

黄土高原苹果园间作油菜对土壤水分与苹果品质的影响

杨建利¹, 贾如浩², 王春丽^{1*}, 张 智¹, 王小军³, 王周礼¹, 赵西宁⁴, 冯 浩⁴

(1 陕西省杂交油菜研究中心, 陕西杨凌 712100; 2 山东省水利勘测设计院, 山东济南 250000; 3 西北农林科技大学资源环境学院, 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】间作生草是黄土高原苹果优势产区有机肥替代化肥模式之一。由于黄土高原地区年际干旱少雨且降水在季节上分配不均, 可能产生果园生草与果树争水的问题。因此, 本研究采用不同耗水模式的油菜品种探究其对土壤水分及苹果品质的影响。【方法】试验于 2018 和 2019 年在陕西省延安市安塞区南沟流域进行。设置 4 个生草处理, 分别为甘蓝型油菜陕油 2013、春性白菜型油菜浩油 21、强冬性白菜型油菜延油 2 号 and 传统清耕制度 (CK)。田间定位监测土壤水分, 测定油菜生长指标及果树的果实品质。比较分析不同油菜类型的生长状况、果园土壤含水量、土壤水分相对差异、苹果新梢生长状况、果实品质等。【结果】在两年试验期内, 间作不同油菜各项生长指标具有显著性差异。单位面积生物量表现为甘蓝型油菜 > 强冬性白菜型油菜 > 春性白菜型油菜。在土壤水分方面, 4 个处理土壤含水量变化趋势基本一致, 0—20 cm 土层水分含量随时间变化最大。其中, 甘蓝型油菜、春性白菜型油菜和强冬性白菜型油菜处理行间 0—20 cm 土层两年平均土壤含水量分别较 CK 降低了 19.2%、3.3% 和 8.5%, 20—100 cm 土层两年平均土壤含水量分别较 CK 提升 4.9%、12.1% 和 6.4%。20—100 cm 土层的平均土壤水分变异系数表现为甘蓝型油菜处理最大, 春性白菜型油菜处理最小。间作油菜提升了苹果品质, 以间作春性白菜型油菜的效果最显著, 其可溶性固形物、可溶性糖和 V_c 含量较清耕对照显著增加了 1.00 个百分点、1.57 个百分点和 47.58%, 间作其他两个油菜品种与清耕相比只有 V_c 含量显著升高。【结论】与清耕相比, 苹果树行间间作春性白菜型油菜、强冬性白菜型油菜和甘蓝型油菜均有效提升了 20—100 cm 土层土壤含水量, 降低了苹果树休眠期土壤储水量损失, 进而显著促进了果树的生长发育, 提升了果实品质。其中, 苹果树行间间作春性白菜型油菜效果最佳, 是黄土高原旱作苹果园较为适宜的间作模式。

关键词: 旱作苹果园; 间作油菜; 土壤水分; 苹果品质

Effects of intercropping rape on soil moisture and quality of apple fruit in an apple orchard in the Loess Plateau

YANG Jian-li¹, JIA Ru-hao², WANG Chun-li^{1*}, ZHANG Zhi¹, WANG Xiao-jun³,
WANG Zhou-li¹, ZHAO Xi-ning⁴, FENG Hao⁴

(1 Hybrid Rape Research Center of Shaanxi Province, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Shandong Survey and Design Institute of Water Conservancy, Jinan, Shandong 250000, China; 3 College of Natural Resources and Environment, 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: 【Objectives】Planting grass in an orchard is one of the models of partially replacing chemical fertilizers with an organic fertilizer in apple production areas. Due to low and uneven inter-season variation in precipitation in the Loess Plateau, planting grass may increase water uptake and deteriorate soil water storage. Therefore, we tested rapes with different water consumption patterns capable of serving as orchard grass. 【Methods】The experiment was conducted in 2018 and 2019 in Yan'an City, Shaanxi Province. Three intercropped rape varieties; namely, napus rape Shaanyou 2013 (A-G), spring cabbage type rape Haoyou 21 (A-

收稿日期: 2021-01-19 接受日期: 2021-05-12

基金项目: 陕西省重点研发计划项目 (2020ZDLNY07-04); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0501703); 陕西省农业领域一般项目 (2018NY-025)。

联系方式: 杨建利 E-mail: syxycxjly@163.com; * 通信作者 王春丽 E-mail: chliwang262@163.com

H), strong winter cabbage type rape Yanyou 2 (A-Y), and clean soil surface control (CK), were used as treatments. Soil moisture, rape growth index and apple fruit quality were measured. 【 Results 】 The growth index of rape was ($P < 0.05$) different among different rape types in two years. The leaf and branch biomass per area were as follows: cabbage type rape (A-G) > strong winter cabbage type rape (A-Y) > spring cabbage type rape (A-H). The soil moisture variation within the apple-growing period was similar in the four treatments, and the most significant variation was observed in the 0–20 cm soil layer. Compared with CK, the soil water content of A-G, A-H, and A-Y in 0–20 cm soil layer decreased by 19.2%, 3.3%, and 8.5%, respectively. In the 20–100 cm soil layer, the soil moisture content increased by –4.9%, 12.1%, and 6.4%. The coefficient of variation of average soil water content in the 20–100 cm soil layer was higher in A-G and smaller in A-H. The three intercropping treatments improved the fruit taste. However, the most significant effect was observed in A-H, where the contents of soluble solids, soluble sugar and V_c in the apple of intercropping spring rape was higher than other treatments, improving by 1 and 1.57 percent point, and 47.58%. 【 Conclusions 】 Intercropping of cabbage type rape, strong winter cabbage type rape, and spring cabbage type rape are all efficient in increasing soil water storage in 20–100 cm soil depth, thereby decreasing the consumption of soil water during apple dormancy. Consequently, the treatments stimulate the growth and development of apple trees and improve the fruit quality. Spring cabbage type rape performed better than the other two types, and thus, it is recommended for intercropping with dry apple orchards on the Loess Plateau.

Key words: dryland apple orchard; intercropping rape; soil moisture; apple fruit quality

退耕还林(草)工程实施以来,苹果产业已成为黄土高原区域经济发展的主导产业^[1],截止2016年,黄土高原苹果种植面积已达1305,800 hm²^[2]。然而,黄土高原80%以上的苹果园为旱作雨养果园,苹果生长依赖于有限的降水资源^[3]。长期以来,果园普遍采用清耕制管理模式,导致非生产性耗水增加、土壤蓄水保墒抗蚀效果差,引发水土环境状况恶化^[4],严重限制了黄土高原地区苹果产业的可持续发展。因此,选择合适的果园土壤管理措施,增加土壤水分保蓄能力,改善土壤水分环境,对黄土高原地区旱作苹果园的经济效益和生态效益协同提升有着重要的影响。

作为一种有效的果园土壤管理模式,果园生草在黄土高原地区被广泛实施^[5]。研究发现,果园生草能够调节根系分布,促进形成许多复杂细微的通道,改变土壤孔隙结构和孔隙数量,降低土壤容重,对土壤物理性质产生积极影响^[6]。进而增加了土壤水稳性团聚体含量,有效改善了土壤入渗性能及持水能力,提高土壤储水能力、土壤水有效性^[7]和降水资源利用效率^[8]。此外,果园生草通过增加地表覆盖、改善田间小气候等方式降低土壤蒸发强度,降低了非生产性耗水损失^[9]。然而,果园生草对土壤水分的改善效果受果园立地环境、生草方式、生草时期和生草种类的影响^[10]。适宜的果园生草配置能够有

效地改善果园土壤水分环境,而不适宜的果园生草配置可能会导致生草与果树产生水分竞争作用,特别是在干旱半干旱地区更易产生水分竞争,导致水资源匮乏。现有的生草模式主要为“果树行间间作生草+清耕带覆盖”二元生草覆盖模式^[11]。而油菜作为间作作物,不仅具有上述的各项优缺点,同时可作为绿肥使用。此外,油菜更具其他的非生产性价值,例如:观光旅游,养蜂采蜜。果园间作油菜可用作生态农业建设。

目前,黄土高原地区果园生草系统建立以后,普遍存在果树与生草的生育期基本重合的现象^[12]。这势必会增加土壤水分竞争发生几率,导致水分过度消耗,不利于苹果的生长发育。为避免或减少种间土壤水分的竞争,本研究以黄土高原旱作山地苹果园为对象,选择3种不同耗水油菜品种间作,开展秋季果园间作油菜田间试验研究,以期为旱作山地苹果园土壤水分管理和果园生草模式提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市安塞区南沟流域(109°18'50"E, 36°35'42"N)。该地区为典型的黄土高原丘陵沟壑区,平均海拔1100 m,多年平均降雨量为

535 mm, 属干旱半干旱地区, 7 月、8 月和 9 月的降雨量通常占年降水总量的 60%~70%, 且多为高强度降雨形式, 易产生径流。当地土壤为黄绵土, 土壤容重为 1.28 g/cm³, 田间持水量为 20%。该地区植被主要以苹果树和生态林为主。苹果树种植无灌溉条件, 以雨养为主。而早期的清耕制度易导致水土流失和表层土壤养分流失, 不利于生态的可持续发展。

1.2 试验设计

研究区苹果树为矮化密植型果树, 品种为烟富 8 品种 (砧木为矮化自根砧 M9T337), 树龄为 4 年 (2015 年种植), 行距为 4 m, 株距约为 1 m, 树盘 (两侧各 1 m) 覆盖黑色园艺地布, 行间 (2 m) 间套油菜。

本研究选取 3 个油菜供试品种, 分别为甘蓝型油菜陕油 2013、春性白菜型油菜浩油 21 和强冬性白菜型油菜延油 2 号。试验设置 4 个处理, 分别为: 行间清耕 (CK)、行间种植甘蓝型油菜 (A-G)、行间种植春性白菜型油菜 (A-H) 和行间种植强冬性白菜型油菜 (A-Y)。其中, 清耕制度为黄土高原果园土壤管理最普遍的模式。而近些年来, 行间种植强冬性白菜型油菜是当地新兴的果园生草模式。

播种油菜一周前, 采用微型旋耕机对所有处理进行土地整理, 翻地深度为 15 cm。同时在翻地前, 施入磷酸二铵 (N 18%, P₂O₅ 46%) 150 kg/hm²。然后划分小区, 油菜种植边缘距苹果树 100 cm, 油菜种植宽度为 200 cm, 行距为 30 cm, 共 8 行 (图 1)。各处理施肥种类、次数、用量一致, 同一行苹果树两侧行间处理一致。所有处理无灌溉, 采用雨养。行间油菜种植方向与果树行向一致, 3 种油菜 2018 年 8 月 11

日和 2019 年 8 月 6 日播种。采用人工方式顺开沟行播种, 沟深 3 cm, 播种量为 3.75 kg/hm²。均匀播种后, 覆土平整土地。其中甘蓝型油菜和春性白菜型油菜在试验区无法正常越冬, 故在越冬前刈割覆盖, 强冬性白菜型油菜生长至次年 4 月中旬刈割覆盖。试验区苹果树与油菜土壤水分监测点见图 1, 每个处理重复 3 次, 每个小区长 20 m、宽 12 m, 包含 3 行苹果树。每个小区随机选取 3 棵长势相似的果树作为重复, 在行间距果树分别为 30、60、100、200 cm 处设土壤水分监测点 (图 1), 试验共设置 48 个土壤水分监测点。

1.3 测定项目与方法

采用 Trime-IPH 管式土壤水分测量系统测定土壤体积含水量, 该系统于 2018 年年初布设于试验地, 测量深度为 100 cm, 测量步长为 20 cm 一层, 布设位置见图 1。测量时段为 2018 年 8 月—2019 年 12 月, 共计测量 18 次。

单株油菜生长指标测定方法采用五点法采样, 用游标卡尺和卷尺测量其株高和茎粗数据, 通过烘干法 (80℃) 测量干物质重量, 取样时间为 2018 年 12 月 8 日。同时, 每个处理随机选取 1 m² 区域, 3 个重复, 测量单位面积的生物量。

利用经典统计学原理, 计算土壤水分变异系数 (SWC_{cv}):

$$SWC_{cv} = \frac{SWS_s}{\overline{SWC}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: SWS_s 为土壤含水量的标准方差 cm³/cm³; $\overline{SWC}$ 为土壤含水量的均值 cm³/cm³; SWC_{cv} 为土壤含水量随时间变异程度。

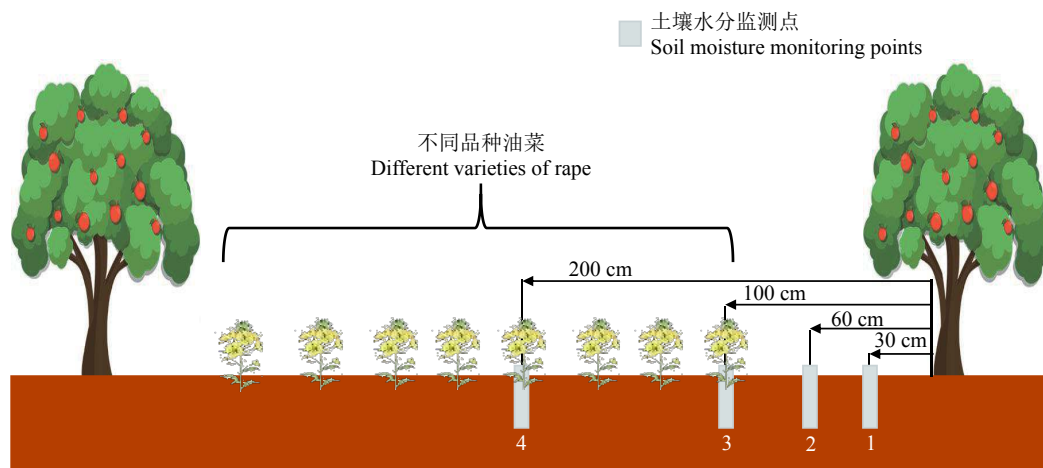


图 1 试验布设与土壤水分监测点分布图

Fig. 1 Experimental layout showing the map for soil water monitoring and distribution points

土壤水分竞争以土壤含水量的相对差异 (RDSW) 来表示^[13]:

$$\text{RDSW}_{i,j} = \frac{\theta_{i,j} - \theta_{ck,j}}{\theta_{ck,j}} \quad (2)$$

式中: $\theta_{i,j}$ 和 $\theta_{ck,j}$ 分别代表第 i 个处理和对照 (CK) 下第 j 个采样日期的土壤含水量 cm^3/cm^3 。如果 RDSW 为负值, 则表示行间作物加速了土壤水分的消耗; 负值越大, 意味着竞争程度越高, 反之亦然。本试验中, 对距苹果树不同距离的 4 个位置分别进行了计算。

土壤储水量计算公式:

$$W = 10H\theta \quad (3)$$

式中: W 为土壤储水量 (mm); H 为土层厚度 cm; θ 为土壤含水量 (cm^3/cm^3); 10 为换算系数。

$$\Delta W = W_1 - W_2 \quad (4)$$

式中: ΔW 为土壤储水量的消耗 (mm); W_1 为后一次休眠期的储水量 (mm); W_2 为前一次休眠期的储水量 (mm)。

根据枝条上新梢的两个节点, 采用卷尺来测定苹果树新梢的总长度。随机选取 3 棵长势良好的果树, 每棵果树随机选取 25 枝枝条。我们选取 100 片果树叶片叠加压实, 采用游标卡尺进行测量。选取 3 棵树, 每棵苹果树设置 3 个重复。同时, 采用叶绿素计 (SPAD-502Plus) 测量叶绿素含量。在当年苹果成熟期每个处理随机选择 8 棵树, 从每棵果树的 4 个方向随机选取 4 个长势相似的苹果, 采用 PAL-1 糖度计测定果实可溶性固形物含量, 用滴定法测定可滴定酸含量, 采用嗯酮比色法测定可溶性糖含

量, 用 2,6-二氯酚滴定法测定 V_c 含量。

气象数据由距试验地 20 m 的微型气象站获取, 主要参数包括降水、温度、风速和太阳辐射。

1.4 试验期间降水状况

根据气象数据显示 (图 2), 2018 和 2019 年累计降水量分别为 492 和 608 mm, 2019 年降水量较 2018 年增加 116 mm, 按照该地区多年降水频率划分, 2018 年为平水年, 2019 年为丰水年。

1.5 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS 软件进行数据统计分析, 采用单因素 (one-way ANOVA) 和 LSD 法进行方差分析和多重比较 ($\alpha=0.05$)。采用 OriginPro 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同品种油菜生长状况

3 种油菜因其耗水模式不同, 生长状况存在显著差异 (表 1)。对于株高而言, 春性白菜型油菜显著高于甘蓝型油菜和强冬性白菜型油菜, 但根茎粗和主根长度却表现为强冬性白菜型油菜显著高于甘蓝型油菜和春性白菜型油菜。3 种油菜以甘蓝型油菜地上干物质积累最大, 强冬性白菜型油菜的主根干物质积累最大。地上部+地下部生物量表现为甘蓝型油菜 > 强冬性白菜型油菜 > 春性白菜型油菜。从不同年际间对比可以发现, 2019 年不同油菜生长状况要优于 2018 年, 这可能是由于 2019 年降水充沛, 减弱了干旱的胁迫, 促进了油菜生长。

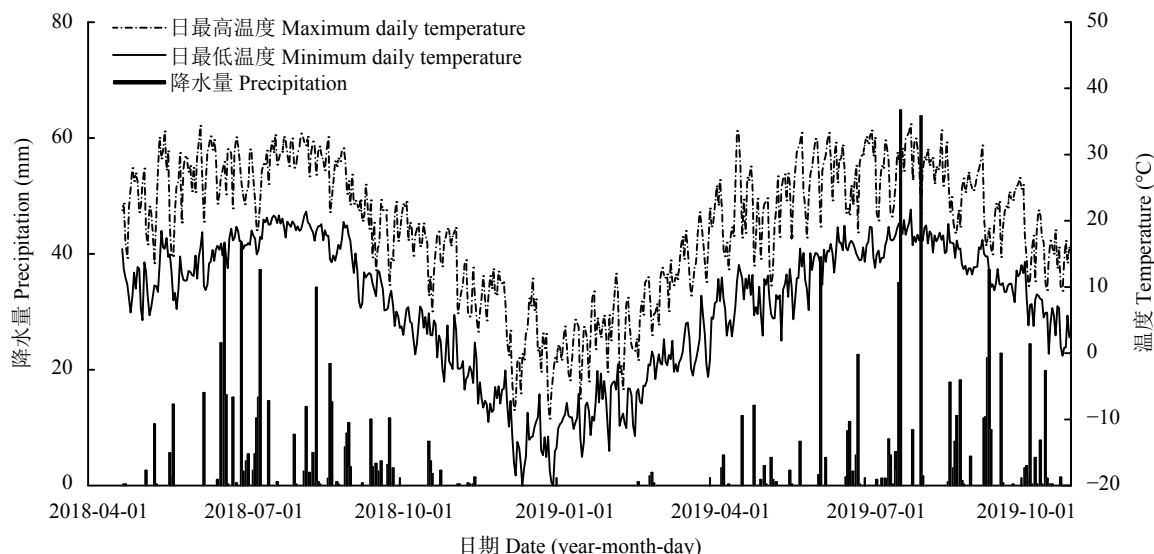


图 2 试验期间降水和气温

Fig. 2 Precipitation and ir temperature during the experiment

表 1 不同类型间作油菜生长状况
Table 1 Growth status of different intercropped rape types

年份 Year	处理 Treatment	株高 Stem length (cm)	根茎粗 Rootstock diameter (mm)	主根长度 Taproot length (cm/plant)	地上干重 Aboveground dry weight (g)	主根干重 Main root dry weight (g)	生物量 Biomass (g/m ²)	
							地上部 Shoot	根部 Root
2018	A-H	107.50 ± 10.22 a	5.93 ± 1.81 c	10.97 ± 1.86 c	6.12 ± 3.19 ab	0.45 ± 0.35 b	1642 ± 96 c	79.6 ± 9.7 c
	A-G	50.10 ± 3.89 b	7.68 ± 1.84 b	15.22 ± 2.33 b	8.58 ± 4.01 a	1.45 ± 0.72 a	3339 ± 301 a	250.9 ± 32.8 b
	A-Y	45.45 ± 6.99 b	11.24 ± 1.46 a	18.97 ± 2.43 a	4.83 ± 1.56 b	1.67 ± 0.70 a	2480 ± 240 b	567.4 ± 82.9 a
2019	A-H	123.80 ± 8.58 a	6.39 ± 0.62 c	14.68 ± 1.04 b	7.07 ± 1.58 ab	0.57 ± 0.19 b	1940 ± 180 c	96.6 ± 6.3 c
	A-G	57.60 ± 7.50 b	8.07 ± 1.20 b	17.62 ± 1.98 b	9.24 ± 2.45 a	1.65 ± 0.43 a	3594 ± 156 a	299.5 ± 35.8 b
	A-Y	50.00 ± 4.85 b	12.60 ± 1.29 a	20.90 ± 3.42 a	5.87 ± 1.84 b	1.93 ± 0.42 a	2883 ± 197 b	622.2 ± 44.6 a

注 (Note): A-H—春性白菜型油菜 Spring cabbage type rape; A-G—甘蓝型油菜 Cabbage type rape; A-Y—强冬性白菜型油菜 Strong winter cabbage type rape. 同列数值后不同字母表示同一年份不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters in the same column indicate significant difference among treatments in the same year ($P < 0.05$).

2.2 行间土壤水分动态变化

如图 3 所示, 在 0—20 cm 土层和 20—100 cm 土层, 4 个处理土壤含水量变化趋势受降水影响表现出基本一致的规律, 但不同处理变化幅度略有差异。0—20 cm 土层深度 CK、A-G、A-H 和 A-

Y 处理土壤水分变异系数分别为 16.2%、23.1%、15.9% 和 17.1%, 20—100 cm 土层土壤含水量比 0—20 cm 土层稳定, 土壤水分变异系数分别为 10.3%、10.9%、7.9% 和 10.0%, 0—100 cm 整个土层均以 A-G 处理最大, A-H 处理最小。通过两年试

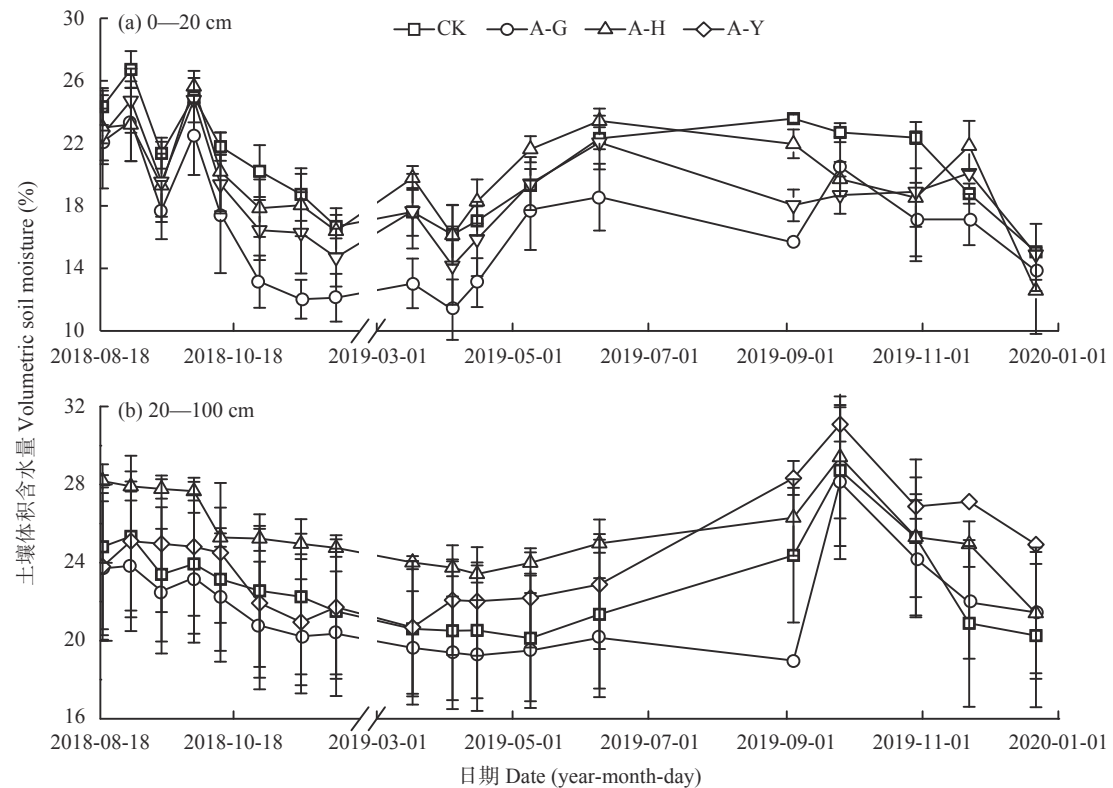


图 3 行间土壤含水量的动态变化
Fig. 3 Dynamic of soil water content in inter-rows

[注 (Note): CK—清耕 No crop growing control; A-G—甘蓝型油菜 Cabbage type rape; A-H—春性白菜型油菜 Spring cabbage type rape; A-Y—强冬性白菜型油菜 Strong winter cabbage type rape.]

验监测 A-G、A-H 和 A-Y 处理行间 0—20 cm 土层土壤含水量分别较 CK 降低 19.2%、3.3% 和 8.5%，20—100 cm 土层土壤含水量分别较 CK 提升 4.9%、12.1% 和 6.4%。因此，春性白菜型油菜间作能够维持苹果树行间土壤水分的稳定性，对 20—100 cm 土层土壤水分提升效果明显，3 种油菜对于行间 0—20 cm 土层土壤水分均表现为消耗，春性白菜型油菜消耗最小，甘蓝型油菜消耗最大。

2.3 苹果树休眠期前后土壤储水量的消耗

由于不同油菜生理特性不同，导致在同一时期存在不同的耗水强度。本试验中春性白菜型油菜和甘蓝型油菜均无法越冬，在冬季自然枯萎覆盖在地表，而强冬性白菜型油菜可以安全越冬，第二年春季萌发新叶再次生长发育。苹果树休眠期前后 (2018 年 10 月 30 日—2019 年 3 月 17 日) 不同位置 0—100 cm 土层土壤储水损失量见图 4。距离果树 30 cm 处 3 个间作处理较 CK 均减少了土壤储水损失量，A-Y 处理损失最小。距离果树 60 cm 处，3 个间作处理较 CK 均增加了土壤储水损失量，A-Y 处理损失最大。距离树干 100 cm 处 A-G 和 A-H 处理土壤储水损失量明显小于 CK，A-Y 处理与 CK 处理基本持平。距树干 200 cm 处，3 个间作处理均明显减小了土壤储水损失量，A-Y 处理减小最为明显。整体来看，3 个间作处理 4 个位置平均土壤储水损失量均小于 CK，4 个处理土壤储水损失量表现为 CK > A-Y > A-G > A-H。因此，间作春性白菜型油菜有利于保蓄苹果园休眠期的土壤水分，减少土壤储水损失量。

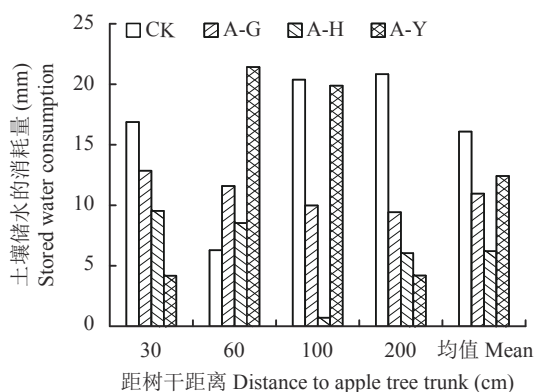


图 4 间作不同类型油菜 0—100 cm 土壤储水损失量

Fig. 4 Loss of water storage in 0–100 cm soil under different types of rape intercropping

[注 (Note): CK—清耕 No crop growing control; A-G—甘蓝型油菜 Cabbage type rape; A-H—春性白菜型油菜 Spring cabbage type rape; A-Y—强冬性白菜型油菜 Strong winter cabbage type rape.]

2.4 各位置土壤水分竞争

3 个间作处理不同位置、不同土层对土壤水分的竞争 (RDSW) 值随时间变化 (图 5)，对比可知 A-H 处理和 A-Y 处理竞争作用远小于 A-G 处理。A-G、A-H 和 A-Y 处理，距离苹果树树干 30 cm 处 0—100 cm 土层竞争发生频率分别为 98.9%、27.8% 和 42.2%，距离苹果树树干 60 cm 处 0—100 cm 土层竞争发生频率分别为 80.0%、14.4% 和 26.7%，距离苹果树树干 100 cm 处 0—100 cm 土层竞争发生频率分别为 78.9%、43.3% 和 53.3%，距离苹果树树干 200 cm 处 0—100 cm 土层竞争发生频率分别为 88.9%、22.2% 和 27.8%。

A-H 处理和 A-Y 处理竞争现象主要发生区域为间作边缘位置 (距果树树干 100 cm)，而 A-G 处理在各个位置竞争现象发生频率均较高，以果树位置 (距果树树干 30 cm) 和间作行间位置 (距果树树干 200 cm) 竞争作用最为激烈。就不同处理竞争现象发生深度来说，A-H 处理和 A-Y 处理主要发生在 0—60 cm 土层而 A-G 处理在 0—100 cm 土层均有发生。

2.5 不同处理对苹果生长和品质的影响

由表 2 可知，与清耕 (CK) 相比，行间间作油菜对果树叶片和新梢生长均有显著影响。A-Y 处理百叶厚和新梢长度增加最大，提升比例分别为 9.04% 和 13.20%。A-H 处理叶绿素含量提升比例最大，达到 15.16%。A-H 处理和 A-Y 处理果树的百叶厚、叶绿素含量和新梢长度的提升作用均高于 A-G 处理，这主要是因为 A-H 处理和 A-Y 处理有助于深层土壤水分提升，有利于水肥耦合，从而促进了叶片和新梢的生长发育。

由表 3 可知，果树行间间作油菜对苹果果实的内在品质影响存在着差异。其中，A-H 处理的苹果可溶性固形物、可溶性糖和 V_c 含量均高于其他处理，清耕 (CK) 处理最低。其中，A-H 处理较 CK 可溶性固形物、可溶性糖和 V_c 含量分别提升了 1.00 个百分点、1.57 个百分点和 47.58%。可滴定酸以清耕 (CK) 处理最高，A-H 处理最低，降低了 0.06 个百分点。由此可知，行间间作油菜有助于苹果果实内在品质的提升。由于试验区果树产量在两年试验期间受到冰雹、冻害等极端气象条件的影响很大，不具有代表性。加之，果树刚开始挂果，均匀性差，苹果树果实产量不具有代表性。所以未做产量的统计分析。

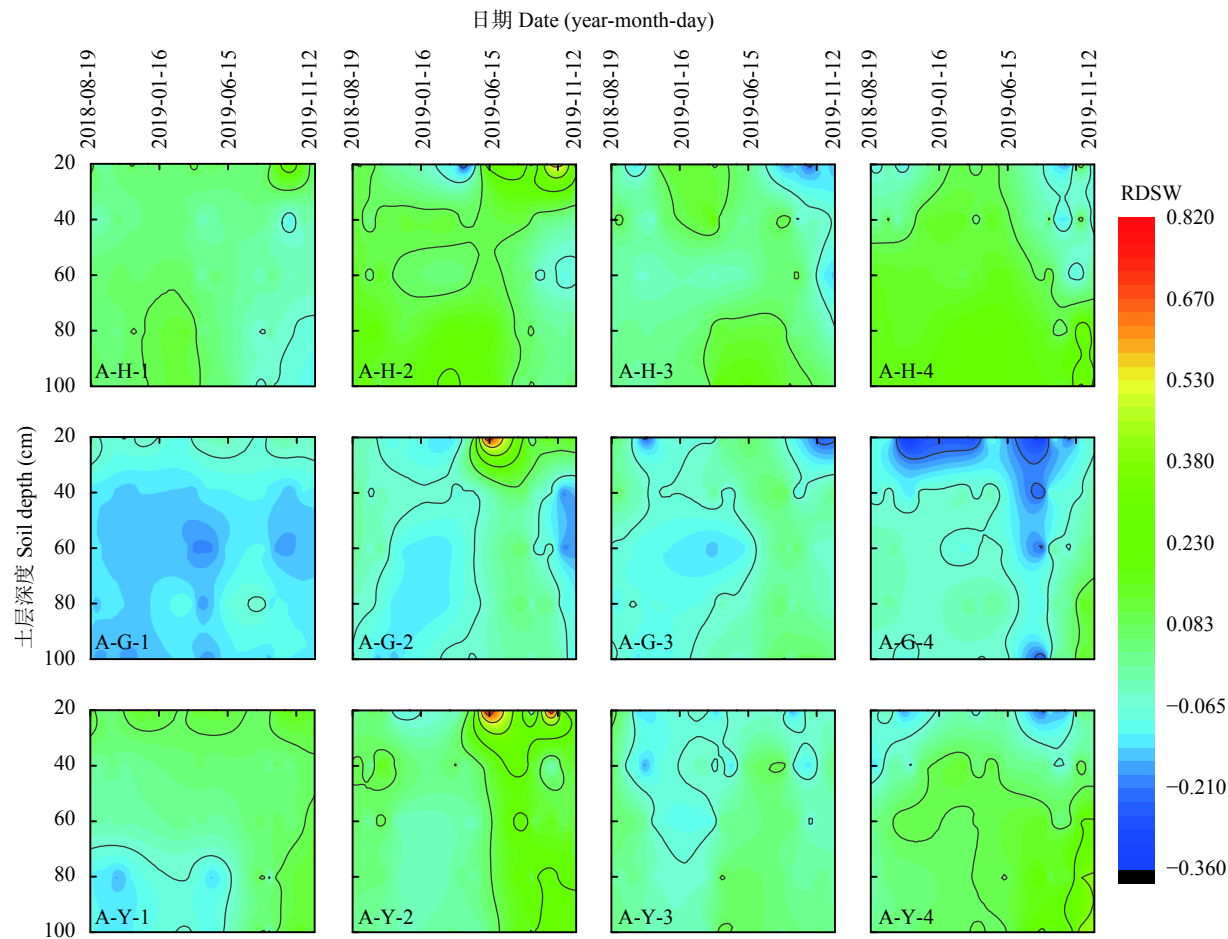


图 5 3 种类型油菜间作各位置对土壤水分的竞争值 (RDSW) 变化

Fig. 5 Changes in relative difference to soil water (RDSW) at various positions of the three types of rape intercropping
[注 (Note) : A-H—春性白菜型油菜 Spring cabbage type rape; A-G—甘蓝型油菜 Cabbage type rape; A-Y—强冬性白菜型油菜 Strong winter cabbage type rape. 图中 1, 2, 3, 4 分别代表距离果树 30、60、100、200 cm 处的位置 Figures 1, 2, 3, and 4 represent the four water monitoring positions in 30, 60, 100, and 200 cm away from the fruit tree.]

表 2 不同类型油菜间作处理果树叶片质量和叶梢发育状况

处理 Treatment	百叶厚 100-leaves thickness		叶绿素 SPAD		新梢长度 New shoot length	
	实测值 (mm)	提升比例 (%)	实测值	提升比例 (%)	实测值 (cm)	提升比例 (%)
	Measured	Improved ratio	Measured	Improved ratio	Measured	Improved ratio
CK	23.23 ± 0.35 c		45.79 ± 0.84 c		35.08 ± 0.39 c	
A-H	25.20 ± 0.40 a	8.48	52.73 ± 0.39 a	15.16	39.15 ± 0.37 a	11.60
A-G	24.23 ± 0.60 b	4.30	51.13 ± 0.60 b	11.66	38.13 ± 0.21 b	8.69
A-Y	25.33 ± 0.46 a	9.04	51.77 ± 0.90 ab	13.06	39.71 ± 0.21 a	13.20

注 (Note) : CK—清耕 No crop growing control; A-H—春性白菜型油菜 Spring cabbage type rape; A-G—甘蓝型油菜 Cabbage type rape; A-Y—强冬性白菜型油菜 Strong winter cabbage type rape. 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in the same column indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

3 讨论

土壤水分是植物的主要水分来源^[14], 是影响植物

生长和生产力的关键因素。在缺乏灌溉条件的黄土高原地区, 土壤水分的补给主要依赖于大气降水。因此, 改善黄土高原旱作苹果园土壤水分环境应通

表 3 不同类型油菜间作处理对苹果生长和品质的影响
Table 3 Effects of different rape intercropping on apple growth and quality

处理 Treatment	可溶性固形物 (%) Soluble solid		可滴定酸 (%) Titratable acid		可溶性糖 (%) Soluble sugar		V _c (mg/100 g)	
	实测值 Measured	提升 Increase	实测值 Measured	提升 Increase	实测值 Measured	提升 Increase	实测值 (mg/100 g) Measured	提升比例 (%) Increase
CK	15.27 b		0.42 a		10.80 b		3.93 c	
A-H	16.27 a	1.00	0.36 b	-0.06	12.37 a	1.57	5.80 a	47.58
A-G	15.60 b	0.33	0.39 ab	-0.03	11.83 ab	1.03	5.23 ab	33.08
A-Y	15.47 b	0.20	0.39 ab	-0.03	11.53 ab	0.73	4.83 b	22.90

注 (Note) : CK—清耕 No crop growing control; A-H—春性白菜型油菜 Spring cabbage type rape; A-G—甘蓝型油菜 Cabbage type rape; A-Y—强冬性白菜型油菜 Strong winter cabbage type rape. 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in the same column indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

过两方面考虑：首先提高降水资源利用效率避免径流损失，其次要增强土壤水分的保蓄能力。在本研究中，春性白菜型油菜 (A-H) 间作于苹果园行间后能够促进行间位置土壤水分的稳定，对 20—100 cm 土层土壤水分提升效果明显，相比 CK 增加了 12.1%，其次是强冬性白菜型油菜 (A-Y) 相比 CK 增加了 6.4%，而甘蓝型油菜 (A-G) 相比 CK 降低了 4.9%，但 3 种油菜对于行间 0—20 cm 土层土壤水分均表现为消耗，消耗程度以 A-H 处理最小、A-G 处理最大，造成这种差异的主要原因可能是 3 个油菜品种特性不同，甘蓝型油菜因具有最大的干物质积累 (表 1)，因此对土壤水分的消耗也最大。春性白菜型油菜之所以能够促进行间位置土壤水分的稳定、提高 20—100 cm 土层土壤含水量，除干物质积累最小外，主要是因为行间生草以后土壤水力特性得到改善，入渗速率增加，有利于深层土壤水分的补给^[15]，这也与凌强等^[16]研究结果一致。3 个间作处理果树休眠期平均土壤储水量损失均小于 CK，则体现了果园生草对土壤水分的保蓄效果。

果园生草系统建立应符合一个前提条件，即所涉及的生草种类具有与果树互补的水资源利用模式，这样有利于避免或减小水分竞争作用^[17]。这一前提在水资源丰富的地区成立，如潮湿的热带地区等^[18]。然而，在水资源有限的黄土高原地区，水分竞争仍是影响果园生草推广的一个主要问题^[19]。基于此，应筛选合适的生草时间和生草品种，避免根系重叠和生育重合，减少水分竞争现象。在降雨相对丰沛的秋季，果园生草模式避免了生草与苹果树高耗水期重合，在一定程度上降低了土壤水分竞争的发生几率，但 3 个油菜品种因其生物学特性不同而表现出明显的差异。白菜型油菜 (A-H 和 A-Y) 水分竞争现

象主要发生区域为间作边缘位置 (距果树 100 cm)，而甘蓝型油菜 (A-G) 在各个位置竞争现象发生频率均较高，以距树干 30 和 200 cm 竞争作用最为激烈，且竞争发生深度更大。Sudmeyer 等^[20]和 Rao 等^[21]研究认为根系重叠区域是产生种间竞争的主要原因。在本研究中，3 个油菜品种根系分布、形态大小及生物量累积存在一定差异，导致与苹果树根系重叠区域不同，故水分竞争位置和竞争深度不同。同时，甘蓝型油菜因其耗水量大，果树区域土壤水分向行间运移从而对果树位置也产生竞争作用。

在果农追求产量的同时，果实的品质也越来越受到更多的关注，果园也朝着生态绿色的方向发展。与清耕相比，行间间作油菜对果树叶片和新梢生长均有显著影响，白菜型油菜 (A-H 和 A-Y) 对果树的百叶厚、叶绿素含量和新梢长度的提升作用均高于甘蓝型油菜 (A-G)。另外，研究发现行间间作油菜能显著提高果实的可溶性固形物、可溶性糖和 V_c 含量，对可滴定酸含量也有一定的降低作用。这主要是因为白菜型油菜 (A-H 和 A-Y) 有助于促进降水入渗，提升了深层土壤水分，有利于水肥耦合，从而促进了叶片和新梢的生长发育，其次可能是由于行间间作油菜对土壤肥力的提升作用导致的^[22]，王锐等^[23]在生草覆盖对葡萄品质的影响研究中发现生草覆盖不但能提升土壤肥力，同时还改善了土壤的微生物环境，进而促进了果树生长，提升了葡萄的品质。此外，魏树伟等^[24]和 Xun 等^[25]也发现果园生草覆盖能增加土壤有机质含量，同时提升土壤对氮、磷和钾的吸附能力，使土壤中的氮、磷和钾趋于均衡供应，改善果实品质。

4 结论

行间间作春性白菜型油菜处理促进了行间土壤水分的稳定, 对 20—100 cm 土层土壤含水量有明显的提升作用, 较清耕处理提高了 12.1%。同时有效降低了苹果树休眠期土壤储水量损失, 其水分竞争作用也远小于其他处理。

行间间作春性白菜型油菜处理对苹果果实品质的提升作用明显高于清耕处理、行间间作强冬性白菜型油菜处理和甘蓝型油菜处理。间作春性白菜型油菜提升苹果可溶性固形物、可溶性糖和 V_c 含量的效果均高于其他处理, 分别较清耕处理提高 1.00 个百分点、1.57 个百分点和 47.58%。间作春性白菜型油菜处理对果树生长发育的提升作用明显高于清耕处理和间作甘蓝型油菜处理。

参 考 文 献:

- [1] 贾如浩, 杨建利, 赵西宁, 等. 二元覆盖对苹果树低耗水生育期土壤水分的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4082–4090.
Jia R H, Yang J L, Zhao X N, *et al.* Effects of binary coverage on soil water content in apple orchards during low-water-consumption growth period[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(12): 4082–4090.
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017.
- [3] 曹裕, 李军, 张社红, 等. 黄土高原苹果园深层土壤干燥化特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 72–79.
Cao Y, Li J, Zhang S H, *et al.* Characteristics of deep soil desiccation of apple orchards in different weather and landform zones of Loess Plateau in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(15): 72–79.
- [4] Peng X X, Guo Z, Zhang Y J, *et al.* Simulation of long-term yield and soil water consumption in apple orchards on the Loess Plateau, China, in response to fertilization[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 5444.
- [5] 李会科, 赵政阳, 张广军, 等. 果园生草的理论与实践——以黄土高原南部苹果园生草实践为例[J]. 草业科学, 2005, 22(8): 32–37.
Li H K, Zhao Z Y, Zhang G J, *et al.* The theory and practice of grass interplanting in orchards—Take the practice of the apple orchard in the southern Loess Plateau as an example[J]. Pratacultural Science, 2005, 22(8): 32–37.
- [6] Schwab N, Schickhoff U, Fischer E. Transition to agroforestry significantly improves soil quality: A case study in the central mid-hills of Nepal[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 205: 57–69.
- [7] 李会科, 张广军, 赵政阳, 等. 黄土高原旱地苹果园生草对土壤贮水的影响[J]. 草地学报, 2007, 15(1): 76–81.
Li H K, Zhang G J, Zhao Z Y, *et al.* Effects of growing different herbages on soil water-holding of a non-irrigated apple orchard in the Weibei area of the Loess Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica, 2007, 15(1): 76–81.
- [8] 高茂盛, 廖允成, 李侠, 等. 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, *et al.* 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.
- [9] 朱首军, 丁艳芳. 渭北旱塬农林复合生态系统土壤水扩散率研究[J]. 水土保持通报, 1999, 19(3): 29–31.
Zhu S J, Ding Y F. Soil water diffusivity of agroforestry in the Weibei rainfed highland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1999, 19(3): 29–31.
- [10] 李会科, 梅立新, 高华. 黄土高原旱地苹果园生草对果园小气候的影响[J]. 草地学报, 2009, 17(5): 615–620.
Li H K, Mei L X, Gao H. Effect of grass planting on the microclimate of apple orchard in the dryland area of Loess Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica, 2009, 17(5): 615–620.
- [11] 杜善保, 张军科. 黄土高原旱地苹果园生草栽培研究进展[J]. 中国农学通报, 2014, 30(28): 81–86.
Du S B, Zhang J K. Research advances of pasture-planting in apple orchard on semi-dry region of the Loess Plateau[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(28): 81–86.
- [12] 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.
- [13] 霍高鹏, 赵西宁, 高晓东, 等. 黄土丘陵区枣农复合系统土壤水分利用与竞争[J]. 自然资源学报, 2017, 32(12): 2043–2054.
Huo G P, Zhao X N, Gao X D, *et al.* Soil water use and competition in jujube-crop systems in Loess Hilly Region[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(12): 2043–2054.
- [14] 李会科, 李金玲, 王雷存, 等. 种间互作对苹果/白三叶复合系统根系生长及分布的影响[J]. 草地学报, 2011, 19(6): 960–968.
Li H K, Li J L, Wang L C, *et al.* Effects of interspecific interaction on the growth and distribution of roots in apple-white clover intercropping system[J]. Acta Agrestia Sinica, 2011, 19(6): 960–968.
- [15] Gao X, Liu Z, Zhao X, *et al.* Extreme natural drought enhances interspecific facilitation in semiarid agroforestry systems[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 265: 444–453.
- [16] 凌强, 赵西宁, 高晓东, 等. 间作经济作物对黄土丘陵区旱作红枣土壤水分的调控效应[J]. 应用生态学报, 2016, 27(2): 504–510.
Ling Q, Zhao X N, Gao X D, *et al.* Effects of inter-row economic crop planting on soil moisture in a rain-fed jujube orchard in loess hilly region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(2): 504–510.
- [17] Fernandez M E, Gyenge J E, Schlichter T M. Balance of competitive and facilitative effects of exotic trees on a native Patagonian grass[J]. Plant Ecology, 2007, 188(1): 67–76.
- [18] Ong C K, Leakey R. Why tree-crop interactions in agroforestry appear at odds with tree-grass interactions in tropical savannahs[J]. Agroforestry Systems, 1999, 45(1–3): 109–129.
- [19] Ling Q, Gao X, Zhao X, *et al.* Soil water effects of agroforestry in

- rained jujube (*Ziziphus jujube* Mill.) orchards on loess hillslopes in Northwest China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 247: 343–351.
- [20] Sudmeyer R A, Hall D J M. Competition for water between annual crops and short rotation mallee in dry climate agroforestry: The case for crop segregation rather than integration[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2015, 73: 195–208.
- [21] Rao M R, Nair P K, Ong C K. Biophysical interactions in tropical agroforestry systems[J]. *Agroforestry Systems*, 1997, 38(1): 3–50.
- [22] 刘蝴蝶, 郝淑英, 曹琴, 赵国平. 生草覆盖对果园土壤养分、果实产量及品质的影响[J]. *土壤通报*, 2003, 34(3): 184–186.
- Liu H D, Hao S Y, Cao Q, Zhao G P. Effect of grass cover on soil nutrient and yield and quality of apple[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(3): 184–186.
- [23] 王锐, 闫鹏科, 马婷慧, 等. 行内生草对土壤微环境和酿酒葡萄品质的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(3): 195–203.
- Wang R, Yan P K, Ma T H, *et al.* Effects of intra-row planted grass on soil microenvironment and wine grape quality[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(3): 195–203.
- [24] 魏树伟, 王少敏, 张勇, 等. 不同土壤管理方式对梨园土壤养分、酶活性及果实风味品质的影响[J]. *草业学报*, 2015, 24(12): 46–55.
- Wei S W, Wang S M, Zhang Y, *et al.* Effects of different soil management methods on the soil nutrients, enzyme activity and fruit quality of pear orchards[J]. *Acta Prataculture Sinica*, 2015, 24(12): 46–55.
- [25] Xun Q, Jie G, Hong J, *et al.* Effects of living mulches on the soil nutrient contents, enzyme activities, and bacterial community diversities of apple orchard soils[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2015, 70: 23–30.