

绿肥间作对渭北果园土壤水分、养分及苹果产量的影响

梁青¹, 张体彬^{1,2}, 程煜^{3,4}, 高伟强^{3,4}, 邝雨欣², 冯浩^{1,2}

(1. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 研究渭北苹果园不同种类绿肥间作及其结合地布覆盖在土壤蓄水保墒、养分供给和果实产量提升方面的效应。[方法] 设置黑麦草(R)、油菜(O)、苜蓿(A)3种绿肥和不覆地布(NG)、覆盖地布(G)2种覆盖方式, 以清耕为对照(CK)。不覆地布+绿肥间作为主处理, 覆盖地布+绿肥间作为副处理。在主处理和对照各小区分别设置¹⁵N田间示踪微区。探究苹果-绿肥间作系统土壤水分、养分及果实产量的响应。[结果] 各处理土壤质量含水率均低于CK处理, GR处理下降幅度最小(1.7%)。主处理土壤水分差异率均为负值, 其中NGR处理绝对值最低(0.5%), NGA处理最高(4.7%)。各处理作物蒸散量均大于CK, 其中GR处理增幅最小(0.3%)。各处理0~60 cm硝态氮平均值均低于CK。与副处理相比, 主处理硝态氮及铵态氮平均提升6.8%和5.4%。间作绿肥(NGR、NGO、NGA)平均减少56.4%的¹⁵N损失($p<0.05$), 苜蓿¹⁵N利用率最高(39.4%), 黑麦草最低(19.7%)。与CK处理相比, 黑麦草间作处理(NGR、GR)土壤有机质与全氮平均提升1.5%和0.2%, 而苜蓿间作处理则分别降低15.2%和15.4%。黑麦草间作处理(NGR、GR)的果实产量与水分利用效率最高, 分别较CK处理提升12.1%和8.8%($p<0.05$)。[结论] 综合考虑, 在渭北苹果园内采用树下覆地布+行间间作黑麦草(GR)的二元覆盖模式有助于减少土壤水分消耗与养分损失, 增加果实产量和水分利用效率。

关键词: 二元覆盖; 种间互作; ¹⁵N同位素示踪; 苹果园

中图分类号: S151.9; S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)02-0250-10

Effects of Green Manure Intercropping on Soil Moisture, Nutrients, and Apple Yield in a Weibei Apple Orchard

LIANG Qing¹, ZHANG Tabin^{1,2}, CHENG Yu^{3,4}, GAO Weiqiang^{3,4}, KUANG Yuxin², FENG Hao^{1,2}

(1. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] We conducted a field experiment to investigate the effects of intercropping green manure crops and their combination with ground fabric mulching on soil moisture, fertility, and apple yield. [Methods] The main treatments included intercropping ryegrass (NGR), oilseed rape (NGO), and alfalfa (NGA), the sub-treatments included combining these intercropping modes with mulching ground fabric under apple trees (GR/GO/GA), and the control treatment was traditional clean tillage (CK). Additionally, ¹⁵N labeled microplots were set up within the main and control treatments. The responses of soil moisture, nutrients, and fruit yield were explored under the

收稿日期: 2024-10-07

修回日期: 2024-12-04

录用日期: 2024-12-10

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-01-21

资助项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1900700); 陕西省重点研发计划项目(2023-ZDLNY-53); 陕西省创新能力支撑计划项目(2022PT-23); 中国科学院“西部之光”项目(XAB2022YW04)

第一作者: 梁青(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: liangqing2021@163.com

通信作者: 张体彬(1983—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: zhangtabin@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

apple-green manure intercropping system. [Results] All treatments reduced soil water content (SWC) compared to CK, among which the decreasing range of GR (1.7%) was the smallest. Soil water difference ratio (SWDR) in the main treatments were all negative, among which NGR and NGA had the smallest (0.5%) and largest (4.7%) absolute value, respectively. All treatments increased evapotranspiration (ET) compared to CK, among which the increasing range of GR (0.3%) was the smallest. All treatments reduced soil nitrate-nitrogen (SNN) content, compared to CK. Compared to the sub-treatments, SNN and soil ammonium-nitrogen (SAN) contents in the main treatments increased by 6.8% and 5.4% on average. Intercropping green manure (NGR, NGO, and NGA) reduced ^{15}N loss by an average of 56.4% ($p < 0.05$), compared to CK, with alfalfa and ryegrass showing the highest (39.4%) and lowest (19.7%) ^{15}N utilization efficiency, respectively. Compared to CK, ryegrass intercropping treatments (NGR and GR) increased SOM and TN contents by an average of 1.5% and 0.2%, respectively. In contrast, alfalfa (NGA and GA) intercropping treatments decreased SOM and TN contents by an average of 15.2% and 15.4%, compared to CK. Ryegrass intercropping treatments (NGR and GR) showed the highest fruit yield and water use efficiency, with an average increase of 12.1% in yield and 8.8% in water use efficiency, compared to CK ($p < 0.05$). [Conclusion] Adopting the binary mulching pattern (ground fabric mulching under apple trees + ryegrass intercropping between rows) is beneficial to decreasing water consumption, nutrient loss, and increasing fruit yield and water use efficiency.

Keywords: binary mulching; interspecific interaction; ^{15}N isotope tracer; apple orchard

Received: 2024-10-07

Revised: 2024-12-04

Accepted: 2024-12-10

Online (www.cnki.net): 2025-01-21

苹果是全球最重要的水果之一,2021年中国苹果种植面积和产量分别占世界总量的43.4%和49.4%,均居世界首位^[1]。位于黄土高原沟壑区的陕西省渭北地区,由于其得天独厚的地理优势,已成为中国乃至世界的苹果优生区^[2]。但土壤水分和养分的亏缺始终制约着当地苹果产业的发展。当地降雨大多发生在7—9月,这些降雨又受高温影响而通过蒸发损失掉^[3]。当地果园土壤有机质为5.4~9.3 g/kg,较中国其他苹果产区(6.5~15.6 g/kg)都低^[4]。

覆盖是干旱半干旱农林业提高土壤水分的主导措施^[5],具有改善土壤水分状况、减少土壤流失及增加生物活性等作用^[6-7]。覆盖措施可以分为非生物覆盖措施与生物覆盖措施,非生物覆盖措施主要包括地布覆盖、秸秆覆盖、砾石覆盖等,具有改善土壤水热状况的作用^[8],李发康等^[9]在甘肃静宁苹果园的研究结果表明,园艺地布覆盖对于提升土壤保水能力具有较好的效果。生物覆盖措施以生草覆盖为主要代表,具有改善土壤理化性质,减少地表径流与土壤侵蚀等作用^[6,10-12]。张先来等^[13]在渭北苹果园的研究结果表明,种植生草能够改善土壤结构,提升土壤持水能力;HUANG等^[14]研究发现,与常规耕作相比,覆盖作物增加入渗水量和土壤水分;REN等^[15]通过对中国果园生草的作用效果进行Meta分析得出,果园长期种植生草对于土壤质量的改善具有积极影响,随着生草种植年限的增加,土壤全氮质量分数增

幅达3.05%;XIANG等^[16]通过对影响生草覆盖果园土壤有机碳储量的因素进行Meta分析后发现,生草覆盖对于增加中国果园0~30 cm土层土壤有机碳储量来说是一种具有前景的做法。然而,也有研究表明,生草覆盖会造成其与果树争夺水分,如SUO等^[8]通过研究不同覆盖技术对黄土高原苹果园土壤水分的长期效应发现,随着种植年限的增加,生草覆盖造成土壤水分状况变差,加剧深层土壤的干燥化;FANG等^[17]在渭北黄土高原苹果园的研究表明,果园生草在干旱区的旱季会降低土壤水分体积分数;李会科等^[18]在渭北苹果园的相关研究表明,生草生长早期对土壤养分的消耗大于其累积效应,并且在0~40 cm土层牧草与果树存在养分竞争;DU等^[19]在陕西延安杏园的试验表明,沙打旺不适宜在干旱的陕北黄土高原丘陵沟壑区间作,造成沙打旺与果树之间的水分和养分竞争。因此,探究苹果-绿肥间作系统水分及养分利用状况显得十分必要。目前,关于果园生草覆盖研究,大多聚焦于单一生草种类,对于间作不同种类绿肥及其结合地布覆盖措施的效果对比研究较少。因此,本研究以渭北果园为研究对象,以不同种类绿肥间作措施为主,地布覆盖措施为辅,同时结合 ^{15}N 同位素示踪技术,探究苹果-绿肥间作系统土壤水分、养分及果实产量的响应,以期寻求适宜当地的生产模式,为渭北黄土高原沟壑区苹果园优质生产提供科学依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地处陕西省咸阳市旬邑苹果试验站(35°01'37"N,108°27'34"E),当地属于典型的黄土高原沟壑区。气候类型为温带大陆性季风气候,降雨大多发生在7—9月,年平均降水量为714.2 mm,年平均气温9.5℃(依据1990—2020年旬邑县气象数据),平均海拔1430 m,日照时间2390 h,无霜期170 d,昼夜温差12.6℃。

试验地土壤基本理化性质为:0~100 cm土层土壤体积质量1.5 g/cm³,0~60 cm土层土壤有机质14.2 g/kg,全氮0.8 g/kg,硝态氮10.7 mg/kg,铵态氮5.6 mg/kg。

1.2 试验设计

田间试验于2022年5—10月进行,其间降雨量为516.3 mm(图1)。基于旬邑县1990—2020年相应时期降水数据进行排频计算、配线,得出2022年试验时期降雨量对应频率值为72.2%,因此,认定试验期间为典型丰水期。

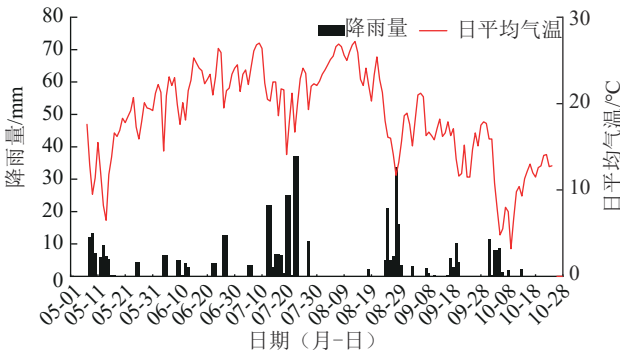


图1 试验期间日降雨量与日平均气温
Fig. 1 Daily precipitation and mean daily temperature during the trial

试验地苹果树(*Malus pumila* M.)种植于2016年,

株行距1.5 m×4.0 m,砧木为M26自根砧,栽培方式为矮化密植。黑麦草(*Lolium perenne* L.)、油菜(*Brassica napus* L.)和苜蓿(*Medicago sativa* L.)播种于2022年5月,3种绿肥作物种植于果树行间(3 m宽),播种量均为15 kg/hm²,播后定期除草。试验期间,未对3种绿肥作物进行灌溉施肥,试验结束后,将绿肥作物翻压还田。沿行向在树干两侧分别修筑宽度为50 cm的弧形垄,垄上覆园艺地布。在试验地块两侧设置有保护行,所有措施与试验行相同。其余管理措施与当地保持一致。果树日常灌溉和施肥采用滴灌,滴灌带位于果树行地面以上50 cm处。

试验设置主处理、副处理及对照组,主处理为果树行间间作绿肥(黑麦草、油菜、苜蓿);副处理为果树行间间作绿肥结合树下覆盖园艺地布,对照组为传统的清耕(树下不覆地布,行间及树下定期松耕除草)。副处理并非简单的对照处理,而是基于主处理的改进,目的是探究绿肥间作结合地布覆盖对土壤改良及作物生长的影响。试验共计7个处理(表1),每个处理3个重复,每个小区面积为60 m²(15 m×4 m),采用随机区组排列。在主处理及对照组各小区中分别设置1个田间示踪微区,用于苹果-绿肥间作系统氮素示踪研究。在各小区内随机挑选1棵果树,将长、宽、深为1.0 m×1.0 m×1.1 m的无底铁皮框埋入地下1 m深的位置,包裹住果树(图2)。于2022年7月在各田间示踪微区内施加10 g¹⁵N同位素标记物(¹⁵NH₂CO¹⁵NH₂,上海化工研究院,丰度10.02%),将10 g标记物完全溶解于喷壶中,而后均匀喷洒在田间示踪微区内,最后在表面覆盖薄土。微区内的绿肥种类、播种量及时间与小区内保持一致;水肥管理与当地保持一致。

表1 试验处理设置

Table 1 Experimental treatment design						
处理划分	处理	绿肥种类	地布覆盖	播种量/(kg·hm ⁻²)	播种时间(年-月)	田间示踪微区
主处理	NGR	黑麦草	无	15	2022-05	有
	NGO	油菜				
	NGA	苜蓿				
副处理	GR	黑麦草	有	15	2022-05	无
	GO	油菜				
	GA	苜蓿				
对照组	CK	无	无	无	无	有

1.3 测定指标与方法

试验开始前,采集0~100 cm土壤样品,3次重复,取样深度间隔为20 cm,测定不同土层土壤体积质量、硝态氮、铵态氮、有机质及全氮等土壤基本理化性质指标。

1.3.1 土壤质量含水率 分别在坐果期,果实膨大前期,果实膨大后期和果实成熟期取各小区0~100 cm土样,具体取样位置见图2。
取样后将同一小区内相同土层样品均匀混合,取样深度间隔为20 cm。

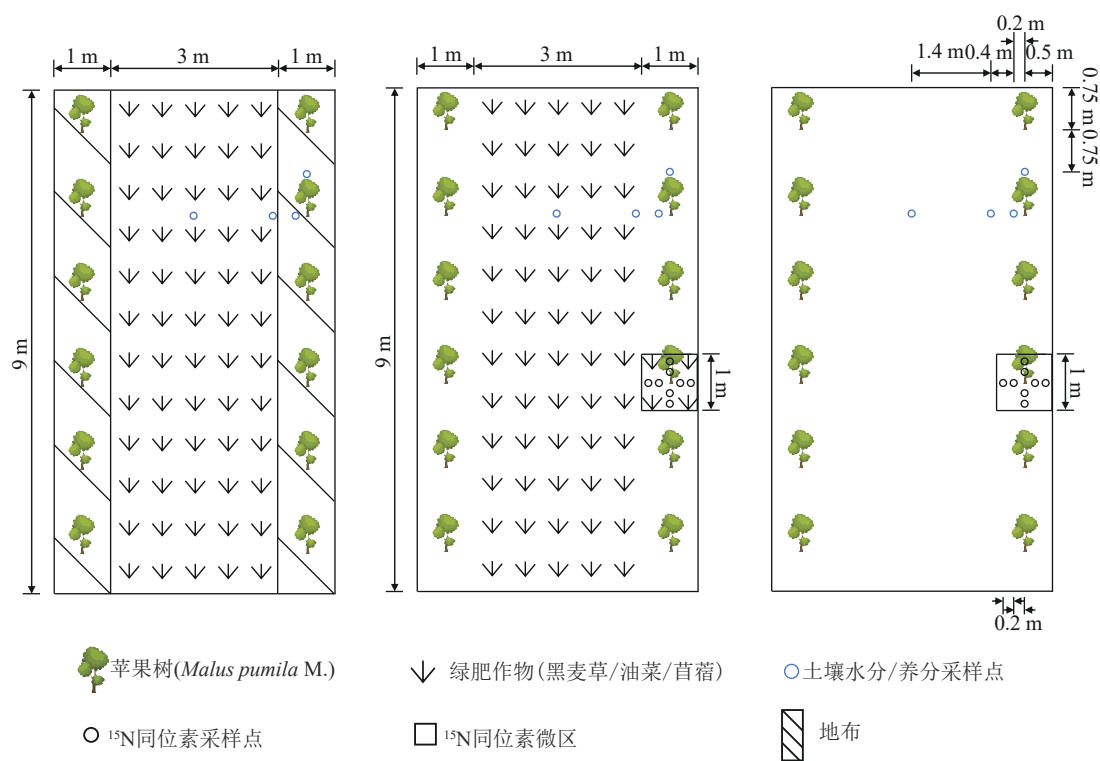


图2 试验布置及土壤水分、养分、¹⁵N 同位素采样点

Fig. 2 Experimental layout and sampling points of soil moisture and nutrients and ¹⁵N isotope

用烘干法测定土壤质量含水率,并计算土壤贮水量。土壤贮水量计算公式:

$$SWS = \sum (SWC_i \times \gamma_i \times h_i)$$
 (1)

式中:SWS为土壤贮水量,mm;SWC_i为第*i*层土壤质量含水率,%;γ_i为第*i*层土壤体积质量,g/cm³;h_i为第*i*层土层厚度,mm。

1.3.2 土壤水分差异率^[20]

$$SWDR = \frac{SWC_i - SWC_t}{SWC_t} \times 100\%$$
 (2)

式中:SWDR为土壤水分差异率,%;SWC_i为行间土壤质量含水率,%;SWC_t为树下土壤质量含水率,%。分别计算对照组的土壤水分差异率(SWDR_c)和主处理的土壤水分差异率(SWDR_i),如果SWDR_i为负值同时与SWDR_c存在显著性差异(*p*<0.05),认为绿肥有较高的可能性与果树产生水分竞争。

1.3.3 土壤养分 取样日期、位置与方法同土壤质量含水率,测定的土壤养分指标包括0~60 cm土层土壤硝态氮、铵态氮、有机质及全氮。土壤硝铵态氮采用 1 mol/L KCl 溶液浸提流动分析仪(AA3, SEAL, Norderstedt, Germany)测定;土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定;土壤全氮采用凯氏定氮法测定。土壤硝态氮、铵态氮、有机质及全氮测定方法参考土壤农化分析^[21]。

1.3.4 ¹⁵N丰度 在果实成熟期,采集各田间示踪微区

的土样和植物样(图2),包括0~60 cm土壤样品,果树(果实、叶片、枝条、茎干、根系)及绿肥地上部样品。土壤取样深度间隔20 cm,同一微区内相同土层土样均匀混合。土样自然风干,磨碎,过100目筛;植物样75℃烘干,磨碎,过100目筛。采用稳定同位素质谱仪(Isoprime 100, Isoprime Ltd., South Manchester, UK)测定¹⁵N丰度。

1.3.5 氮素效率 本研究采用生长模型对苹果树生物量进行估算。生长模型是根据实际监测值建立的植株各部分干物质量与各测树因子间的数学关系式,可以反映植株生物量与测树因子之间的关系^[22]。根据本研究区域已建立的非线性苹果树生长模型(constant allometric ratio, CAR)^[23],通过容易获取的测树因子(树高和地径)来估算本试验地的苹果树生物量。生长模型为:

$$W = a(D^2 \times H)^b$$
 (3)

式中:W为果树生物量,kg;a、b为生长模型参数,a、b及其预估精度见表2;D为地径,cm;H为树高,m。

表2 生长模型参数^[23]

Table 2 Growth model parameters				
器官	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	预估精度/%
茎干	0.019	0.962	0.989	83.16
枝条	0.009	1.086	0.982	80.08
根系	0.015	0.976	0.971	87.91

为了不破坏果树,枝条、茎干、根系生物量通过生长模型计算,叶片、果实生物量在果实成熟期实测得出。 a 、 b 的预估精度计算方法为:

$$P = \left[1 - \frac{t_\alpha \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}}{\bar{\hat{y}} \sqrt{n(n-T)}} \right] \times 100\% \quad (4)$$

式中: y_i 为实际观测值; $\hat{y}_i$ 为模型预估值; $\bar{\hat{y}}$ 为平均预估估值; n 为样本单元数; T 为参数个数; t_α 为置信水平 α 时的 t 值。

植物氮来自标记物氮百分数(Ndff,%),计算公式为:

$$\text{Ndff} = \frac{\text{atom}\%^{15}\text{N}_{\text{excess sample}}}{\text{atom}\%^{15}\text{N}_{\text{excess label}}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $\text{atom}\%^{15}\text{N}_{\text{excess sample}}$ 为植物中标记 ^{15}N 原子百分超=植物样品中 ^{15}N 丰度- ^{15}N 自然丰度; $\text{atom}\%^{15}\text{N}_{\text{excess label}}$ 为标记物中标记 ^{15}N 原子百分超=标记物中 ^{15}N 丰度- ^{15}N 自然丰度, ^{15}N 自然丰度=0.366 3±0.000 4^[24]。

植株 ^{15}N 利用率(^{15}NUE ,%)计算公式为:

$$^{15}\text{NUE} = \frac{\text{Ndff} \times \text{N}_{\text{organ}}}{^{15}\text{N application rate}} \quad (6)$$

式中: N_{organ} 为器官全氮量,g; $^{15}\text{N application rate}$ 为 ^{15}N 施用量,g。

0~60 cm 土层土壤 ^{15}N 残留率(^{15}NRR ,%)计算公式为:

$$^{15}\text{NRR} = \frac{\text{Ndff} \times \text{N}_{0-60 \text{ cm soil layer}}}{^{15}\text{N application rate}} \quad (7)$$

式中: $\text{N}_{0-60 \text{ cm soil layer}}$ =0~60 cm 土层全氮(g/kg)×土壤质量(kg),为0~60 cm 土层全氮量,g。

土壤 ^{15}N 损失率(^{15}NLR ,%)计算公式为:

$$^{15}\text{NLR} = 100\% - ^{15}\text{NUE} - ^{15}\text{NRR} \quad (8)$$

1.3.6 作物蒸散量与水分利用效率 将作物蒸散量(ET,mm)作为实际耗水量,利用水量平衡法计算:

$$\text{ET} = I + P + \Delta W \quad (9)$$

式中: I 为试验期间灌溉量,mm; P 为试验期间降雨量,mm; ΔW 为试验期间0~100 cm 土壤贮水量变化。由于试验期间未发生暴雨以及当地地下水位较低,所以忽略地表径流、地下水补给以及深层渗漏。

水分利用效率[WUE,kg/(hm²·mm)]计算公式为:

$$\text{WUE} = \frac{Y}{\text{ET}} \quad (10)$$

式中: Y 为果实产量,kg/hm²。

1.3.7 果实产量 果实成熟期,采集各小区的全部果实用于测定果实产量。

1.4 数据处理

利用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 26.0 软件进行数据处理和分析,组间数据采用单因素方差分析法(ANOVA)进行分析,组内采用最小显著差异法(LSD)进行两两比较。采用一般线性模型分析处理-生育期、处理-土层深度、生育期-土层深度、处理-生育期-土层深度等对土壤质量含水率的作用效果,以及处理-土层深度对硝铵态氮、有机质及全氮质量分数的作用效果。采用 OriginPro 2021 和 PowerPoint 2019 软件作图。

2 结果与分析

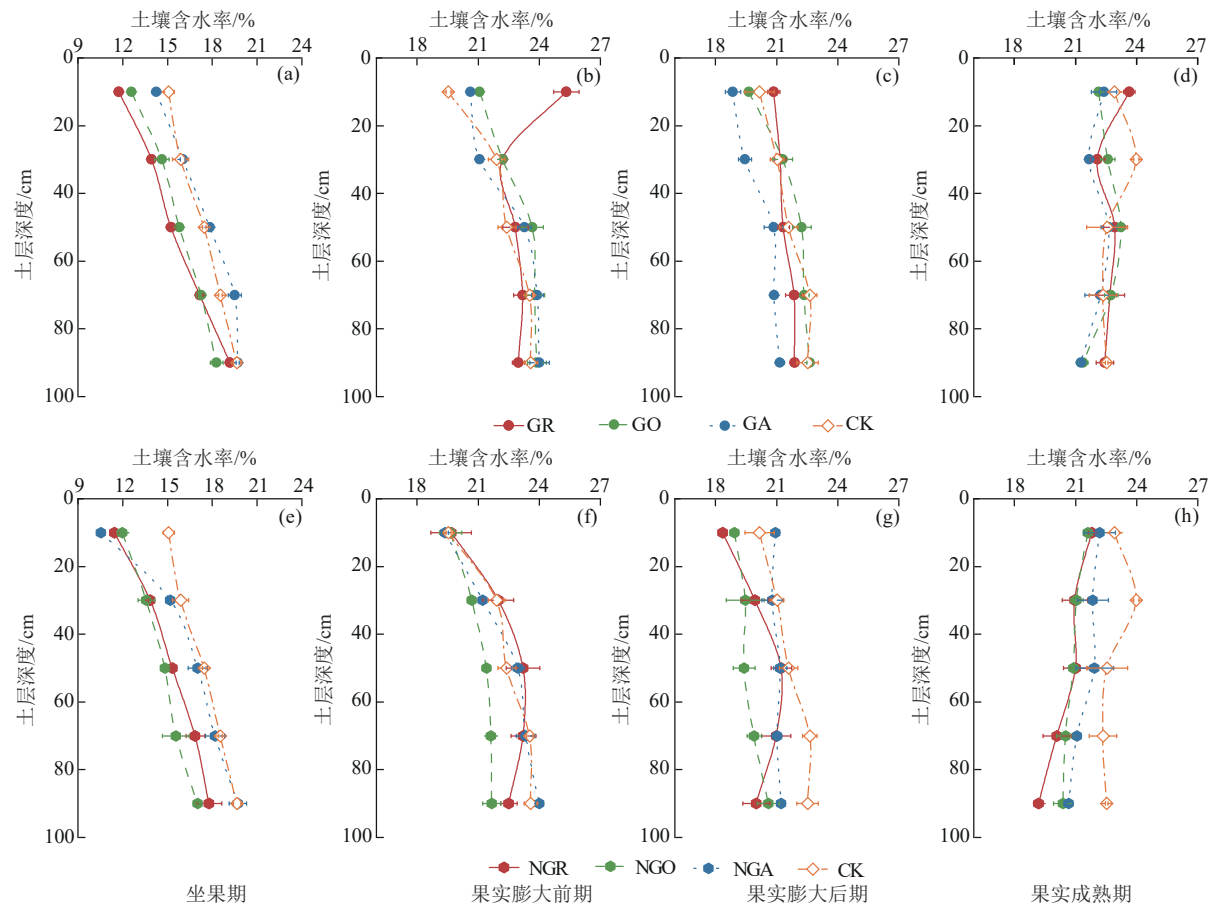
2.1 绿肥间作对土壤水分的影响

2.1.1 土壤水分 从图 3 可以看出,各处理 0~100 cm 土壤质量含水率均较 CK 处理有不同程度的降低,主处理平均下降 7%,副处理平均下降 1.8%。与主处理相比,副处理 0~100 cm 土壤质量含水率平均提高 5.5%(图 3a~3h)。果实膨大前期,副处理 0~100 cm 土壤质量含水率显著高于其他时期,并且均高于 CK 处理,GR 处理提升幅度最大,达 5%,GA 处理提升幅度最小,达 1.7%,3 种处理平均提升 3.3%(图 3b)。总体来看,果树行间间作绿肥未能起到提升土壤水分的效果,而果树行下覆盖地布起到一定的积极作用(图 3、表 3)。

2.1.2 土壤水分差异率 各处理均未出现土壤水分差异率为负值的同时与 CK 处理间存在显著性差异的情况(图 4)。在主处理中,NGR 处理土壤水分差异率平均值最大(-0.5%),NGO 处理次之(-0.7%),NGA 处理最小(-4.7%)。在坐果期和果实膨大前期,主处理土壤水分差异率均为正值,其中 NGR 处理平均值最高,达 3.6%,NGA 处理最小,达 1.2%;在果实膨大后期与果实成熟期,主处理土壤水分差异率均为负值。

2.2 绿肥间作对土壤养分的影响

2.2.1 土壤硝铵态氮 各处理土壤硝态氮质量分数与 CK 相比均显著下降($p < 0.05$);主处理平均下降幅度为 19.7%,其中 NGA 处理下降幅度最大,达 23.5%;副处理平均下降幅度达 24.8%(图 5a、图 5b)。相较于 CK 处理,仅有 GR 处理与 NGA 处理土壤铵态氮质量分数有所提高,GR 处理土壤铵态氮质量分数提高 6.7%,NGA 处理提高 11.9%,各处理土壤铵态氮与 CK 处理间均未见显著性差异(图 5c、图 5d)。与副处理相比,主处理硝态氮及铵态氮质量分数平均提高 6.8% 和 5.4%。总体来看,与 CK 处理相比,各处理均显著加剧 0~60 cm 土壤硝态氮的消耗。主处理、副处理及对照组间土壤铵态氮质量分数未见显著性差异。



注:(a)(b)(c)(d)为覆地布处理+CK;(e)(f)(g)(h)为不覆地布处理+CK。

图 3 不同生育期各处理土壤水分随土层深度的变化

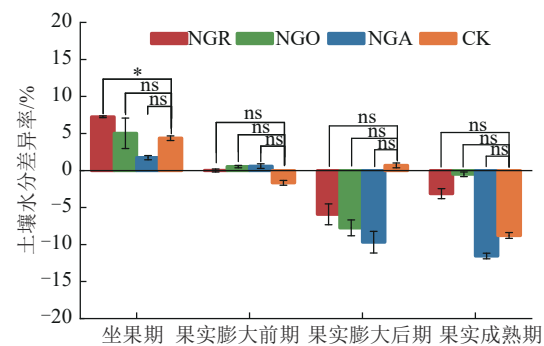
Fig. 3 Soil water content at different soil depths in each treatment at different growth stages

表 3 试验期间 0~100 cm 土层土壤含水量的显著性分析

Table 3 Significance analysis of soil water content at 0—100 cm depth during the trial

处理组	处理(T)	生育期(G)	土层深度(SD)	T×G	T×SD	G×SD	T×G×SD
主处理+对照组	***	***	***	***	ns	***	ns
主处理	ns	***	**	ns	ns	***	ns
副处理+对照组	ns	***	***	***	ns	***	ns
副处理	ns	***	**	***	ns	***	ns

注:ns表示无显著性差异;**、***分别表示在 $p<0.01$ 及 $p<0.001$ 的水平上存在显著性差异。

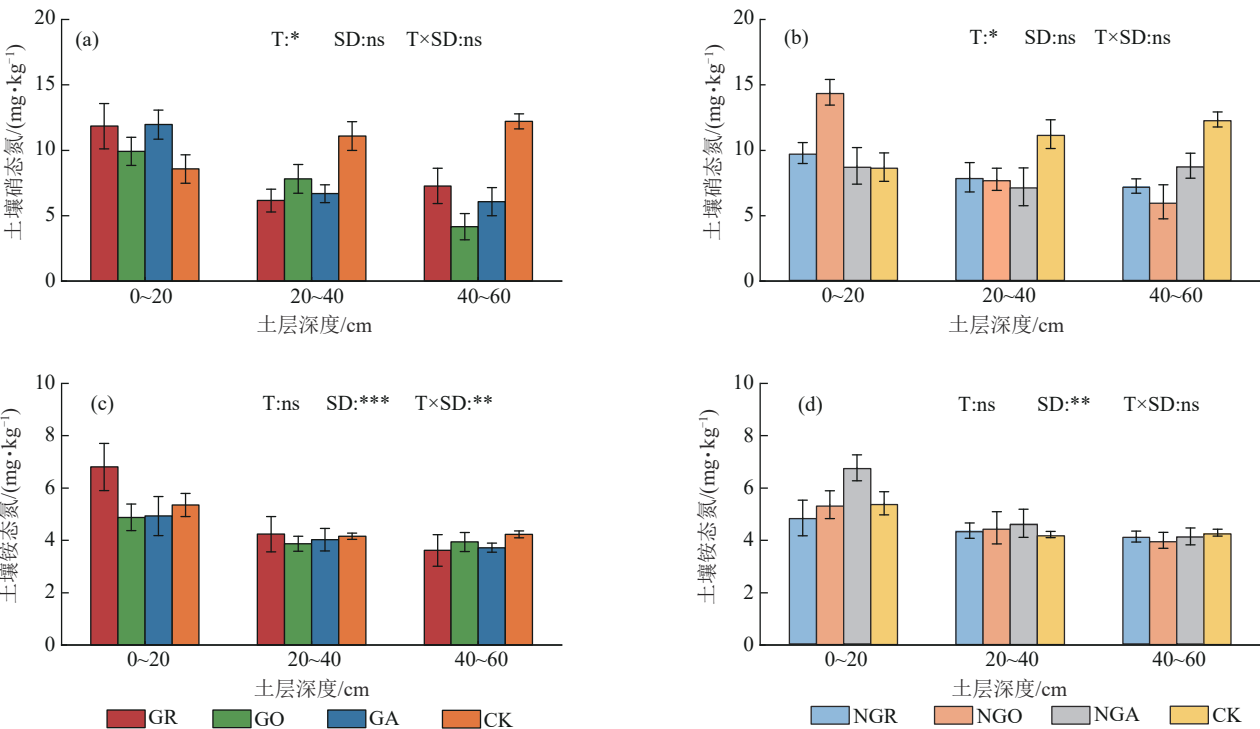


注:ns和*表示各处理与CK处理间不存在显著性差异及在 $p<0.05$ 的水平上存在显著性差异。

图 4 试验期间主处理及对照组土壤水分差异率

Fig. 4 Soil water difference ratio under the main treatments and control during the trial

2.2.2 ^{15}N 同位素示踪 果树各器官 ^{15}NUE 从高到低的顺序为根系,枝条,果实,茎干,叶片;根系的 ^{15}NUE 最高,占整株果树的39.3%~55.4%;叶片最低,占2.2%~3.5%(表4)。主处理果树 ^{15}NUE 均高于CK处理,其中NGR处理最高(24.4%),与CK处理(17.3%)存在显著性差异($p<0.05$),NGA处理最低(19.7%)。NGA处理0~60 cm土层 ^{15}NRR (26.9%)最高,与CK处理(10.6%)差异达到显著性水平($p<0.05$)。NGA处理绿肥作物 ^{15}NUE 最高(39.4%),NGR处理最低(19.7%),同时二者存在显著性差异($p<0.05$)。3种间作处理 ^{15}NLR 均低于CK处理,同时与CK处理存在显著性差异($p<0.05$)。总体来看,绿肥间作能够提高果树 ^{15}NUE ,减少 ^{15}N 损失。



注：T、SD、T×SD 分别表示处理、土层深度和处理-土层深度对土壤硝铵态氮的影响；ns、*、**和***分别表示无显著性影响及在 $p<0.05$ 、 $p<0.01$ 、 $p<0.001$ 的水平上存在显著性差异。

图 5 果实成熟期各处理不同土层硝铵态氮质量分数

Fig. 5 Soil nitrate nitrogen and ammonium nitrogen contents in each treatment at the fruit maturing stage

表 4 基于 ¹⁵N 同位素示踪技术的各处理氮效率

Table 4 Nitrogen efficiency of each treatment based on ¹⁵N isotope tracer technique

处理	¹⁵ NUE _{Organ} /%					果树 ¹⁵ N 利用率/%	¹⁵ N 残留 率/%	绿肥 ¹⁵ N 利用率/%	¹⁵ N 损失 率/%
	叶片	枝条	茎干	根系	果实				
NGR	0.84±0.07a	8.15±0.36a	1.53±0.09c	10.29±0.30a	3.56±0.28b	24.37±1.53a	10.45±0.96c	19.71±0.95c	45.47±2.49b
NGO	0.70±0.05b	4.19±0.29b	3.47±0.15a	7.89±0.37c	3.83±0.20ab	20.08±0.96b	15.84±1.11b	29.24±1.65b	34.84±1.83c
NGA	0.43±0.03d	4.40±0.31b	1.80±0.06b	8.91±0.39b	4.19±0.15a	19.74±0.85bc	26.85±1.45a	39.42±2.21a	14.00±0.83d
CK	0.53±0.03c	3.87±0.15b	1.44±0.10c	9.59±0.48ab	1.87±0.12c	17.30±0.96c	10.55±0.67c		72.16±3.25a

注：表中数据为平均值±标准差；同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

2.2.3 绿肥间作对土壤有机质及全氮的影响 与CK处理相比,黑麦草间作处理(NGR、GR)土壤有机质与全氮分别提升1.5%和0.2%,而油菜间作处理(NGO、GO)与苜蓿间作处理(NGA、GA)均有不同程度的下降,其中苜蓿间作处理下降幅度最大,分别达到15.2%和15.4%。与副处理相比,主处理土壤有机质平均提高8.9%,土壤全氮平均提升6.8%。主处理土壤有机质、全氮与CK处理间存在显著差异($p<0.05$)。副处理按土壤有机质及全氮质量分数从高到低为GR>GA>GO;主处理为NGR>NGO>NGA。总体来看,与CK处理相比,主处理土壤有机质及全氮显著下降($p<0.05$),副处理下降幅度大于主处理(图6)。

2.3 果实产量、作物需水量及水分利用效率

GA与NGA处理果实产量均低于CK,分别较CK下降4.6%和6.9%,其余各处理果实产量均高于CK,GR处理果实产量在各处理中最高,显著高于CK($p<0.05$)。相较于副处理,主处理ET平均升高3.6%,GR与NGR处理存在显著性差异($p<0.05$),同时各处理ET均不同程度高于CK(表5)。在各处理中,GR处理的WUE最高,相较于CK处理提升12.3%,NGA处理最低,相较于CK降低10.1%,GR与NGA处理WUE与CK存在显著性差异($p<0.05$)。总体来看,除苜蓿间作处理外(GA、NGA),其余处理均不同程度提升果实产量;各处理ET均有所增加。

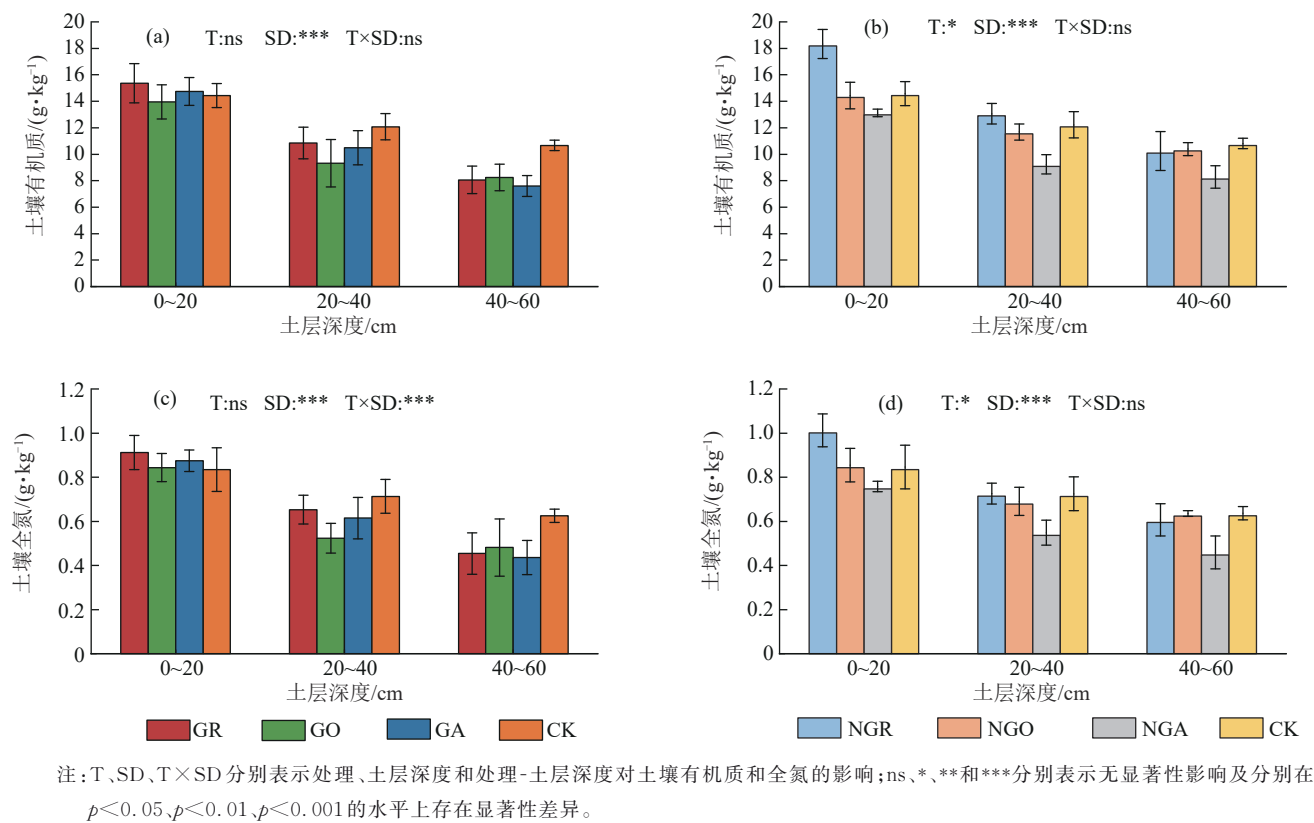


图 6 果实成熟期各处理 0~60 cm 土壤有机质及全氮质量分数

Fig. 6 Soil organic matter and total nitrogen contents in each treatment at 0—60 cm in the fruit maturing stage

表 5 各处理果实产量、作物蒸散量及水分利用效率

Table 5 Fruit yield, evapotranspiration, and water use efficiency in each treatment

处理	果实产量/ (kg·hm ⁻²)	作物蒸散量/ mm	水分利用效率/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
GR	50 761±1 666a	562.9±21.6c	90.3±3.6a
GO	45 579±2 064bcd	568.0±14.1bc	80.3±2.0c
GA	43 053±2 007cd	573.5±7.2abc	75.1±0.9d
NGR	50 375±2 625ab	594.6±11.6a	84.7±1.7b
NGO	47 667±2 524abc	590.5±15.3ab	80.8±2.1c
NGA	42 000±3 437d	580.9±12.2abc	72.3±1.5d
CK	45 111±2 959cd	561.3±8.8c	80.4±1.3c

3 讨论

与单纯间作绿肥相比,地布覆盖结合绿肥间作确实在减少土壤水分损失方面起到一定的积极作用,但效果有限。SWDR的结果表明,相较于黑麦草和油菜,苜蓿与果树之间更有可能发生水分竞争。果实产量与水分利用效率的结果恰好印证SWDR的结果。本研究中的黑麦草间作处理(NGR、GR),其果实产量与水分利用效率均高于其他处理,可能是因为轻度的水分胁迫有助于果实产量与水分利用效率的提升,与前人^[25-27]的研究结果相一致。

各处理土壤硝态氮质量分数均小于CK处理,表明绿肥间作加剧土壤氮素的消耗。苜蓿间作处理

(NGA、GA)土壤硝态氮平均值最低,黑麦草间作处理(NGR、GR)最高,与¹⁵N同位素示踪结果表现一致,即3种绿肥作物中,苜蓿对于氮素的利用率最高,油菜次之,黑麦草最低。黑麦草间作处理对土壤有机质与全氮的作用效果优于油菜与苜蓿间作处理,苜蓿间作处理的效果最差,与果实产量和水分利用效率的结果具有一致性。绿肥作物的生长年限、种植密度、种类、刈割频率等因素都可能影响其对于果树生长的作用效果^[15,28-30],多种管理措施集成对于当地苹果生产的影响有待于在后续试验中进一步研究。本研究中,苜蓿间作处理在土壤养分质量分数及果树生长方面作用效果表现不佳,可能与绿肥和果树对资源的竞争程度有关,适度资源胁迫有助于产量的提升,而重度胁迫则造成减产^[25-27]。一般来说,豆科作物能够固定空气中的氮气,转化为可供作物吸收利用的氮素营养^[31],而苜蓿种植年限过短,根瘤菌未能形成或者较少时,不仅不能起到增加土壤氮素的作用,反而加剧土壤中氮素的消耗^[32]。虽然随着苜蓿种植年限的提升,其固氮能力逐步提升,但其根系不断发育,与果树争水争肥的能力不断增强。因此,苜蓿长期间作的作用效果有待于在后续试验中进一步探究。

本试验初步的结果为后续进一步的研究提供基础数据支撑。首先,基于当地 1990—2020 年 5—

10月降水数据,进行水文典型年的计算得出试验期间为典型丰水期;其次,本研究利用 ^{15}N 同位素示踪技术探究苹果-绿肥间作系统氮素利用情况,关于利用 ^{15}N 同位素示踪技术探究果树氮素利用情况的研究较多,其中不乏利用一季的试验数据得到具有代表性结果的情况^[33-36]。因此,本研究所得数据具有一定代表性。在未来的研究中将进一步扩大试验的时间跨度,并考虑更全面的环境因素,以期通过多个年份的数据来验证和巩固当前的初步结论。

4 结 论

1)与清耕相比,3种绿肥均加剧土壤水分消耗。地布覆盖结合绿肥间作相较于单一间作绿肥可以减少土壤水分损失。苜蓿与果树间存在较为激烈的水分竞争。

2)各处理显著加剧土壤硝态氮消耗,尤其是苜蓿间作处理(NGA及GA)。与CK处理相比,黑麦草间作处理提升土壤有机质及全氮。苜蓿与果树存在较为激烈的氮素竞争。

3)综合考虑土壤水分、养分及果实产量,建议在渭北黄土高原沟壑区苹果园采用树下覆地布+行间间作黑麦草(GR)的二元覆盖管理模式。

参考文献:

- [1] 联合国粮食及农业组织. 农作物和畜牧产品[EB/OL]. (2023-03-24). <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. FAO. Crops and livestock products[EB/OL]. (2023-03-24). <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>.
- [2] LIU Y, GAO M S, WU W, et al. The effects of conservation tillage practices on the soil water-holding capacity of a non-irrigated apple orchard in the Loess Plateau, China[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 130: 7-12.
- [3] ZHENG W, WEN M J, ZHAO Z Y, et al. Black plastic mulch combined with summer cover crop increases the yield and water use efficiency of apple tree on the rainfed Loess Plateau[J]. PLoS One, 2017, 12(9): e0185705.
- [4] GE S F, XU H G, JI M M, et al. Characteristics of soil organic carbon, total nitrogen, and C/N ratio in Chinese apple orchards[J]. Open Journal of Soil Science, 2013, 3(5): 213-217.
- [5] 靳姗姗, 汪星, 汪有科, 等. 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.
- [6] JIN S S, WANG X, WANG Y K, et al. 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.
- [7] LE BISSONNAIS Y, LECOMTE V, CERDAN O. Grass strip effects on runoff and soil loss[J]. Agronomie, 2004, 24(3): 129-136.
- [7] ZHENG W, GONG Q L, ZHAO Z Y, et al. Changes in the soil bacterial community structure and enzyme activities after intercrop mulch with cover crop for eight years in an orchard[J]. European Journal of Soil Biology, 2018, 86: 34-41.
- [8] SUO G D, XIE Y S, ZHANG Y, et al. 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.
- [9] 李发康, 谢玉琴, 薛应钰, 等. 苹果树根域土壤理化性质对园艺地布覆盖的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(5): 123-129.
- [9] LI F K, XIE Y Q, XUE Y Y, et al. Response of physical and chemical properties of soil in apple root-zone to black ground fabric mulching[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(5): 123-129.
- [10] HU Y X, ZHAN P J, THOMAS B W, et al. Organic carbon and nitrogen accumulation in orchard soil with organic fertilization and cover crop management: A global meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2022, 852: e158402.
- [11] 孟凡旭, 王树森, 秦富仓, 等. 残膜沟壑区不同果农复合模式对土壤理化性质及水源涵养功能的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 192-199.
- [11] MENG F X, WANG S S, QIN F C, et al. Effect of different fruit-crop compounds on soil physiochemical properties and soil-water conservation in gully region of plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(5): 192-199.
- [12] 寇建村, 杨文权, 程国亭, 等. 行间种植不同草种对幼龄苹果园土壤特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(4): 145-152.
- [12] KOU J C, YANG W Q, CHENG G T, et al. Effects of different grasses between rows of apple trees on soil characteristics of 1-year-old orchard[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(4): 145-152.
- [13] 张先来, 李会科, 张广军, 等. 种植不同牧草对渭北苹果园土壤水分影响的初步分析[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(3): 56-59.
- [13] ZHANG X L, LI H K, ZHANG G J, et al. Effects of interplanting different herbage on soil moisture in apple orchards of Weibei Plateau[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2005, 20(3): 56-59.
- [14] HUANG J, WANG J, ZHAO X N, et al. Effects of permanent ground cover on soil moisture in jujube orchards under sloping ground: A simulation study[J]. Agricultural Water Management, 2014, 138: 68-77.
- [15] REN J, LI F D, YIN C B. Orchard grass safeguards sustainable development of fruit industry in China[J]. Journal

- of Cleaner Production, 2023, 382: e135291.
- [16] XIANG Y Z, LI Y, LIU Y, et al. Factors shaping soil organic carbon stocks in grass covered orchards across China: A meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2022, 807: e150632.
- [17] FANG K K, LI H K, WANG Z K, et al. Comparative analysis on spatial variability of soil moisture under different land use types in orchard[J]. Scientia Horticulturae, 2016, 207: 65-72.
- [18] 李会科, 张广军, 赵政阳, 等. 生草对黄土高原旱地苹果园土壤性状的影响[J]. 草业学报, 2007, 16(2): 32-39.
- LI H K, ZHANG G J, ZHAO Z Y, et al. Effects of interplanted herbage on soil properties of non-irrigated apple orchards in the Loess Plateau[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2007, 16(2): 32-39.
- [19] DU S N, BAI G S, YU J. Soil properties and apricot growth under intercropping and mulching with erect milk vetch in the loess hilly-gully region[J]. Plant and Soil, 2015, 390(1): 431-442.
- [20] LING Q, GAO X D, ZHAO X N, et al. Soil water effects of agroforestry in rainfed jujube (*Ziziphus jujube* Mill.) orchards on loess hillslopes in Northwest China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2017, 247: 343-351.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [22] 孟宪宇. 测树学[M]. 3版. 北京: 中国林业出版社, 2006.
- MENG X Y. Dendrology [M]. 3rd Edition. Beijing: China Forestry Publishing House, 2006.
- [23] 吕俊林. 陕西省残塬沟壑区苹果经济林生物量及碳吸收研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
- LV J L. Study on biomass and carbon absorption of apple economic forest in the residual gully area of Shaanxi Province[D]. Hohhot: Agricultural University of Inner Mongolia, 2020.
- [24] JUNK G, SVEC H J. The absolute abundance of the nitrogen isotopes in the atmosphere and compressed gas from various sources [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1958, 14(3): 234-243.
- [25] WEN S L, CUI N B, LI M J, et al. Optimizing irrigation and nitrogen fertilizer management to improve apple yield, quality, water productivity and nitrogen use efficiency: A global meta-analysis [J]. Scientia Horticulturae, 2024, 332: e113221.
- [26] HE Z J, HU Q Y, ZHANG Y, et al. Effects of irrigation and nitrogen management strategies on soil nitrogen and apple yields in Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2023, 280: e108220.
- [27] EL JAOUHARI N, ABOUABDILLAH A, BOUA-
- BID R, et al. Assessment of sustainable deficit irrigation in a Moroccan apple orchard as a climate change adaptation strategy[J]. Science of the Total Environment, 2018, 642: 574-581.
- [28] DELPUECH X, METAY A. Adapting cover crop soil coverage to soil depth to limit competition for water in a Mediterranean vineyard [J]. European Journal of Agronomy, 2018, 97: 60-69.
- [29] RAMOS M E, ROBLES A B, SÁNCHEZ-NAVARRO A, et al. Soil responses to different management practices in rainfed orchards in semiarid environments[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 112(1): 85-91.
- [30] CAO Q, WANG Z K, YANG X L, et al. The effects of cocksfoot cover crop on soil water balance, evapotranspiration partitioning, and system production in an apple orchard on the Loess Plateau of China[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 205: e104788.
- [31] VIRK A L, LIN B J, KAN Z R, et al. Simultaneous effects of legume cultivation on carbon and nitrogen accumulation in soil[M]//Advances in Agronomy. Amsterdam: Elsevier, 2022: 75-110.
- [32] 闻志彬. 种植紫花苜蓿对土壤理化性状的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- WEN Z B. Effects of planting alfalfa on soil physical and chemical properties [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2008.
- [33] SHI J Y, XUN M, SONG J F, et al. Regulation effects of carbonized apple branches on absorption, distribution, and utilization of ^{15}N single-labeled ammonium nitrate ($^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$ or $\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$) in *Malus hupehensis* [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2022, 186: 197-206.
- [34] 彭玲, 文昭, 安欣, 等. 果园生草对 ^{15}N 利用及土壤累积的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 950-956.
- PENG L, WEN Z, AN X, et al. Effects of interplanting grass on utilization, loss and accumulation of ^{15}N in apple orchard[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(4): 950-956.
- [35] 郑朝霞, 王颖, 巩庆利, 等. 矮化自根砧红富士幼树对土施 ^{15}N -尿素的吸收、分配和利用[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 237-244.
- ZHENG Z X, WANG Y, GONG Q L, et al. Absorption, distribution and utilization of soil applied ^{15}N -urea in young dwarf rootstock 'Fuji' apple trees[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(1): 237-244.
- [36] 葛顺峰, 姜远茂, 魏绍冲, 等. 不同供氮水平下幼龄苹果园氮素去向初探[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 949-955.
- GE S F, JIANG Y M, WEI S C, et al. Nitrogen balance under different nitrogen application rates in young apple orchards[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(4): 949-955.