ 。下同。

图4 2021与2022年苹果树不同生育期不同深度下土壤水分体积分数变化

Fig. 4 Changes in soil moisture content at different growth stages and soil depths of apple trees in 2021 and 2022

2.2 苹果不同生育期果园土壤储水亏缺度与土壤储水亏缺补偿度的时空分布特征

2021—2022年不同处理下0~80 cm土层土壤储水亏缺度(WD)变化特征见图5。RCIC处理在2021年与2022年苹果树不同生育期0~80 cm土层WD均小于对照处理,2021年,20~80 cm土层RCIC处理WD均极显著低于对照处理($p < 0.01$),总体降低1.5%,2022年,随着土层深度的增加,2个处理间WD差异越小,0~80 cm土层RCIC处理WD均极显著低于对照处理($p < 0.01$),总体降低3.09%。RCIC连续2 a极显著降低苹果幼果生长期与果实膨大期WD,尤其在干旱年(2022年),相比于对照,RCIC对0~80 cm土层水分补充效果更显著。2021年萌芽期底层土壤(40~80 cm)WD变化幅度大于其他时期,2022年落叶休眠期底层土壤(40~80 cm)WD较其他时期有所增

年表层土壤(0~40 cm)中,除落叶休眠期外,RCIC处理20~40 cm土层SMC均高于0~20 cm土层($p < 0.01$)。该现象归因于RCIC系统的垄沟结构(含有机物料层及透水地布)增强降水集蓄能力,但落叶休眠期降雨量仅25.4 mm导致水分下渗受限,致使20~40 cm土层SMC极显著低于对照($p < 0.01$)。底层土壤(40~80 cm)中,RCIC处理除休眠期外SMC波动显著,20~80 cm土层土壤水分体积分数2年(2021年、2022年)总体分别提高14.71%、8.57%。

加,但仍极显著低于对照处理1.87%($p < 0.01$)。

2021—2022年不同处理下0~80 cm土层土壤储水亏缺补偿度(WC)变化特征见图6。湿润年(2021年)不同生育期,RCIC处理土壤水分均为正补偿,底层土壤(40~80 cm)WC呈逐渐上升趋势,在落叶休眠期,RCIC处理在整个土层中WC均高于对照处理;干旱年(2022年)萌芽期与果实膨大期,RCIC表现出较强的正补偿效应,且0~80 cm土层WC始终高于对照处理,其中萌芽期0~20 cm土层RCIC处理WC显著高于对照,幼果生长期与落叶休眠期,2个处理0~80 cm土层WC在平衡值(0)上下波动,RCIC处理在20~40 cm土层WC大于对照处理。进一步表明,RCIC系统可直接将收集的雨水转移到根区,从而对深层土壤水分产生补偿作用,使干旱年(2022年)萌芽期与果实膨大期0~80 cm土层土壤储水亏缺得到改善。

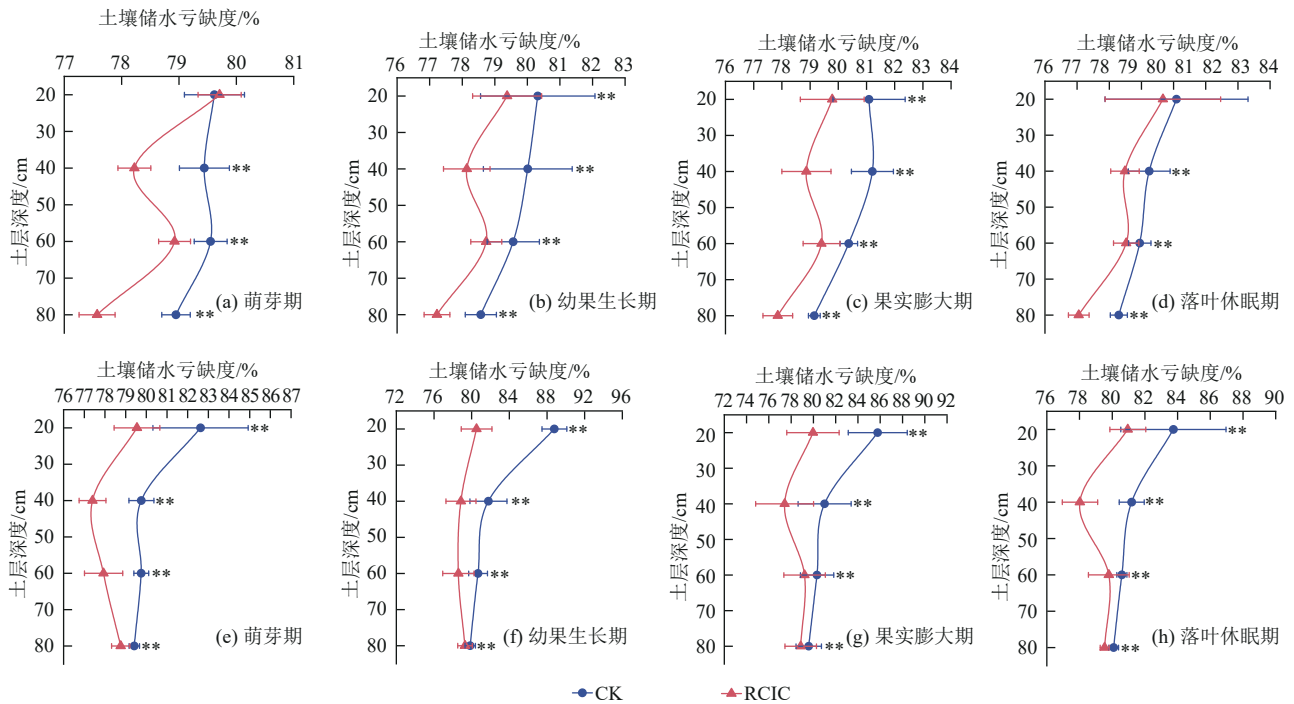


图 5 2021 年与 2022 年苹果树不同生育期 0~80 cm 土层土壤水分亏缺度

Fig. 5 Soil moisture deficit at 0~80 cm depth during different growth stages of apple trees in 2021 and 2022

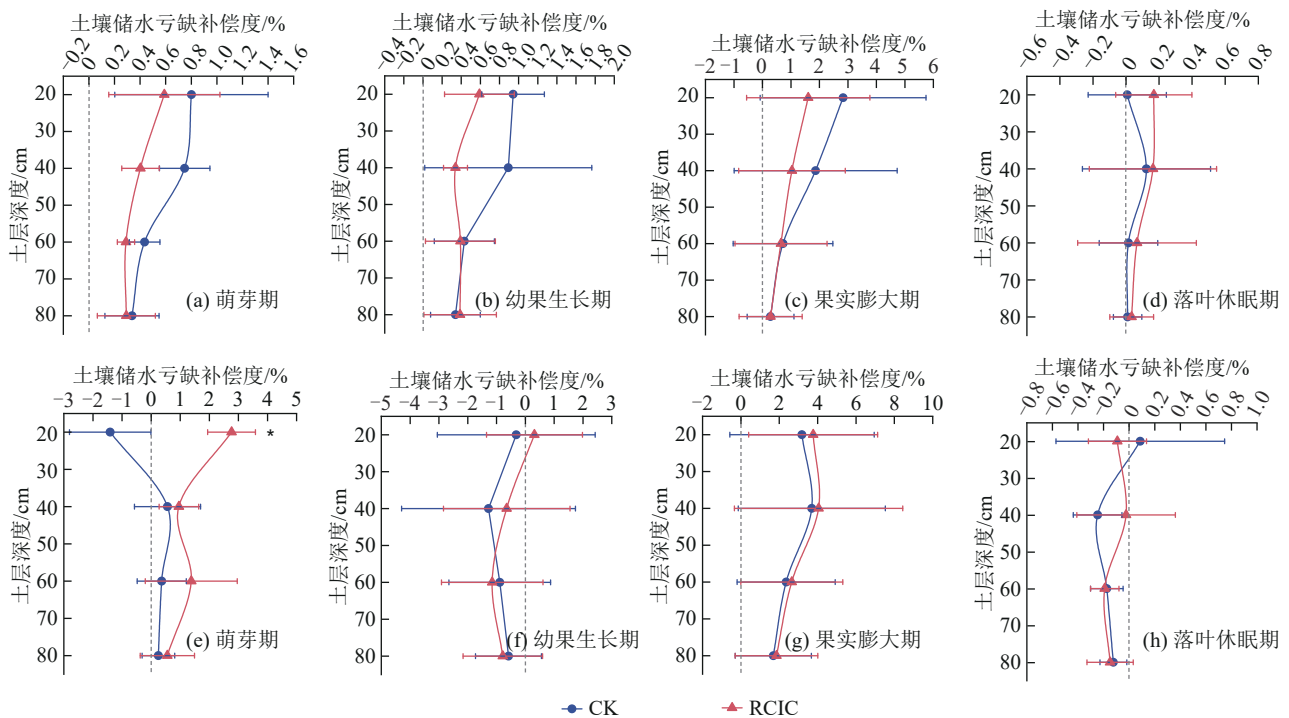


图 6 2021 与 2022 年苹果树不同生育期 0~80 cm 深度下土壤水分亏缺补偿度

Fig. 6 Compensation degree of soil moisture deficit at 0~80 cm depth during different growth stages of apple trees in 2021 and 2022

2.3 降水集蓄促渗保墒增碳技术对苹果根系垂向空间分布的影响

2022 年不同处理 0~100 cm 土层根系分布情况见图 7。在 0~100 cm 土层中,RCIC 下苹果树根长密度、根表面积密度及根体积密度均大于对照处理,RCIC 下,果树细根在垂直方向上主要集中在 0~40 cm 土层,根长密度占 0~100 cm 土层总

根根长的 51.3%,根表面积密度占 0~100 cm 土层总细根根表面积的 60.55%,根体积占 0~100 cm 土层总细根根体积的 39.53%。在 20~40、60~80 cm 土层中,RCIC 下果树根长密度显著高于对照处理 ($p < 0.05$),根体积密度在 60~100 cm 土层中极显著高于对照处理 ($p < 0.01$)。RCIC 系统改变矮化苹果树根系集中分布土层,对照处理组苹果树细

根在 0~20 cm 土层集中分布,而 RCIC 使苹果树细 土层根长密度、根表面积密度、根体积密度均高于 根原本的集中分布土层下移 20 cm,且 0~100 cm 对照处理。

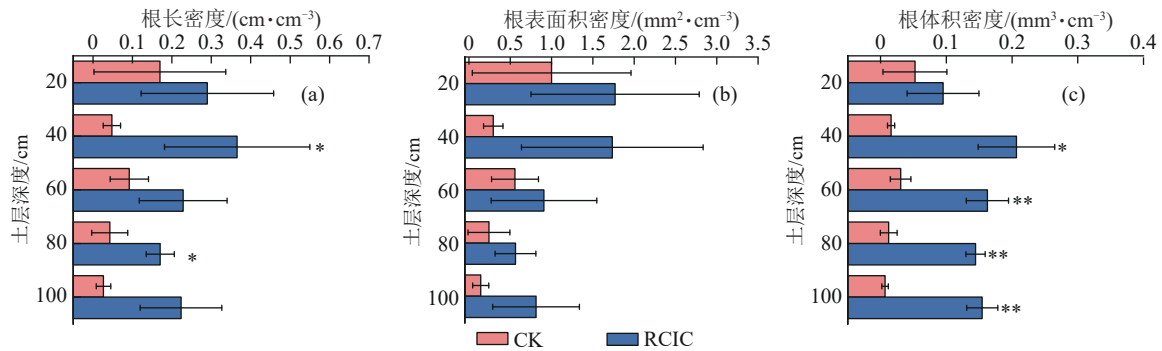


图 7 RCIC 下 0~100 cm 土层根长密度、根表面积密度与根体积密度的垂直分布特征

Fig. 7 Vertical distribution characteristics of root length density, root surface area density, and root volume density in 0-100 cm soil layer under RCIC

2.4 不同时期苹果树叶片净光合速率与光合水分利用效率变化特征

2022 年不同处理下苹果叶片各生育期净光合速率(Pn)与光合水分利用效率(WUE)的变化情况见表 1。RCIC 处理在苹果树幼果生长期对 WUE 有显

著影响, WUE 显著高于对照处理($p < 0.05$), 增幅为 24.01%; RCIC 处理在果实膨大期对 Pn 与 WUE 有极显著提高($p < 0.01$), 增幅分别为 33.92%、80.49%; RCIC 处理在果实成熟期, Pn 与 WUE 均高于对照, 但影响不显著。

表 1 不同时期苹果树叶片净光合速率与光合水分利用效率变化特征

Table 1 Characteristics of changes in net photosynthetic rate and photosynthetic water use efficiency of apple leaves at different stages

生育期	处理	净光合速率 (Pn)/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\text{CO}_2$)	光合水分利用效率 (WUE)/($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\text{CO}_2$)
幼果生长期	RCIC	17.09±2.07	2.65±0.45*
	CK	15.50±3.01	2.14±0.41
果实膨大期	RCIC	16.07±2.95**	2.65±0.87**
	CK	12.00±2.04	1.47±0.15
果实成熟期	RCIC	9.63±2.89	1.97±0.76
	CK	9.20±4.79	1.66±0.62

注: *表示与 CK 相比差异显著($p < 0.05$); **表示与 CK 相比差异极显著($p < 0.01$)。下同。

2.5 降水集蓄促渗保墒增碳技术对苹果产量与降雨利用效率的影响

2021 年与 2022 年不同处理下苹果产量与降雨利用效率(RUE)变化情况见表 2。RCIC 处理对苹果产量与

RUE 有显著影响($p < 0.05$)。2021 年, 相比对照处理, RCIC 处理下苹果产量与 RUE 显著提高 16.64%, 2022 年, RCIC 处理下苹果产量与 RUE 显著提高 14.10%。RCIC 连续 2 a 显著提高苹果产量与降雨利用效率(RUE)。

表 2 RCIC 对 2021 年与 2022 年苹果产量与降雨利用效率的影响

Table 2 Effects of RCIC on apple yield and rainfall utilization efficiency in 2021 and 2022

年份	处理	产量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	降雨利用效率(RUE)/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$)
2021	RCIC	51 862.54±7 837.56*	40.37±6.10*
	CK	44 463.13±6 404.19	34.61±4.99
2022	RCIC	38 626.84±3 123.96*	55.32±4.47*
	CK	33 854.44±4 666.09	48.49±6.68

3 讨论

由于干旱区与半干旱区土壤水分有限, 且处在不断消耗状态中, 果树生长过程中应适当补充水分, 以促进植物根系正常生长。干旱气候可导致土壤干旱和植物缺水, 从而影响植物生长发育及元素的吸收和利用^[13]。本研究显示, RCIC 系统显著提升苹果全生育期深层土壤水分。

宋小林^[14]采用雨水集聚深层入渗技术(RWCI)探究乔化果园水坑措施下不同土层土壤水分分布特征表明, 雨水集聚深层入渗技术对土壤水分改善显著, 有利于果树根系生长; 杨乐等^[15]研究显示, 自然生草与地膜覆盖可增加土壤水分; 陈天龙等^[16]研究表明, 土壤改良技术促进苹果树根系生长。本研究在矮化密植果园中对 RCIC 系统进行 2 a 土壤水分监测表明, RCIC 系统显

著增加0~80 cm土层土壤水分,RCIC系统垄内有机物料填充层与黑色透水透气地膜形成保护罩,对0~80 cm深度土壤保湿作用较为明显,与前人关于土壤改良措施对土壤水分影响的研究结果基本一致。

果园深层土壤水分的提升与保持可促进果树根系生长及其对土壤水分与养分的吸收,进而提升苹果产量^[17],一定程度的外源养分补充在提高土壤养分的同时,可提高苹果树叶片净光合速率与光合水分利用效率^[18-20]。RCIC系统显著增加苹果全生育期深层土壤水分,保证矮化密植果园中苹果树体在每个生育期对水分的基本需求,RCIC可通过优化土壤水分时空分布,打破矮化砧苹果树根系吸收的“表层锁定”效应,在干旱年(2022年)仍能维持深层土壤水分稳定性。另外,RCIC系统下,苹果树叶片的净光合速率、光合水分利用效率、苹果产量与降雨利用效率均有显著提升,对黄土高原旱作果园可持续管理具有重要实践价值。

降水集蓄促渗保墒增碳系统(RCIC)是通过收集降水、释放养分,营造更适合果树根系生长的根区土壤微环境,形成Π形保水增碳保护罩,从而增加底层土壤(40~100 cm)水分与养分,增强根系生长潜力,促进苹果树体生长发育,提高果实品质与产量的降水与农业废弃物资源化利用方法。植物可通过调整细根的生物量和形态特征来适应种间竞争,从而对植物生长发育和群落动态结构的组成产生一定的影响^[21-22],RCIC系统中苹果树行两边集雨沟内铺设保水促渗有机发酵填充体,填充体主要由锯末、药渣、废弃秸秆、树枝残体等农业废弃物组成,集雨沟内垂直安装促渗导流管,设计深度为40 cm,进入促渗导流管内的降水直接渗入40及40 cm以下果树根区土壤中,供果树根系利用,由于根系具有向水向肥性,因此,RCIC系统可通过与常规管理模式不同的供水供肥方式,改变根系的分布,促进根系向下延伸,增加细根数量,RCIC系统对矮化密植果园苹果树根系及土壤微生物的具体影响还需进一步研究。

4 结论

1)降水集蓄促渗保墒增碳系统(RCIC)收集降雨,而后对土壤水分产生的影响可扩大至土壤垂直距离80 cm处,其中影响最大的土层为40~60 cm,常规有机物覆盖处理(CK)对土壤水分影响最大的土层为20~40 cm土层。在降雨时空分布不均的气象背景下,RCIC处理可极显著提高20~80 cm土层土壤水分体积分数,2 a分别提高14.71%和8.57%。

2)RCIC系统通过定向导流与深层渗透机制,将集蓄降水直接输送至苹果树根系活跃区(20~40 cm),在干旱年有效缓解萌芽期与果实膨大期深层土壤(40~80 cm)水分亏缺,突破传统管理下土壤水

分补给的表层依赖性。

3)与对照相比,RCIC系统通过优化土壤水分时空分布,打破矮化砧苹果树根系水分吸收的“表层锁定”效应,并且增加0~100 cm土层中苹果树细根根长密度、根表面积密度及根体积密度。

4)RCIC系统极显著提高苹果果实膨大期叶片净光合速率与光合水分利用效率,增幅分别为33.92%与80.49%($p < 0.01$),苹果产量与降雨利用效率提高14.1%~16.64%。

参考文献:

- [1] 王达未,陈东凯,骆汉,等.渭北旱塬不同树龄矮砧密植苹果园土壤水分空间分布特征[J].水土保持研究,2024,31(6):188-198.
WANG D W, CHEN D K, LUO H, et al. Spatial characteristics of soil moisture in dense planting dwarf rootstock apple orchards with different tree ages in Weibei dry highland [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 188-198.
- [2] 马锋旺.中国苹果产业发展的思考:现状、问题与出路[J].落叶果树,2023,55(4):1-4.
MA F W. Reflections on the development of China's apple industry: Current situation, problems and solutions [J]. Deciduous Fruits, 2023, 55(4): 1-4.
- [3] 白岗栓,邹超煜,杜社妮.渭北旱塬果园自然生草对土壤水分及苹果树生长的影响[J].农业工程学报,2018,34(3):151-158.
BAI G S, ZOU C Y, DU S N. Effects of self-sown grass on soil moisture and tree growth in apple orchard on Weibei dry plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(3): 151-158.
- [4] 钟韵,费良军,曾健,等.根域水分亏缺对涌泉灌苹果幼树产量品质和节水的影响[J].农业工程学报,2019,35(21):78-87.
ZHONG Y, FEI L J, ZENG J, et al. Effects of root-zone water deficit on yield, quality and water use efficiency of young apple trees under surge-root irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(21): 78-87.
- [5] 吴普特,赵西宁,张宝庆,等.黄土高原雨水资源化潜力及其对生态恢复的支撑作用[J].水力发电学报,2017,36(8):1-11.
WU P T, ZHAO X N, ZHANG B Q, et al. Exploitation of rainwater harvesting potential and its impact on regional ecological restoration over the Loess Plateau [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(8): 1-11.
- [6] 张宝庆,吴普特,赵西宁,等.黄土高原雨水资源化潜力与时空分布特征[J].排灌机械工程学报,2013,31(7):636-644.
ZHANG B Q, WU P T, ZHAO X N, et al. Rainwater

- harvesting potential and its spatial-temporal variation in Loess Plateau of China[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2013, 31(7): 636-644.
- [7] 宋小林, 赵西宁, 马锋旺, 等. 果园降水集蓄促渗保墒增碳方法、系统及其果园智能补灌系统, CN114651703 B [P/OL]. 2022.
- SONG X L, ZHAO X N, MA F W, et al. Method, system for water collection, infiltration promotion, moisture retention and carbon increase in orchards and intelligent supplementary irrigation system for orchards, CN114651703 B [P/OL]. 2022.
- [8] 时晓蕊, 洪旭, 朱文彬. 多种干旱指数对我国主粮作物水分亏缺的适用性及应用[J]. *应用生态学报*, 2025: 1-14.
- SHI X R, HONG X, ZHU W B. Applicability and application of multiple drought indices to water deficit of staple crops in China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025: 1-14.
- [9] JAT M L, RANA G S, SHIVRAN J S, et al. Impact of plant nutrients and organic substances on growth, yield, and quality attributes of Anna apple cultivar under semi-arid conditions[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2025, 48(3): 429-444.
- [10] SONG X L, WU P T, GAO X D, et al. Rainwater collection and infiltration (RWCI) systems promote deep soil water and organic carbon restoration in water-limited sloping orchards [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 242: e106400.
- [11] 吉光鹏, 周晓通, 张栋海, 等. 幼龄期矮砧苹果根系分布及生长发育规律[J]. *湖北农业科学*, 2023, 62(12): 108-113.
- JIG P, ZHOU X T, ZHANG D H, et al. Root distribution and growth development patterns of young dwarf rootstock apples [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2023, 62(12): 108-113.
- [12] 陈悦, 张秀英, 张丹, 等. 微生物菌剂与大蒜油配施对银叶病苹果叶片生理特性及果实品质的影响[J]. *果树资源学报*, 2024, 5(1): 1-7.
- CHEN Y, ZHANG X Y, ZHANG D, et al. Effects of microbial agents combined with garlic oil on the physiological characteristics and fruit quality of apple leaves with silver leaf disease [J]. *Journal of Fruit Resources*, 2024, 5(1): 1-7.
- [13] DE OLIVEIRA SOUSA A R, DE ANDRADE SILVA E M, FILHO M A C, et al. Metabolic responses to drought stress and rehydration in leaves and roots of three citrus scion/rootstock combinations [J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 292: e110490.
- [14] 宋小林. 黄土高原雨水集蓄深层入渗技术试验研究: 以山地苹果园为例[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- SONG X L. Experimental study on the rainwater collection and infiltration (RWCI) system in Loess Plateau of China: Take the mountain orchard as an example [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2017.
- [15] 杨乐, 李文杨, 骆建莉, 等. 地膜覆盖和自然生草对桃园土壤养分、pH 及水热的影响[J]. *浙江农业学报*, 2024, 36(12): 2719-2726.
- YANG L, LI W Y, LUO J L, et al. Effects of plastic film mulching and natural grass growing on soil nutrients, pH, water content and temperature in peach orchard [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2024, 36(12): 2719-2726.
- [16] 陈天龙, 李慧奇, 宁瑞渊, 等. 丛枝菌根真菌对不同苹果树生长及果实品质的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2025, 53(2): 72-80.
- CHEN T L, LI H Q, NING R Y, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on growth and fruit quality of different apple trees [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2025, 53(2): 72-80.
- [17] 崔聪聪, 郑荣启, 刘美玉, 等. 不同集雨方式对旱地苹果园土壤水分及果树生长的影响[J]. *果树资源学报*, 2023, 4(5): 32-36.
- CUI C C, ZHENG R Q, LIU M Y, et al. Effects of different rain harvesting methods on soil moisture and fruit growth in dryland apple orchard [J]. *Journal of Fruit Resources*, 2023, 4(5): 32-36.
- [18] 王朝, 张朋朋, 管增辉, 等. 喷施不同钙肥对‘蜜脆’苹果生理生化特性及果实品质的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(7): 73-80.
- WANG Z, ZHANG P P, GUAN Z H, et al. Effects of spraying different calcium fertilizers on physiological and biochemical characteristics and fruit quality of 'Honey-crisp' apple [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2024, 52(7): 73-80.
- [19] 左晓婷, 王超鹏, 张杭, 等. 微生物菌肥对碱胁迫下新疆野苹果幼苗生理特性的影响[J]. *果树资源学报*, 2025, 6(1): 14-20.
- ZUO X T, WANG C P, ZHANG H, et al. Effects of microbial fertilizer on physiological characteristics of *Malus sieversii* under alkali stress [J]. *Journal of Fruit Resources*, 2025, 6(1): 14-20.
- [20] 梁青, 张体彬, 程煜, 等. 绿肥间作对渭北果园土壤水分、养分及苹果产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(2): 250-259.
- LIANG Q, ZHANG T B, CHENG Y, et al. Effects of green manure intercropping on soil moisture, nutrients, and apple yield in a Weibei apple orchard [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(2): 250-259.
- [21] AVERTI I S, FELIX K, DOMINIQUE N, et al. Fine roots dynamics in a tropical moist forest: Case of two forest groves in the congo basin [J]. *Baltic Forestry*, 2015, 21(2): 204-211.
- [22] LEPPÄLAMMI-KUJANSUU J, ARO L, SALEMAA M, et al. Fine root longevity and carbon input into soil from below- and aboveground litter in climatically contrasting forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, 326: 79-90.