



刘文球, 韩玉国, 王晓学, 王若水, 吴月芳, 曾理, 杨雨欣. 不同地面覆盖方式对晋西地区苹果园土壤水分及果树生长的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(04): 106-118.

LIU Wenqiu, HAN Yuguo, WANG Xiaoxue, WANG Ruoshui, WU Yuefang, ZENG Li, YANG Yuxin. Effect of different mulching measures on soil moisture and apple fruit trees growth in the Loess Plateau of western Shanxi Province, China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(04): 106-118.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.04.09

不同地面覆盖方式对晋西地区苹果园土壤水分及 果树生长的影响

刘文球^{1,2} 韩玉国^{1,2*} 王晓学³ 王若水^{1,2} 吴月芳⁴ 曾理^{1,2} 杨雨欣^{1,2}

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083;

2. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 山西 吉县 042200;

3. 中国国际工程咨询有限公司, 北京 100048;

4. 安徽省水文局, 合肥 230022)

摘要 为明确晋西黄土区不同地面覆盖方式对盛果期苹果园土壤水分及果树生长的影响, 寻求雨养农业区盛果期苹果园保墒增产的最佳覆盖方式, 以黄土丘陵区树龄17年‘红富士’(*Malus pumila* cv. ‘Red Fuji’)苹果树为研究对象, 设置秸秆覆盖(SM)、园艺地布覆盖(BF)、黑色地膜覆盖(BM)、白色地膜覆盖(WM)和清耕(CK)5种处理, 于2023年4—10月进行野外定位观测试验, 探讨不同地面覆盖方式对盛果期苹果园土壤水分、果树生长状况和产量的综合影响。结果表明: 1) 相较于CK处理, 覆盖处理有效提高全生育期0~120 cm土层平均土壤体积含水量的1.77%~23.82%, 降低土壤水分变异系数, 有效提高土壤贮水量16.57~48.56 mm; 2) 相较于CK处理, 覆盖处理更有利于枝条生长, 覆盖处理新梢长度提高了10.28%~19.44% ($P < 0.05$); 3) 相较于CK处理, 覆盖处理显著提高可溶性固形物含量1.93%~10.78%、可溶性糖含量4.55%~22.44% ($P < 0.05$), 降低可滴定酸含量7.89%~15.79% ($P < 0.05$); 4) 相较于CK处理, 覆盖处理显著提高苹果产量6.55%~11.33% ($P < 0.05$), 提高水分利用效率2.09%~5.98%。与其他覆盖处理相比, 园艺地布覆盖处理的产量提高1.54%~4.49%, 综合评分最高(0.59), 经济效益提高2.06%~6.74%。因此, 选择园艺地布作为晋西地区盛果期苹果园的最佳覆盖方式。

关键词 苹果; 土壤水分; 果实品质; 产量

中图分类号 S152.7

文章编号 1007-4333(2025)04-0106-13

文献标志码 A

Effect of different mulching measures on soil moisture and apple fruit trees growth in the Loess Plateau of western Shanxi Province, China

LIU Wenqiu^{1,2}, HAN Yuguo^{1,2*}, WANG Xiaoxue³, WANG Ruoshui^{1,2},
WU Yuefang⁴, ZENG Li^{1,2}, YANG Yuxin^{1,2}

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, Jixian 042200, China;

3. China International Engineering Consulting Corporation, Beijing 100048, China;

4. Hydrology Bureau of Anhui Province, Hefei 230022, China)

Abstract This study aimed to clarify the effects of different mulching measures on the soil moisture of

收稿日期: 2024-08-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(32271960)

第一作者: 刘文球(ORCID: 0009-0005-4588-3665), 硕士研究生, E-mail: Liuwenqiu0302@163.com

通讯作者: 韩玉国(ORCID: 0000-0002-7980-0259), 教授, 主要从事水土资源高效利用研究, E-mail: yghan@bjfu.edu.cn

fruiting apple orchards and the growth of fruiting trees in the loess plateau of western Shanxi, and find the best mulching measures for the soil moisture and yield improvement of fruiting trees in the rain-fed agricultural area. In this study, 17-year-old 'Fuji' apple trees were taken as the research object and five treatments of straw mulching (SM), horticultural fabric mulching (BF), black mulching (BM), white mulching (WM), and clear cultivation (CK) were designed. The field locating and observing experiment was conducted to explore the comprehensive effects of different mulching measures on the soil moisture of apple orchards, the growth condition of apple fruit trees and the yield from April to October 2023. The results showed that: 1) Compared to the CK treatment, all of the mulch treatments effectively increased the average soil volume water content in the 0~120 cm soil layer from 1.76% to 23.66% during the entire reproductive period, the coefficient of variation of soil moisture was increased and the soil water storage capacity was increased by 16.57 to 48.56 mm. 2) Compared to CK treatment, the mulching measures were more conducive to the growth of branches, and increased new shoot length by 10.28% to 19.44% ($P < 0.05$). 3) Compared with CK treatment, the mulching treatments remarkably raised the soluble solids content by 1.93% to 10.78% ($P < 0.05$), soluble sugar content by 4.55% to 22.44% ($P < 0.05$), and reduced the titratable acid content by 7.89% to 15.79% ($P < 0.05$). 4) Compared with CK treatment, the mulching treatments significantly increased the apple yield by 6.55% to 11.33% ($P < 0.05$), and improved the water use efficiency by 2.09% to 5.98%. Compared to the other mulching treatments, the horticultural fabric mulching treatment increased apple yield by 1.54% to 4.49%, obtained a high comprehensive score (0.59), and increased the economic benefits by 2.06% to 6.74%. Therefore, the horticultural fabric mulching was the best mulching measure for fruiting apple orchards in western Shanxi region.

Keywords apple; soil moisture; fruit quality; yield

黄土高原因其独特的气候资源和土壤条件,适宜生产优质苹果,是中国苹果生产规模最大的优势区^[1]。苹果种植面积持续增长,苹果已成为黄土高原区域发展的重要支柱产业^[2]。截至2022年,黄土高原产区苹果种植面积达到103.25万hm²,产量达2229.06万t,分别占全球种植面积及产量的21.41%和23.26%^[3-4]。黄土高原区80%以上的苹果园为旱作果园^[5],地下水埋藏较深难以利用,缺乏灌溉设施,苹果生长主要依靠于有限的自然降水;且该区域自然降雨与苹果需水期存在时空错位,春季果树需水量大的萌芽开花期干旱少雨^[6],从而产生水分供需矛盾^[7]。我国苹果园主要采取清耕管理,导致非生产性水分蒸发增加,土壤蓄水保墒效果差,进一步恶化果园土壤水分的供应。土壤供水不足对果树生长发育、产量和品质具有不利影响^[8]。因此,为缓解黄土高原区苹果园水分供需不平衡的现状,高效利用自然降雨,亟需在苹果生长发育的关键时期采取必要的保水措施。

覆盖作为一种有效的地面管理方式和保水措施,在雨养农业区被广泛应用^[9-10]。通过采取有效的覆盖措施,最大限度将有限降雨贮存于土壤中,实现水分跨时空利用,调节土壤温度和提高养分利

用,从而影响植物生长生理过程,进而影响产量、果实品质和水分利用效率^[11]。地面覆盖多选择地膜(白色、黑色等)、园艺地布、秸秆、砂石和生草等覆盖材料。不同地面覆盖措施的保水增产效果因植物生长阶段、种类和气候类型的不同而呈现较大差异^[12-14]。果树在幼年期阶段,由于根系主要分布在浅层土壤中,果树的水分吸收易受土壤蒸发的影响^[15],因此覆盖措施能够显著提高土壤水分的可用性和果树的水分利用效率和产量。Wu等^[16]研究表明覆盖园艺地布有利于提高幼龄梨树产量。王金锋等^[17]对8年生的‘短枝富士’进行覆盖处理发现有利于提高苹果产量与水分利用效率。已有大量研究探讨了各种覆盖措施对结果初期果树土壤保水和果树增产的影响,对其在调节土壤水分动态和提升产量方面有一定了解^[18-20]。随着果树种植年限的增加,由于果树根系分布重心的下移,盛果期果树增加了深层土壤水分的利用比例,因覆盖措施而增加的表层土壤水分有效性对果树的水分利用和生理特征的影响逐渐减小。同时,盛果期果树由于冠幅和产量的增加,果树对土壤水分需求也随种植年限的增加而加大^[21-22]。盛果期果树对表层土壤水分依赖减小和对土壤总体水分需求增加的矛盾特性

使得覆盖措施对盛果期果园土壤水分动态和产量的影响变得尤为复杂。但目前地面覆盖对盛果期果园土壤水分、果树的产量、品质 and 水分利用效率的影响仍缺乏深入的研究和认识。

本研究拟以晋西地区盛果期苹果树为研究对象,采用野外定位观测的方法,研究不同地面覆盖方式对盛果期苹果园土壤水分、苹果生长、果实产量、品质以及水分利用效率的影响,寻求盛果期苹果园保水提质增产的最优覆盖材料,以期为晋西地区盛果期苹果园选择合适的覆盖模式提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省临汾市吉县永固村(110°42'50" E, 36°3'39" N, 海拔1 115.7 m)。该区为典型的黄土残垣沟壑区,属于温带大陆性气候,年平均气温为10℃,年平均积温为3 357.9℃,年平均无霜期为170 d,年平均降雨为575.9 mm,年平均蒸发量为1 723.9 mm,降雨主要集中于6—9月。试验果园0~100 cm土层土壤平均容重为1.31 g/cm³,平均田间持水量为20.22%。苹果生育期降雨和气温变化见图1。2023年苹果生育期内有效降雨量为305.8 mm,数据来源于试验地田间微型自动气象站。

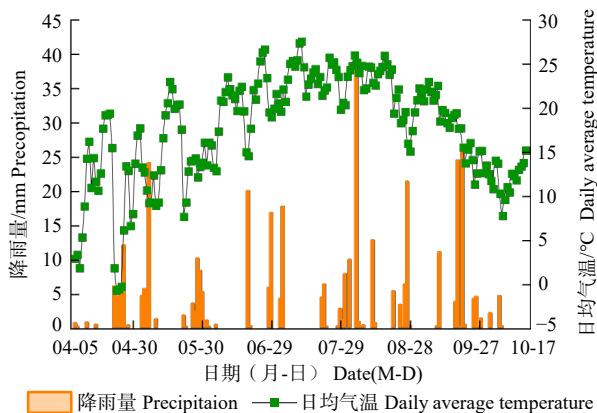


图1 苹果生育期降雨量和气温

Fig. 1 Precipitation and air temperature during apple growth seasons

1.2 试验材料

研究材料为17年生‘红富士’(*Malus pumila* cv. ‘Red Fuji’),嫁接砧木为西府海棠(*Malus* ×

micromalus Makino),属于盛果期果树。株行距为4 m×4 m,南北走向。根据当地‘红富士’的生理生长特征,将苹果生长发育期分为4个时期:萌芽开花期(4月上旬—5月上旬)、叶片拓展期(5月中旬—6月上旬)、果实膨大期(6月中旬—8月中旬)、果实成熟期(8月下旬—10月上旬)。

1.3 试验设计

试验于2023年4—10月进行,采用野外定位观测与随机区组设计,共设置5个处理,分别为清耕(CK)、玉米秸秆覆盖(SM)、园艺地布覆盖(BF)、黑色塑料薄膜覆盖(BM)和白色塑料薄膜覆盖(WM)处理。每个处理设置3次重复,且每个处理选取长势较为一致且相邻的3棵苹果树为研究对象。清耕处理为未进行覆盖的常规耕作管理;玉米秸秆覆盖是将玉米秸秆切割成5 cm长小段,铺设厚度为15 cm;园艺地布覆盖为PE编织材料;黑色地膜覆盖与白色地膜覆盖的地膜厚度均为0.01 mm。覆盖材料铺设于树体两侧,铺设总宽度为3 m,果园行间留出1 m的操作带。各试验小区施肥量一致,且树体管理措施统一,苹果全部进行套袋管理。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 土壤含水量的测定

采用TRIME-T3管式TDR系统(TRIME-PICO-IPH TDR,德国)测定土壤体积含水量。该系统于2022年8月底布设于试验地,每个处理布设3根TRIME管,测量深度为120 cm,分别为0~10、10~20、20~30、30~40、40~60、60~80、80~100、100~120 cm,每个生育期至少测定3次土壤水分数据。

土壤贮水量^[9]计算公式如下:

$$W = 10H\theta \quad (1)$$

式中: W 为土壤贮水量, mm; H 为土层厚度, cm; θ 为土壤体积含水量, cm³/cm³。

果树全生育期总耗水量(ET)采用水量平衡公式^[19]计算,计算公式如下:

$$ET = P + U + R_f - D \pm \Delta W \quad (2)$$

式中: ET 为果树全生育期总耗水量, mm; P 为苹果全生育期的有效降雨总量, 日降雨量>5 mm为有效降雨量, mm; U 为地下水补给量, mm; R_f 为地表径流量, mm; D 为深层渗透量, mm; ΔW 为生育期内土壤贮水变化量, mm; 试验区地下水埋深20 m, 地表径流与深层渗透量较小, 因此忽略地下水补给、

地表径流与深层渗透量。故公式简化为:

$$ET = P \pm \Delta W \quad (3)$$

水分利用效率(WUE)计算公式如下:

$$WUE = \frac{Y}{ET} \quad (4)$$

式中:WUE为水分利用效率,kg/m³;Y为果实产量,kg/hm²。

1.4.2 苹果生长指标的测定

5月初于观测树随机选取8根枝条进行标记,新梢长度与茎粗大致相同,每个处理测定新梢数量为24根。于8月18日苹果树新梢停长时,使用卷尺测定新梢长度,使用游标卡尺测定新梢基部的茎粗。在每棵观测树的东、南、西、北4个方向各选定4根树枝并标记,使用SunScan植物冠层分析系统(Delta T Devices,英国)于上午时段置于树枝底部测定叶面积指数(LAI)。

1.4.3 苹果果实产量和品质的测定

果实采收前一天,统计观测树的结果数和单株果实产量(平均单果重×结果数)进而计算为公顷产量。果实成熟后,分别从观测树东、西、南、北4个方向随机取样,每个处理采集18个具有代表性的果实,其中9个果实测量单果重、果实横纵径与果实硬度,其余9个果实用于测定可溶性固形物含量等果实内在品质。

单果重使用精度为0.01 g的电子天平称量;果实纵横径使用游标卡尺测定;果实硬度使用硬度计(GY-3,中国)测定;可溶性固形物使用数显折光仪(PAL-1,日本)测定,可滴定酸含量采用滴定法测定,可溶性糖含量采用蒽酮比色法^[13]测定,每项指标重复测定3次,最后取平均值。

1.5 经济效益估算与隶属函数分析

经济效益估算公式如下:

$$\text{经济效益} = \text{苹果收购价} \times \text{苹果产量} - \text{总支出} \quad (5)$$

$$\text{总支出} = \text{肥料成本} + \text{农药费} + \text{套袋材料费} + \text{人工费} + \text{覆盖材料费} \quad (6)$$

式中:2023年吉县苹果收购价平均为7.2元/kg;肥料成本(基肥、膨大肥和水溶肥)为24 430元/hm²;农药费为1 750元/hm²;套袋材料费为0.05元/袋;人工费主要包括耕地、除草、修剪果树、套袋、取袋和覆盖人工费等,按照2023年当地平均雇工工资计算为120元/(人·d),秸秆为6元/m³,园艺地布为1.04元/m,黑膜为22.80元/kg,白膜为23.27元/kg。

地膜破损程度≥60%时,需要更换地膜,白色塑料地膜由于透光性较好,杂草生长旺盛导致损坏程度超过60%,于叶片拓展期(6月5日)重新覆盖。

利用模糊隶属函数法^[23]对苹果产量、品质等指标进行综合评价。隶属函数分析:将原始指标进行隶属函数分析,以单果重、结果数、产量和可溶性糖含量等作为正向指标,以可滴定酸含量作为负向指标,依据下式计算隶属函数值。

$$U(X_{ij}) = (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin}) \quad (7)$$

式中:*i*为某处理;*j*为某个指标; $U(X_{ij})$ 为第*i*个处理第*j*个指标的隶属函数值; X_{ij} 为第*i*个处理第*j*个指标的数值; X_{jmin} 与 X_{jmax} 分别为第*j*个指标的最小值和最大值。

权重的确定:根据指标的变异系数依据下式求出各指标的权重。

$$W_j = CV_j / \sum_{j=1}^n CV_j \quad (8)$$

式中: W_j 值表示第*j*个指标在所有指标中的权重; CV_j 为第*j*个指标的变异系数。

综合评价:根据下式计算各处理的综合评价。

$$D = \sum_{j=1}^n [U(X_{ij}) W_j] \quad (9)$$

式中: D 值为每个处理用综合指标评价所得的综合评价。

1.6 数据处理

采用Excel 2019和SPSS 26.0软件对数据进行整理分析,采用单因素方差分析(ANOVA)、以LSD多重比较法与Duncan法进行显著性检验($P < 0.05$ 为差异显著, $P > 0.05$ 为差异不显著),使用Origin 2023软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同覆盖处理对土壤水分的影响

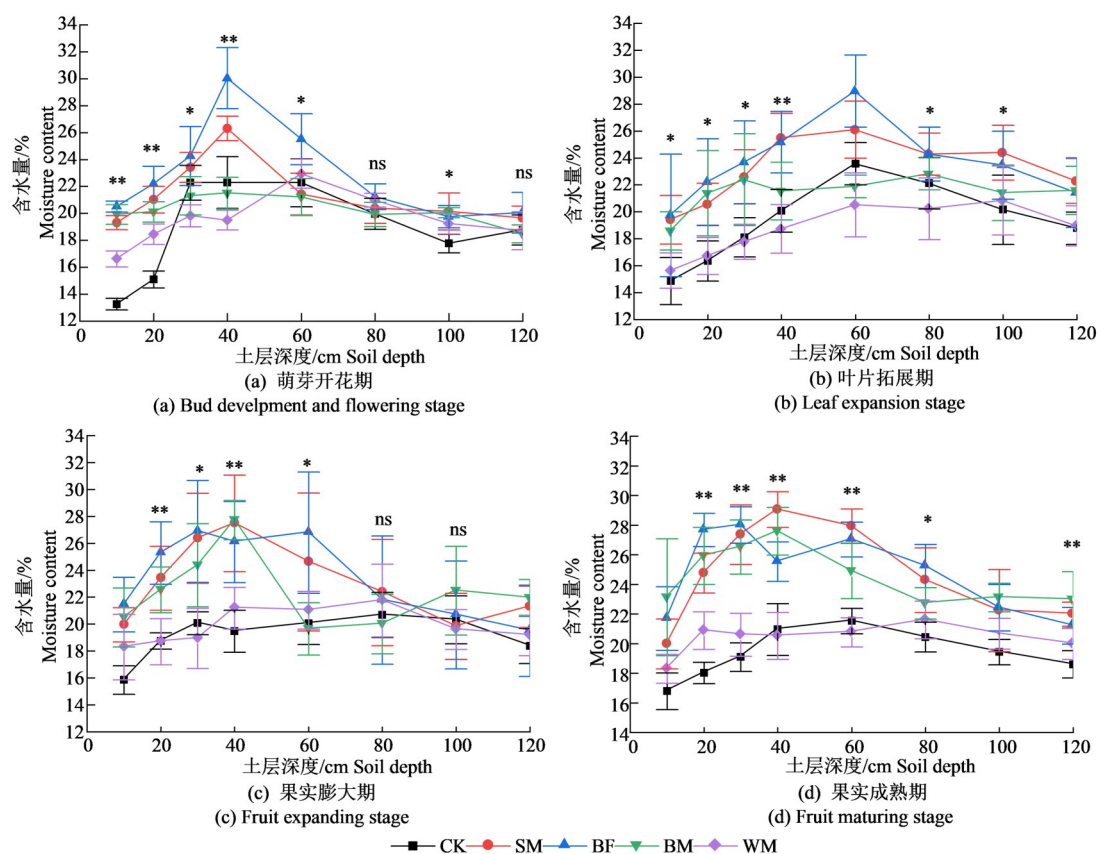
2.1.1 不同覆盖处理土壤水分的垂直动态变化

随生育期推进,不同覆盖处理0~120 cm土层的土壤体积含水量变化规律基本一致,呈现出随土层深度增加而先增后减的趋势,但不同覆盖处理的土壤水分变化幅度有所差异(图2)。各处理土壤体积含水量最大值一般出现于30~60 cm土层,最小值出现于0~10 cm土层。苹果全生育期0~120 cm土层平均土壤体积含水量排序为BF(23.81%±

1.66%) > SM (23.41% ± 1.50%) > BM (22.46% ± 1.79%) > WM (19.57% ± 1.00%) > CK (19.23% ± 0.64%)。

萌芽开花期,覆盖处理显著提高0~20 cm的土壤体积含水量($P < 0.05$),较CK处理表现出良好的保墒作用,SM、BF、BM和WM处理分别CK处理显著提高42.24%、50.56%、41.18%和23.20% ($P < 0.05$);在20~30、60~80、100~120 cm土层各覆盖处理较CK处理没有显著差异。叶片拓展期,0~30 cm土层的土壤体积含水量CK和WM处理没有显著差异,SM、BF和BM处理较CK处理分别显著提高

26.95%、30.84%和26.46% ($P < 0.05$);40~120 cm土层土壤体积含水量SM、BF处理显著高于CK、BM和WM处理($P < 0.05$)。在有效降雨量较大的果实膨大期,各处理整体的0~120 cm土壤体积含水量较萌芽开花期与叶片拓展期出现增加的趋势,分别提升4.70%和1.93%,其中SM处理的0~120 cm平均土壤体积含水量较CK处理增加幅度最大,提高26.66%。果实成熟期,除WM处理外,其他覆盖处理较CK处理0~120 cm土层土壤体积含水量差异增大,覆盖处理显著影响20~60 cm土层土壤体积含水量。



CK, 清耕处理; SM, 秸秆覆盖处理; BF, 园艺地布覆盖处理; BM, 黑色地膜覆盖处理; WM, 白色地膜覆盖处理。 **表示差异极显著 ($P < 0.01$), *表示差异显著 ($P < 0.05$), ns表示差异不显著 ($P > 0.05$)。下同。

CK, clear cultivation treatment; SM, straw mulching treatment; BF, horticultural fabric mulching treatment; BM, black mulching treatment; WM, white mulching treatment. ** represents highly significant differences ($P < 0.01$), * represents significant differences ($P < 0.05$), ns represents no significant differences ($P > 0.05$). The same below.

图2 不同覆盖处理下苹果生育期土壤水分垂直变化

Fig. 2 Vertical changes in soil moisture during apple fertility under different mulching treatments

覆盖处理能够有效减弱土壤水分变异性,0~120 cm土层的土壤水分变异系数总体随土层深度的增加而减小,最后趋于稳定(图3)。不同生育期之间相比较,果实膨大期最大(15.86%),萌芽开花

期最小(10.53%);各处理土壤水分变异系数在0~60 cm土层的波动变化最大,且覆盖处理的土壤水分变异系数均小于CK处理。各处理全生育期0~120 cm土层平均土壤水分变异系数排序为CK

(15.38%)>WM(12.51%)>BM(12.15%)>SM(13.07%)>BF(14.96%),表明覆盖处理有利于提

高土壤水分稳定性并减小土壤水分波动,其中以BF处理表现最佳。

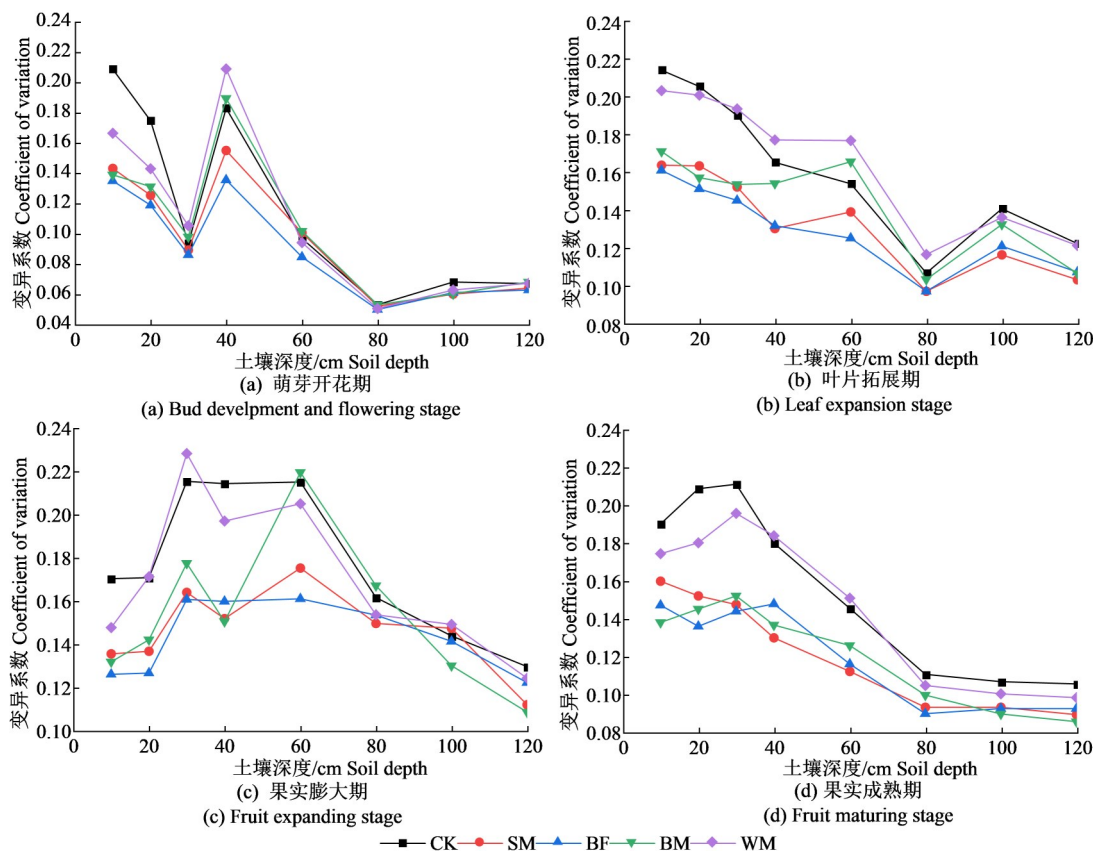


图3 不同覆盖处理下苹果生育期土壤体积含水量的垂直变异特征

Fig. 3 Vertical variability of soil volumetric water content during apple fertility under different mulching treatments

2.1.2 不同覆盖处理对土壤贮水量的影响

覆盖处理显著改善苹果全生育期0~120 cm土层土壤水分状况($P<0.05$),覆盖处理之间具有相近的蓄水保墒能力(图4)。萌芽开花期覆盖处理土壤贮水量显著高于CK处理16.57~48.56 mm($P<0.05$);叶片拓展期SM、BF和BM处理土壤贮水量分别较CK处理提高46.62、51.12和23.70 mm,WM与CK处理无显著差异;而在果实膨大期SM和BF处理分别显著高于CK处理40.83和44.69 mm($P<0.05$),BM、WM和CK处理没有显著差异;果实成熟期BF处理土壤贮水量最高,较CK和WM处理分别提高53.39和42.14 mm,而WM处理较CK处理的土壤贮水量提高11.25 mm,差异不显著。

2.2 不同覆盖处理对苹果新梢生长及叶面积指数的影响

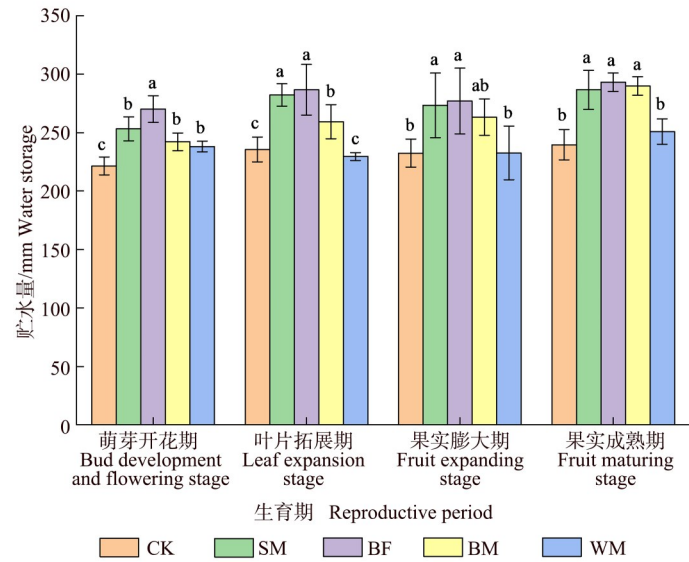
覆盖处理对苹果新梢生长的影响不一。由表1

可知,与CK处理相比,覆盖处理对提升新梢长度具有显著影响,提升幅度为12.15%~17.84%($P<0.05$)。覆盖处理下的新梢茎粗与叶面积指数相较于CK处理没有显著性差异,分别较CK处理减小0.3%~5.9%和增加8.66%~18.9%。覆盖处理对新梢长度和叶面积指数的提升作用均高于CK处理,这主要是由于覆盖处理对土壤水分的提升作用有利于水肥耦合,进而促进叶片和新梢的生长发育。

2.3 不同覆盖处理对苹果产量和果实品质的影响

2.3.1 不同覆盖处理对苹果产量的影响

苹果成熟采摘前一天统计结果数,成熟采摘后进行称重。由表2可知,相比于CK处理,覆盖处理对果树结果数无显著影响,但却显著提升苹果平均单果重4.34%~8.12%($P<0.05$)。覆盖处理通过提高苹果平均单果重,从而提高果实产



不同小写字母代表处理间差异达到显著水平($P<0.05$),相同小写字母代表差异不显著($P>0.05$)。
Different lowercase letters represent the significant difference between at 0.05 level, same letters represent non-significant differences ($P>0.05$).

图4 不同覆盖处理对0~120 cm土层土壤贮水量的影响

Fig. 4 Effects of different mulching treatments on soil water storage in the 0 to 120 cm layer of the soil

表1 不同覆盖处理对苹果新梢生长、叶面积指数的影响

Table 1 Effects of different mulching treatments on apple new shoot growth and leaf area index

处理 Treatment	新梢长度/cm New shoot length	新梢茎粗/mm New shoot diameter	叶面积指数 Leaf area index
CK	31.61±5.07b	6.61±0.77a	1.27±0.87a
SM	37.25±5.46a	6.59±0.56a	1.38±0.87a
BF	35.45±5.13a	6.37±0.69a	1.45±0.90a
BM	35.93±5.11a	6.22±0.56a	1.47±0.83a
WM	35.55±6.75a	6.43±0.63a	1.51±1.07a

注:同列数据的相同字母表示差异不显著($P>0.05$),不同字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Note: Same letters in the same column of data indicate non-significant differences ($P>0.05$), while different letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same below.

表2 不同覆盖处理对苹果果实产量的影响

Table 2 The effect of different mulching treatments on the yield of apple fruit

处理 Treatment	结果数 Fruit number	平均单果重/g Mean fruit weight	产量/(t/hm ²) Yield	水分利用效率/(kg/m ³) Water use efficiency
CK	265.33±6.66a	245.94±9.85b	40.77±0.51d	10.03±0.13c
SM	270.00±8.00a	257.52±10.19a	43.44±0.68c	10.51±0.16a
BF	276.33±8.08a	262.95±8.82a	45.39±0.29a	10.40±0.07ab
BM	269.00±15.04a	265.92±8.73a	44.70±0.87ab	10.24±0.20bc
WM	274.00±19.54a	256.61±9.54a	43.91±0.24bc	10.63±0.06a

量,相较于CK处理,BF处理提升产量效果最优,显著提高11.33%($P<0.05$)。通过对表2中的苹果树WUE分析可知,除BM处理外,其他覆盖处理的水分利用效率相较于CK处理提高3.69%~5.98%($P<0.05$)。

2.3.2 不同覆盖处理对苹果果实品质的影响

不同覆盖处理对苹果果实品质的影响不一(表3)。除果形指数外,相较于CK处理,覆盖处理对苹果果实品质的影响达到显著水平($P<0.05$)。除SM处理外,BF、BM和WM处理的可溶性糖含

量相较于CK处理显著分别提高22.44%、12.62%和11.31%($P<0.05$)。在可滴定酸含量上,BM、BF和SM处理相较于CK处理有效降低7.89%~15.79%($P<0.05$)。而在可溶性固形物含量上,BF处理提升效果最佳,较CK处理显著提高10.78%($P<0.05$),WM处理提升效果最小,较CK处理提高1.93%。不同覆盖处理对果实硬度的影响存在差异,SM与BF处理分别显著高于CK处理22.04%和12.73%($P<0.05$),而BM、WM处理与CK处理无显著差异。

表3 不同覆盖处理对苹果果实品质的影响
Table 3 Effect of different mulching treatments on apple fruit quality

处理 Treatment	可溶性糖含量/% Soluble sugar content	可滴定酸含量/% Titratable acid content	可溶性固形物含量/% Soluble solid content	糖酸比 Glucosinolate ratio	果形指数 Fruit shape index	果实硬度/(kg/cm ²) Fruit hardness
CK	16.71±0.38c	0.38±0.00a	12.43±0.32c	44.20±1.38c	0.85±0.05a	8.80±0.92c
SM	17.47±0.45c	0.32±0.01d	13.00±0.26bc	58.22±2.10a	0.88±0.04a	10.74±1.32a
BF	20.46±0.39a	0.35±0.01bc	13.77±0.25a	58.02±0.71a	0.88±0.08a	9.92±0.63ab
BM	18.82±0.71b	0.34±0.00c	13.27±0.46ab	54.77±3.11a	0.88±0.04a	9.21±0.41bc
WM	18.60±0.31b	0.36±0.00ab	12.67±0.59bc	48.06±1.47b	0.89±0.02a	9.67±1.17bc

2.4 不同覆盖处理的苹果经济效益与综合评价

2.4.1 不同覆盖处理的苹果经济效益

农业生产的最终目的是为了获得更高的经济效益。由表4可知,覆盖处理的套袋成本、人工投入

和覆盖材料投入高于CK处理,但苹果售卖总额显著高于CK处理6.54%~11.33%($P<0.05$),经济效益显著提高7.14%~14.35%,其中BF处理取得的经济效益最高,达233 717.64元/hm²。

表4 不同覆盖处理的苹果经济效益
Table 4 Economic benefit of apple under different mulching treatments 元/hm²

处理 Treatment	肥料成本 Fertilizer cost	农药成本 Pesticide cost	套袋材料费 Bagging material cost	人工费 Labor cost	覆盖材料费 Mulching material cost	苹果售卖总额 Total apple revenue	经济效益 Economic benefit
CK	24 430	1 750	8 358±209.74a	54 630	0	293 547.44±3 677.41d	204 379.44±3 619.82d
SM	24 430	1 750	8 505±252.00a	55 260	6 804.00	312 736.65±4 886.67c	222 791.65±4 825.37bc
BF	24 430	1 750	8 704±254.61a	58 200	5 249.67	326 802.14±2 056.05a	233 717.64±2 029.06a
BM	24 430	1 750	8 484±473.90a	58 200	2 280.00	321 867.21±6 228.52ab	229 003.21±5 761.28ab
WM	24 430	1 750	8 631±300.49a	62 400	3 039.98	316 176.89±1 692.16bc	218 965.89±1 485.38c

2.4.2 综合评价

不同覆盖方式对苹果产量、水分利用效率以及苹果品质的影响存在差异,根据某一指标难以确定最佳覆盖方式,本研究采用模糊隶属函数法对苹果产量、品质及水分利用效率进行综合评价,以期找到晋西地区盛果期苹果园的最佳覆盖方式。通过计算苹果产量、品质、水分利用效率等10个指标的

隶属函数值,各指标的权重以变异系数法为依据确定,最后加权得出各处理的综合分数,对得分进行排序(表5)。最有利的前3种覆盖处理依次为BF、SM和BM处理,其综合得分分别为0.59、0.58和0.45,由此可见BF处理相较于其他处理在一定程度上能更好地提高果实品质、产量与水分利用效率。

表5 不同覆盖处理对苹果产量、水分利用效率及果实品质影响的隶属函数综合评价
Table 5 Comprehensive evaluation of subordinate function on apple yield, water use efficiency and fruit quality

处理 Treatment	平均单果重/g Mean fruit weight	结果数 Fruit number	产量/(t/hm ²) Yield	水分利用效率/ (kg/m ³) Water use efficiency	可溶性糖含量/% Soluble sugar content	可滴定酸含量/% Titratable acidity content
CK	0.14	0.52	0.10	0.16	0.09	0.96
SM	0.48	0.76	0.60	0.77	0.50	0.20
BF	0.65	1.08	0.97	0.62	0.90	0.63
BM	0.73	0.72	0.84	0.43	0.55	0.51
WM	0.45	0.95	0.69	0.92	0.26	0.77
CV	0.04	0.03	0.04	0.02	0.08	0.06
权重 Weight	0.07	0.05	0.06	0.04	0.11	0.09

处理 Treatment	可溶性固形物含量/% Soluble solids content	糖酸比 Glucosinolate ratio	果形指数 Fruit shape index	果实硬度/(kg/cm ²) Fruit firmness	综合得分 Comprehensive score
CK	0.22	0.09	0.58	0.35	0.14
SM	0.50	0.87	0.70	0.62	0.58
BF	0.88	0.86	0.68	0.41	0.59
BM	0.63	0.67	0.70	0.25	0.45
WM	0.33	0.30	0.73	0.42	0.35
CV	0.05	0.11	0.06	0.17	—
权重 Weight	0.07	0.17	0.09	0.25	—

3 讨 论

3.1 土壤水分对覆盖的响应

土壤水分是影响果树生长发育的主要环境因素,即土壤含水量发生微弱变化时,也会极大影响植株的产量^[24]。黄土高原旱作经济林的发展受限于水资源不足,因此改善旱作苹果园土壤水分现状

应考虑提高自然降水利用效率和土壤水分的保蓄能力^[20]。采取地面覆盖措施,阻隔土壤与大气之间的水汽交换和有效降低表层土壤水分的无效蒸发,提高土壤含水量^[16,18-19,24-25]。本研究表明,相较于CK处理,4种覆盖处理有效提高苹果全生育期0~120 cm土层平均土壤体积含水量1.77%~23.82%,其中BF处理的提升效果最佳,SM处理次

之,WM处理效果最差。这可能是由于覆盖材料在降雨入渗效果上的差异导致的,园艺地布是聚丙烯编织而成的一种多孔介质材料^[20],具有良好的渗透性与透气性;而秸秆自身可作为集雨吸收层,有利于提高降雨入渗^[26];白膜作为不渗水材料^[27],减少降雨入渗面积且透光度高,膜下易生长杂草,消耗表层土壤水分。土壤蒸发能力的削弱使得土壤水分保持在相对较高的水平,降低了水分空间变异性,增加了土壤水分垂直分布的稳定性^[5,28]。本研究表明,不同覆盖处理下0~60 cm土层土壤水分变异系数变化最大,而60~120 cm土层变化相对稳定,各处理间的整体土壤水分变异性为CK>WM>BM>SM>BF,这与张杰等^[29]的研究结果一致,表明覆盖有利于降低土壤水分变异性。

大量研究表明地面覆盖通过抑制土壤水分蒸发,最大限度贮存土壤水分以供植物生长发育,进而协调植物生长需水与土壤水分不足之间的矛盾^[10-12]。本研究表明,相较于CK处理,覆盖处理有效提高全生育期贮水量6.41~29.97 mm,这与尹晓宁等^[30]的研究结果一致。覆盖处理在苹果不同生育期的贮水效果存在差异,表现为BF>SM>BM>WM>CK。可能是由于玉米秸秆、园艺地布覆盖属于半封闭式覆盖,有利于降雨入渗至深层土壤^[31];而秸秆覆盖会吸纳部分降雨,在干燥期间蒸发^[32];地膜覆盖属于全封闭式覆盖^[33],减少入渗面积与降雨从膜面流失,而黑膜相较于白膜具有较好的调温作用,避免白膜覆盖导致的长期高温引起的土壤水分过度蒸散^[34],且白膜的透光性导致杂草生长旺盛消耗表层土壤水分,因此黑膜覆盖相较于白膜覆盖具有更好的贮水效果。

3.2 不同覆盖方式对苹果生长的影响

本研究表明,覆盖处理显著提高新梢长度,而对新梢茎粗与叶面积指数没有显著影响,其中SM处理的新梢长度提升幅度最大。这与廖阳等^[19]、尹晓宁等^[30]的研究结果相似。可能是由于覆盖后土壤含水量增加与对地温调控效应加速土壤养分转化,提升根系活性^[13],从而提高根系吸收水肥能力,有利于新梢生长;而秸秆覆盖过程中会进行腐解增加土壤养分含量,因而SM处理提升幅度最大。而玉米秸秆覆盖对土壤温度、养分的影响及其变化对盛果期苹果生长的调节机制需要进一步研究。

地面覆盖通过改善果树生长的微环境促进果

树生长发育,从而提高果实产量与改善果实品质^[13,35]。本研究表明,与CK处理相比,覆盖处理的平均单果重、结果数、可溶性糖、可溶性固形物、糖酸比和果实硬度等指标有所提高,可滴定酸含量有所降低。研究结果与王金锋等^[10]、李宏建等^[13]的研究结果相同。可能是由于覆盖提高土壤含水量与小气候的改善,影响苹果的光合反应,促进果实干物质积累,从而增加单果重与可溶性固形物含量^[35]。地面覆盖提升果实可溶性糖含量可能是由于覆盖措施改善土壤水分状况,增加蔗糖合成酶的酶活性,降低分解方向的蔗糖磷酸合成酶活性,有利于蔗糖的合成反应。而覆盖对可滴定酸含量的影响没有统一的规律,大量研究表明地面覆盖可以有效减少可滴定酸含量^[13,35],但也有其他研究持相反的结论^[36]。本研究表明,覆盖处理相较于CK处理可以有效降低可滴定酸含量5.26%~15.79%。可能是由于降低了有机酸相关合成酶的活性与“生理稀释”,即增大果实含水量导致果实有机酸含量降低^[37],最终降低可滴定酸含量。

覆盖措施对土壤水分的影响最终会反映在苹果生长、产量和水分利用效率方面^[38],提高水分利用效率的2个主要方式为提高果实产量与降低耗水量。王永亮等^[39]研究表明,覆膜处理、秸秆覆盖处理相较于无覆盖处理提高水分利用效率8.75%和19.87%。本研究表明,相较于CK处理,覆盖处理显著提高苹果产量6.55%~11.33%,提高水分利用效率2.09%~5.98%,其中BF处理的增产效果最佳。主要是由于相较于其他处理,BF处理显著提高萌芽开花期的土壤贮水量,有利于防止落花落果;且果实膨大期对水分的需求大,土壤贮水量的提升有利于果实细胞分裂膨大与干物质积累,覆盖处理由于果实产量的增加与土壤水分的贮存有利于提高自然降雨的水分利用效率。

选择地面覆盖的主要目标是增产提效和增加经济效益,但涉及的评价指标繁多且关联性较强,大多数针对苹果园地面覆盖的研究都只对某一指标、某几个指标或经济效益进行单独的评价。本研究为了研究地面覆盖对盛果期苹果树生长、产量和WUE等指标的影响,通过采用隶属函数综合评分法对苹果产量、水分利用效率和品质等各项指标进行综合评价,加以经济效益评价,发现选用园艺地布覆盖的综合评分最佳(0.59)和经济效益最高

(233 717.64元/hm²), 秸秆覆盖的综合评分次之(0.58)和经济效益较好(222 791.65元/hm²)。在追求经济利益的同时, 应该考虑覆盖处理下的生态效益。覆盖材料的选取应符合清洁生产与可持续发展的原则, 园艺地布可循环利用, 避免了像塑料地膜难以回收残膜导致土壤恶化的问题; 秸秆是农业可再生资源, 利用秸秆覆盖降低了秸秆焚烧对环境污染的风险。因此, 使用园艺地布和秸秆覆盖在提高经济效益的同时, 可促进当地农业的可持续发展与增加生态效益^[40]。但考虑园艺地布覆盖的经济效益高于秸秆覆盖, 因而优先选择园艺地布覆盖。

4 结 论

晋西地区盛果期苹果园中, 与清耕处理相比, 地面覆盖通过隔绝表层土壤水分蒸散, 提高土壤含水量, 降低土壤水分变异系数, 改善盛果期果树生长的水分环境, 促进树体生长, 达到增产提质和增加经济效益的效果。与其他覆盖处理相比, 园艺地布覆盖的保水作用最佳, 增加土壤贮水量0.08~29.98 mm, 产量提高1.54%~4.49%, 综合评分最高(0.59), 经济效益提高2.06%~6.74%。因此园艺地布覆盖可作为晋西地区盛果期苹果园一种高效可持续利用的管理措施。

参考文献 References

- [1] 戴安然, 霍治国, 姜会飞. 中国苹果旱涝灾害研究进展[J]. 中国农业气象, 2022, 43(5): 362-379
Dai A R, Huo Z G, Jiang H F. Review on drought and waterlogging disasters for apple in China [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2022, 43(5): 362-379 (in Chinese)
- [2] Yang M, Wang S F, Zhao X N, Gao X D, Liu S. Soil properties of apple orchards on China's Loess Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 723: 138041
- [3] 中华人民共和国农业农村部. 2022年度全国苹果种植面积与产量数据[EB/OL]. [2024-07-24]. <http://zdsxxx.moa.gov.cn>
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. National apple cultivation area and production data, 2022[EB/OL]. [2024-07-24]. <http://zdsxxx.moa.gov.cn> (in Chinese)
- [4] Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO statistical databases[EB/OL]. [2024-07-24]. <https://www.fao.org>
- [5] 王延平, 韩明玉, 张林森, 毛晨鹏, 雷玉山. 陕西黄土高原苹果园土壤水分分异特征[J]. 林业科学, 2013, 49(7): 16-25
Wang Y P, Han M Y, Zhang L S, Mao C P, Lei Y S. Spatial characteristics of soil moisture of apple orchards in the Loess Plateau of Shaanxi Province[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(7): 16-25 (in Chinese)
- [6] 刘星, 曹红霞, 廖阳, 周宸光. 滴灌模式对黄土高原苹果树生长、产量及根

- 系分布的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 57-66, 120
Liu X, Cao H X, Liao Y, Zhou C G. Effects of drip irrigation methods on the growth, yield and root distribution of apple trees on the Loess Plateau [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(4): 57-66, 120 (in Chinese)
- [7] 陈锡云, 刘文兆. 半干旱黄土丘陵区果园水分蒸散特征研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(3): 67-70, 121
Chen X Y, Liu W Z. Evapotranspiration from apple orchard in semi-arid loess hilly and gully region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(3): 67-70, 121 (in Chinese)
 - [8] 刘威宏, 王延平, 韩明玉, 李生光, 张林森, 穆艳. 根区滴灌对干旱山地苹果树生长发育和结实的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(7): 40-45, 77
Liu W H, Wang Y P, Han M Y, Li S G, Zhang L S, Mu Y. Effect of root-area trickle-irrigation on growth and development of apple trees at arid hilly region [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(7): 40-45, 77 (in Chinese)
 - [9] 靳姗姗, 汪星, 汪有科, 余檀. 不同覆盖措施对减少枣林休眠期土壤水分损失的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 153-160
Jin S S, Wang X, Wang Y K, She T. Effects of typical mulching patterns on soil water loss in jujube land during dormancy period [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(14): 153-160 (in Chinese)
 - [10] 王金锋, 张林森, 张永旺, 韩晓毓, 李喜凤, 王延平, 李丙智. 地布覆盖对渭北旱塬苹果园土壤水热效应及产量品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(1): 75-78, 84
Wang J F, Zhang L S, Zhang Y W, Han X Y, Li X F, Wang Y P, Li B Z. Effects of ground cloth mulching on soil water, temperature, yield and quality in apple orchard in Weibei Plateau [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(1): 75-78, 84 (in Chinese)
 - [11] 郑悦, 李会科, 张泰然, 杨剑锋, 张荣琴, 张越阳, 王雷存. 园艺地布微垄覆盖对渭北旱地矮化苹果根域土壤水分的影响[J]. 西北农业学报, 2019, 28(4): 631-640
Zheng Y, Li H K, Zhang T R, Yang J F, Zhang R Q, Zhang Y Y, Wang L C. Effects of black ground fabric micro-ridge mulching on root zone soil moisture of dwarf apple in Weibei dryland, China [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2019, 28(4): 631-640 (in Chinese)
 - [12] 高茂盛, 廖允成, 李侠, 黄金辉. 不同覆盖方式对渭北旱作苹果园土壤贮水的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(10): 2080-2087
Gao M S, Liao Y C, Li X, Huang J H. Effects of different mulching patterns on soil water-holding capacity of non-irrigated apple orchard in the Weibei Plateau [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(10): 2080-2087 (in Chinese)
 - [13] 李宏建, 王宏, 于年文, 张秀美, 里程辉, 宋哲. 地面覆盖对苹果树体生长和果实品质的影响[J]. 果树学报, 2019, 36(3): 296-307
Li H J, Wang H, Yu N W, Zhang X M, Li C H, Song Z. Effects of mulching on the growth and fruit quality of apple trees [J]. *Journal of Fruit Science*, 2019, 36(3): 296-307 (in Chinese)
 - [14] 莫非, 周宏, 王建永, 赵鸿, 张恒嘉, 吴娜, 陈应龙, 杨通, 邓浩亮, Asfa Batool, 王润元, Simon Nzou Nguluu, 李凤民, 熊友才. 田间微集雨技术研究及应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 1-17
Mo F, Zhou H, Wang J Y, Zhao H, Zhang H J, Wu S, Chen Y L, Yang T, Deng H L, Batool A, Wang R Y, Nzou Nguluu S, Li F M, Xiong Y C. Development and application of micro-field rain-harvesting technologies [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(8): 1-17 (in Chinese)
 - [15] 李陆生, 赵西宁, 高晓东, 吴普特, 李虹辰, 凌强, 孙文浩. 黄土丘陵区不

- 同树龄旱作枣园细根空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 140-146
- Li L S, Zhao X N, Gao X D, Wu P T, Li H C, Ling Q, Sun W H. Influences of stand age on root patterns in a rain-fed jujube (*Ziziphus jujube*) plantation of Loess Plateau in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(20): 140-146 (in Chinese)
- [16] Wu Y, Sun M D, Liu S Z. Mulching broad ridges with a woven polypropylene fabric increases the growth and yield of young pear trees 'Yuluxiang' in the North China Plain [J]. *Horticultural Plant Journal*, 2023, 9(3): 414-424
- [17] 王金锋, 李丙智, 王俊峰, 杨小妮, 罗艳君, 董海强, 张林森. 微集雨技术对渭北旱塬苹果园土壤温度、果实产量及水分利用效率的影响[J]. 西北农业学报, 2016, 25(1): 72-79
- Wang J F, Li B Z, Wang J F, Yang X N, Luo Y J, Dong H Q, Zhang L S. Effects of rainwater harvesting technology on soil temperature, yield and water use efficiency in an apple orchard in Weibei highland [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2016, 25(1): 72-79 (in Chinese)
- [18] Suo G D, Xie Y S, Zhang Y, Luo H. Long-term effects of different surface mulching techniques on soil water and fruit yield in an apple orchard on the Loess Plateau of China [J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 246: 643-651
- [19] 廖阳, 曹红霞, 刘星, 薛文凯. 覆盖及亏缺灌溉对山地苹果生长、耗水及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 47-56
- Liao Y, Cao H X, Liu X, Xue W K. The effects of mulching and deficit irrigation on growth, evapotranspiration and yield of mountain apple trees [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(4): 47-56 (in Chinese)
- [20] 杨诗雨, 曹红霞, 孙涛, 南学平, 赵凯, 李志军. 地布和生草二元覆盖对关中猕猴桃园土壤水分、果树生长和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(4): 187-197
- Yang S Y, Cao H X, Sun T, Nan X P, Zhao K, Li Z J. Effects of dual mulching on soil moisture, growth and yield of kiwifruit in Guanzhong Plain [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(4): 187-197 (in Chinese)
- [21] 王绍飞, 赵西宁, 高晓东, 霍高鹏, 潘燕辉. 黄土丘陵区盛果期苹果园土壤水分利用策略[J]. 林业科学, 2018, 54(10): 31-38
- Wang S F, Zhao X N, Gao X D, Huo G P, Pan Y H. Water use source of apple trees with full productive age in Loess Hilly Region [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, 54(10): 31-38 (in Chinese)
- [22] 赵西宁, 李楠, 高晓东, 霍高鹏, 潘燕辉. 基于 ^{18}O 示踪的不同树龄枣园土壤水分利用特征分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 135-142
- Zhao X N, Li N, Gao X D, Huo G P, Pan Y H. Characteristics of soil water utilization for different stand ages of jujube trees based on ^{18}O tracking [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(3): 135-142 (in Chinese)
- [23] 刘星, 曹红霞, 廖阳, 周宸光, 李黄涛. 滴灌模式对苹果光合特性、产量及灌溉水利用的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(15): 3264-3278
- Liu X, Cao H X, Liao Y, Zhou C G, Li H T. Effects of drip irrigation methods on photosynthetic characteristics, yield and irrigation water use of apple [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(15): 3264-3278 (in Chinese)
- [24] Liu Y, Li S Q, Chen F, Yang S J, Chen X P. Soil water dynamics and water use efficiency in spring maize (*Zea mays* L.) fields subjected to different water management practices on the Loess Plateau, China [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(5): 769-775
- [25] Yan Q Y, Dong F, Lou G, Yang F, Lu J X, Li F, Zhang J C, Li J H, Duan Z Q. Alternate row mulching optimizes soil temperature and water conditions and improves wheat yield in dryland farming [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(11): 2558-2569
- [26] Liu Y, Wang J, Liu D B, Li Z G, Zhang G S, Tao Y, Xie J, Pan J F, Chen F. Straw mulching reduces the harmful effects of extreme hydrological and temperature conditions in Citrus orchards [J]. *PLoS One*, 2014, 9(1): e87094
- [27] 张玉洁, 王宁, 杨彬, 王凤新. 不同颜色地膜覆盖对盐碱地水热盐状况及向日葵产量和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(11): 1-10
- Zhang Y J, Wang N, Yang B, Wang F X. Effects of plastic mulch film color on moisture-heat-salt and water use efficiency of sunflower in saline-alkali land [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2023, 42(11): 1-10 (in Chinese)
- [28] 普雪可, 吴春花, 周永瑾, 勉有明, 苗芳芳, 侯贤清, 李荣. 宁南旱区地膜秸秆沟垄双覆盖对土壤水分时空变化及马铃薯产量的影响[J]. 草业学报, 2020, 29(10): 149-160
- Pu X K, Wu C H, Zhou Y J, Mian Y M, Miao F F, Hou X Q, Li R. Effects of dual-mulching of furrow and ridge with plastic film and straw on temporal and spatial changes of soil moisture and potato yield in dry-farming areas of southern Ningxia [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(10): 149-160 (in Chinese)
- [29] 张杰, 任小龙, 罗诗峰, 海江波, 贾志宽. 环保地膜覆盖对土壤水分及玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 14-19
- Zhang J, Ren X L, Luo S F, Hai J B, Jia Z K. Influences of different covering materials mulching on soil moisture and corn yield [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(6): 14-19 (in Chinese)
- [30] 尹晓宁, 董铁, 孙文泰, 牛军强, 刘兴禄, 马明. 陇东旱地苹果园不同地面覆盖模式的水分与养分效应[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 117-126
- Yin X N, Dong T, Sun W T, Niu J Q, Liu X L, Ma M. Effects of different soil surface mulching patterns on soil moisture and nutrient in dryland apple orchard in east Gansu Province [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(20): 117-126 (in Chinese)
- [31] 马建涛, 程宏波, 陈玉章, 李亚伟, 兰雪梅, 李瑞, 柴雨葳, 常磊, 柴守玺. 不同覆盖方式对旱地马铃薯耗水特性和产量的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(7): 2242-2250
- Ma J T, Cheng H B, Chen Y Z, Li Y W, Lan X M, Li R, Chai Y W, Chang L, Chai S X. Effects of different mulching practices on soil water consumption and potato *Tuber* yield in dryland farming [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(7): 2242-2250 (in Chinese)
- [32] Kader M A, Nakamura K, Senge M, Mojid M A, Kawashima S. Numerical simulation of water- and heat-flow regimes of mulched soil in rain-fed soybean field in central Japan [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 191: 142-155
- [33] 刘青, 马建涛, 韩凡香, 杨成存, 黄彩霞, 程宏波, 柴守玺, 常磊. 不同覆盖材料对旱地马铃薯土壤水分和耗水的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 197-205
- Liu Q, Ma J T, Han F X, Yang C C, Huang C X, Cheng H B, Chai S X, Chang L. Effects of different mulching materials on soil moisture and water consumption of potato in dryland [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(6): 197-205 (in Chinese)
- [34] 杨封科, 何宝林, 董博, 王立明. 不同降雨年型黑膜垄作对土壤水肥环境

- 及马铃薯产量和效益的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(20): 4312-4325
- Yang F K, He B L, Dong B, Wang L M. Effects of black film mulched ridge-furrow tillage on soil water-fertilizer environment and potato yield and benefit under different rainfall year in semiarid region [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(20): 4312-4325 (in Chinese)
- [35] 钟韵, 朱士江, 费良军, 代智光, 王亚林, 李虎, 张礼杰. 幼果期调亏对不同覆膜柑橘产量品质及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(1): 81-91
- Zhong Y, Zhu S J, Fei L J, Dai Z G, Wang Y L, Li H, Zhang L J. Effects of regulating deficit at young fruit stage on yield, quality, and water use efficiency of *Citrus* with different plastic film materials [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(1): 81-91 (in Chinese)
- [36] 曾译可, 石莹, 陈思怡, 李国敬, 黄先彪, 谢宗周, 李春龙, 郭大勇, 刘继红. 地面覆膜提升椪柑果实品质的效果和可能机制探究[J]. 园艺学报, 2022, 49(11): 2419-2430
- Zeng Y K, Shi Y, Chen S Y, Li G J, Huang X B, Xie Z Z, Li C L, Guo D Y, Liu J H. Effects of film mulching on improving fruit quality of ponkan and possible mechanisms[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2022, 49(11): 2419-2430 (in Chinese)
- [37] Jiang N, Jin L F, Teixeira da Silva J A, Islam M Z, Gao H W, Liu Y Z, Peng S A. Activities of enzymes directly related with sucrose and citric acid metabolism in *Citrus* fruit in response to soil plastic film mulch[J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, 168: 73-80
- [38] Zhang H, Miles C, Gerdeman B, LaHue D G, DeVetter L. Plastic mulch use in perennial fruit cropping systems: A review [J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 281: 109975
- [39] 王永亮, 胥子航, 李申, 梁哲铭, 白炬, 杨治平. 不同覆盖措施对土壤水热状况及春玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 作物学报, 2024, 50(5): 1312-1324
- Wang Y L, Xu Z H, Li S, Liang Z M, Bai J, Yang Z P. Effects of different mulching measures on moisture and temperature of soil and yield and water use efficiency of spring maize [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(5): 1312-1324 (in Chinese)
- [40] 马建涛, 柴守玺, 程宏波, 常磊. 农田秸秆覆盖技术及其应用研究进展[J]. 生态学杂志, 2022, 41(3): 597-602
- Ma J T, Chai S X, Cheng H B, Chang L. Research progress of straw mulching technology and its application in farmland [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(3): 597-602 (in Chinese)

责任编辑: 董金波



第一作者简介: 刘文球, 北京林业大学硕士研究生。本科毕业于南京林业大学。硕士研究生期间, 获北京林业大学一等学业奖学金、二等学业奖学金各1次。曾先后参与国家自然科学基金项目和面上项目各1项。



通讯作者简介: 韩玉国, 北京林业大学教授, 博士生导师。中国植物营养与肥料学会生态环境专业委员会委员、北京农业工程学会理事, 科技部重点研发计划入库专家、北京市规划和自然资源委员会入库专家。主要从事水土保持于荒漠化防治、流域面源污染治理、农田水土资源高效利用等方面的研究。主持国家自然科学基金项目、国家重点研发计划等10项。获省部级奖励5项。共发表学术论文60余篇, 其中SCI论文30余篇; 申请国家发明专利和实用新型专利各1项; 参编专著6部。