

滴灌水肥调控对苹果—大豆间作系统光合特性和水分利用的影响

李超楠^{1,2}, 王若水^{1,2}, 周宣^{1,2}, 郑成浩^{1,2}, 刘文治^{1,2}, 李永红³

(1.北京林业大学山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站,北京 100083;

2.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;3.山西吉县林业局,山西 临汾 042200)

摘要:为探究适于晋西黄土区果农间作系统滴灌水肥一体化管理制度,以典型的苹果—大豆间作系统为研究对象,设置灌水和施肥两因素,分析不同水肥调控措施对土壤含水量分布、苹果和大豆光合生理特征、大豆生长和产量以及间作系统水分利用等指标的影响。试验在大豆4个关键需水期进行灌水,肥料随灌溉水施入,每次设置不同灌水上限和施肥水平,4个灌水量上限水平分别为:田间持水量(F_c)的60%(W1),70%(W2),80%(W3)和90%(W4),3个施氮水平:纯N 59.40 kg/hm²(F1),92.00 kg/hm²(F2),124.32 kg/hm²(F3),对照处理(CK)整个生育期不灌水不施肥,仅在播种前施入基肥。结果表明:各水肥处理土壤含水量在水平和垂直方向上具有显著差异,灌水量对土壤含水量的影响程度高于施肥量和水肥交互作用。苹果和大豆的净光合速率(P_n)和蒸腾速率(T_r)的日变化特征相似,均为单峰型曲线,最大值均为W3F2处理。各处理大豆株高、茎粗和叶面积指数(LAI)分别较对照组提高了1.3%~32.3%,2.8%~33.9%和3.4%~125.9%,其中最大值均出现在W3F2处理,该处理大豆产量和间作系统水分利用效率(WUE)也最优,较其他处理分别提高了10.9%~99.3%和8.0%~70.0%。在播种至出苗期、幼苗期至分枝期、开花结荚期和鼓粒期可以设置80% F_c 的灌水上限,同时在大豆幼苗期至分枝期、结荚期和鼓粒期分别施加92.00 kg/hm²的氮肥,该水肥管理方式使苹果—大豆间作系统获得较高的作物产量及水分利用效率,可为该地区间作系统滴灌水肥一体化管理提供参考。

关键词:果农间作;滴灌;晋西黄土区;光合;水分利用效率

中图分类号:S271.4

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)03-0299-12

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.03.044

Effects of Water and Fertilizer Regulation on Photosynthetic Characteristics, Yield and Water Use of Apple-soybean Intercropping System Under Drip Irrigation

LI Chaonan^{1,2}, WANG Ruoshui^{1,2}, ZHOU Xuan^{1,2}, ZHENG Chenghao^{1,2}, LIU Wenzhi^{1,2}, LI Yonghong³

(1.Jixian Forest Ecosystem National Observation and Research Station, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2.College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 3. Jixian Forestry Bureau, Linfen, Shanxi 042200)

Abstract: In order to explore the optimal integrated management system of water and fertilizer under drip irrigation in a fruit-crop intercropping system in the loess area of Shanxi Province, a one-year experiment was carried out in the typical apple (*Malus pumila*)-soybean (*Glycine max*) intercropping system, and two factors of irrigation and fertilization were set up to analyze the influence of different water and fertilizer control measures on soil water content distribution, photosynthetic characteristics of apple and soybean, soybean growth and yield, and water use of intercropping system. In the experiment, irrigation was conducted in four key water demand periods of soybean. Fertilizer was applied with irrigation water, and different upper limit of irrigation and fertilization level were set each time. The four levels of maximum irrigation were 60% (W1), 70% (W2), 80% (W3) and 90% (W3) of field capacity (F_c), and the three different nitrogen fertilization levels were pure nitrogen 59.40 kg/hm² (F1), 92.00 kg/hm² (F2) and 124.32 kg/hm² (F3). In addition, the rain-fed crop (neither irrigation nor fertilization during the whole growth period, only basal fertilizer was applied before sowing) was taken as the control (CK). The results indicated that the soil water content for each water and fertilizer treatment had significant differences in both horizontal and vertical directions. The influence of irrigation amount on soil water content was more significant than that of fertilization amount and interaction of water and fertilizer. The diurnal variation characteristics of net photosynthetic rate (P_n) and

收稿日期:2019-10-10

资助项目:中央高校基本科研业务费专项(2017PT12)

第一作者:李超楠(1995—),女,硕士研究生,主要从事复合农林研究。E-mail:lcn0319@163.com

通信作者:王若水(1983—),男,博士,副教授,主要从事盐碱地水盐调控、生态修复与复合农林研究。E-mail:wrsily_2002@163.com

transpiration rate (T_r) for apple and soybean were similar, both of which were unimodal curves and the maximum values were obtained in W3F2. The plant height, stem diameter and leaf area index (LAI) of each water and fertilizer treatment for soybean increased by 1.3%~32.3%, 2.8%~33.9% and 3.4%~125.9%, compared with CK, respectively. Moreover, all the maximum value of growth indexes appeared in W3F2. The soybean yield and water use efficiency (WUE) for intercropping system were also optimal in W3F2, which increased by 10.9%~99.3% and 8.0%~70.0%, compared with other treatments, respectively. The irrigation upper limit of 80% Fc could be set from sowing to emergence stage, from seedling to branching stage, from flowering to pod and blast stage. Meanwhile, 92.00 kg/hm² nitrogen fertilizer could be applied at seedling to branching stage, at pod and drum stage of soybean, respectively. This water and fertilizer management under drip irrigation could make the apple-soybean intercropping system obtain higher crop yield and water use efficiency, which could provide reference for integrated management of water and fertilizer under drip irrigation for the intercropping system in this area.

Keywords: fruit-crop intercropping; drip irrigation; Loess Plateau of west Shanxi province; photosynthetic; water use efficiency

农林复合经营在控制水土流失和提高土地利用等方面发挥着重要作用,近 10 年来在晋西黄土区得到广泛的应用。苹果树是该区主要的经济树种,在该区广泛种植,但果树生长周期长,效益滞后,因此在未坐果的幼龄果树行间间作大豆成为了晋西黄土区主要的农林复合经营模式之一^[1]。但该区地下水位深(30 m 以下)、土壤蒸发强烈,降低了间作系统对水资源的利用效率^[2]。此外,该区土壤肥力水平较低,加之种间对水分和养分的竞争,更易加剧间作系统水肥资源的匮乏,成为制约该区农林复合经营的主要因素。目前该区在间作系统内进行的水分和养分补给多采用较为粗放的大田漫灌方式,更增加了水分和养分的无效消耗,不适合为供水有限地区水肥资源高效利用提供技术依据。

滴灌作为一种高效的水肥一体化灌溉技术,不仅能大幅度提高水肥利用效率,还能实现高产^[3-4]。当前该水肥一体化技术主要应用在单作系统,而间作系统内部复杂的种间关系及生理生态互作效应,使其光合效率、产量及水分利用与单作相比均存在较大差异。已有研究^[5]表明,间作能提高作物功能叶片的叶绿素含量,改变叶绿素构成,显著提高净光合速率,延缓叶片衰老。且农林复合系统的水分利用在时间和空间上具有互补性,Wanvestraut 等^[6]研究了美洲山核桃和棉花间作系统的水分竞争,发现为避免水分竞争,山核桃的根系可伸展到更深的土层,从而提高了间作系统的水分利用效率;此外在间作系统中,林木深根可从农作物根系分布以下区域土壤中吸收未被利用而从表层淋溶的养分,同时通过对树木剪枝,养分以凋落物的形式被农作物重复利用,从而提高了系统的养分利用效率^[7]。目前对于滴灌条件下的果农间作研究主要集中在南疆地区的枣棉间作系统,李发永等^[8]采用一膜四行两管膜下滴灌方式,对枣棉间作

模式下全生育期水肥的交互影响及水分利用效率进行了研究。然而,因不同土质下滴灌湿润体分布规律及各间作方式下的种间互作的差异,滴灌水肥一体化作为精准调控管理方式,因各地区气候、土质和间作条件的不同而异,在晋西黄土区,降水稀少且分配不均,春旱现象严重,土壤疏松多孔,透水性强,针对该区特殊的气候和土壤特征,当前需重点研究滴灌下果农间作系统生理生态过程和水分利用状况,这对提高该区果农间作系统水肥利用率以及持续经营具有重要意义。

综上,本试验以晋西黄土区典型的幼龄苹果一大豆间作系统为研究对象,采用滴灌施肥技术,重点研究不同滴灌水肥调控措施对间作系统光合生理特性、产量及水分利用的影响,旨在为该地区果农间作系统滴灌水肥一体化技术的推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于山西省吉县(36°53′10″—36°21′02″N, 110°27′30″—111°07′20″E),该地属于黄土残塬沟壑区,表层为第四纪风积黄土,呈微碱性(pH=7.9),土壤贫瘠,有机质在 1% 以下。气候属温带大陆性气候,近 30 年平均降水量 575.9 mm,主要集中在 6—8 月,约占全年降水量的 61.8%,年平均蒸发量为 1 723.9 mm。年平均无霜期 170 天左右,平均气温 10 ℃,平均积温 3 357.9 ℃。供试果园田间持水量(F_c)为 22.22%(kg/kg),平均干容重为 1.38 g/cm³;0—60 cm 土层基础肥力(质量比)为:有机质 9.47 g/kg,全氮 0.62 g/kg,铵态氮 0.62 mg/kg,硝态氮 5.91 mg/kg,速效磷 4.53 mg/kg,速效钾 77.86 mg/kg。2018 年生育期降水量为 401.3 mm,平均空气温度为 10.1 ℃。

1.2 供试材料

在山西省吉县中垛乡苹果精品示范园区,选择苹果一大豆间作模式作为研究对象,果树栽植于 2014 年,品

种为短枝红富士,尚未开始坐果,株行距为 4 m×5 m,树行东西走向,平均株高 3.7 m,胸径 6.5 cm,南北冠幅 2.9 m,东西冠幅 3.2 m,冠高 2.9 m。大豆品种为“晋豆 35 号”,株行距为 0.3 m×0.5 m,种植行距离果树 1 m,播种时间为 2018 年 4 月 19 号,每个小区共 2 棵果树,小区面积 40 m²(图 1)。

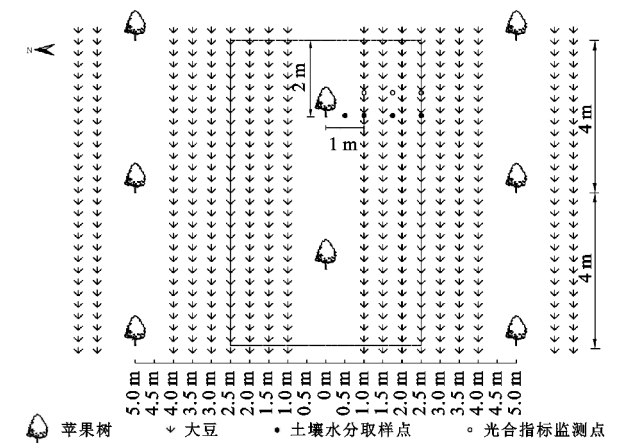


图 1 试验小区和监测点布设示意

1.3 试验设计

1.3.1 灌水量设定 试验于 2018 年 4—10 月进行。根据该地区多年月平均降水量及苹果和大豆的月平均耗水量^[9],在大豆的关键生育期进行灌溉,灌溉方式为滴灌。滴灌带内径为 16 mm,壁厚 0.3 mm,滴头间距 300 mm,滴管带布置间距为 50 cm,滴头设计流量 1.38 L/h。利用球阀控制灌水,管路通过水泵直接供水,在管路的前部安装压力表监测管内水压力,调节各支管闸阀将压力控制至 0.1 MPa。

灌水量根据苹果和大豆适宜的土壤水分范围,设定灌溉上限 4 水平分别为:0—60 cm 土层平均质量含水量占田间持水量的 60%(W1),70%(W2),80%

(W3)和 90%(W4)。由于苹果尚未坐果,所以该间作系统的生育期以大豆为参照,在大豆需水的关键期(播种至出苗期、幼苗期至分枝期、开花结荚期和鼓粒期)进行灌溉,每个生育期内,选择 1 周以上无有效降雨的时段进行灌水,灌水之前先测定土壤含水量,根据实际含水量和设定的上限间的差值来定灌水量,灌水量用水表进行控制(表 1)。

灌水定额计算公式为:

$$M=10\gamma H(\theta_w-\theta_0)$$

式中: M 为灌水量(mm); γ 为土壤计划湿润层内的土壤容重(g/cm³); H 为土壤计划湿润层深度,取 0.6 m,该土层厚度为苹果—大豆主要竞争区域,且滴灌条件下果树根系 80%以上垂直分布在距地表以下 0.1~0.4 m 土层中^[10]; θ_w 为设定灌溉水平下土壤质量含水量; θ_0 为测定时的土壤质量含水量。

1.3.2 施肥量设定 磷肥与钾肥参考当地经验施肥量于播种前作为基肥一次性施入,P₂O₅ 168.8 kg/hm²+K₂O 168.8 kg/hm²。氮肥施用量根据 2 种作物的需肥量并结合当地的经验施肥量设定了 3 个水平,生育期总计施 N 量为 59.40 (F1),92.00 (F2),124.32 kg/hm² (F3)。全生育期施肥 3 次(幼苗期至分枝期、结荚期和鼓粒期),随灌溉水进行滴灌施肥。施肥采用 1/4~1/2~1/4 模式,即前 1/4 通过输水管灌清水,中间 1/2 打开施肥罐阀门施肥,后 1/4 的时间灌清水冲洗。

试验处理采用双因素随机区组设计,双因素包括灌水量和施肥量。共设 13 个处理,包括 1 组空白对照(CK),空白对照处理仅在播种前施用基肥,生育期不进行灌水和施肥,每个处理重复 3 次。共计 39 个试验小区。

表 1 不同水分调控灌溉定额 单位:m³/hm²

处理	大豆出苗期 05-11 (苹果萌芽期)	大豆分枝期 06-20 (苹果幼果期)	大豆结荚期 07-24 (苹果果实膨大期)	大豆鼓粒期 08-26 (苹果成熟期)	生长期总量
W1F1	10	10	20	10	50
W1F2	10	10	20	10	50
W1F3	10	10	20	10	50
W2F1	30	90	70	100	290
W2F2	30	90	0	50	170
W2F3	30	90	0	50	170
W3F1	60	180	130	100	470
W3F2	60	180	140	150	530
W3F3	60	180	100	80	420
W4F1	80	360	250	200	890
W4F2	80	360	250	200	890
W4F3	80	360	250	200	890
CK	0	0	0	0	0
降雨量/mm	60.7	51.7	208.3	80.6	401.3

1.4 测定项目与方法

1.4.1 土壤含水量的测定 播种后,每隔 7 天用德国 IMKO 公司 TRIME—IPCO 土壤水分测定仪监测田间

土壤含水量,在距离树行 0.5,1.0,1.75,2.5 m 处布设取样点(图 2),监测土层深度为 0—60 cm,每层 10 cm。在灌水和降雨后进行加测,采用烘干法进行校正。

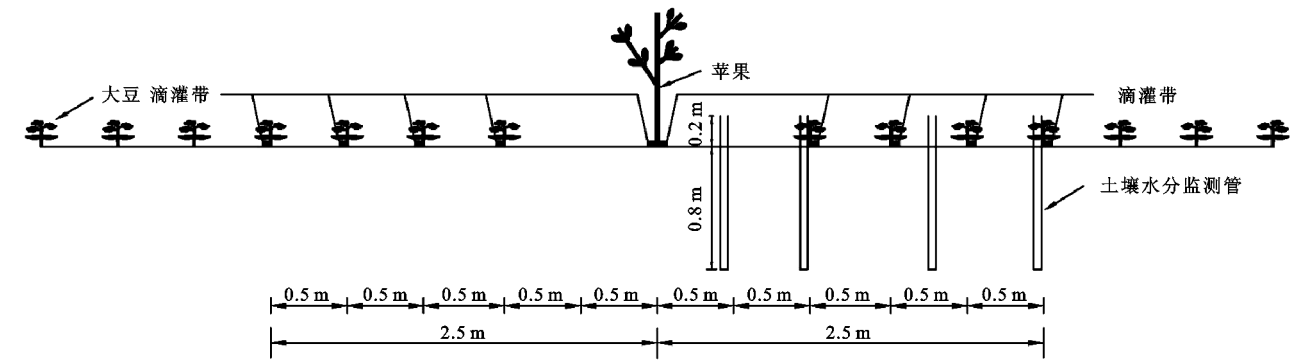


图 2 滴灌带布设示意

1.4.2 植物生理指标的测定

(1)叶片叶绿素含量在大豆出苗期、分枝期、结荚期和鼓粒期,采用日本 Minolta 公司 SPAD—502 叶绿素仪测定苹果和大豆叶绿素相对含量,每个小区通过样线确定取样点,取样线位于 2 棵果树之间,垂直于树行方向(图 1),取样点分别距离树行 1.0,1.7,2.4 m,选择距离取样点最近的大豆并挂牌标记,每株大豆选择 3 片上层三出复叶的中间叶测定叶绿素指标^[11]。在果树阳面距树底部 1.5~2.0 m 的新枝上选取 3 片健康叶片测定叶绿素指标,每个试验小区选取生长一致的向阳健康新枝,并挂牌标记。测量时避开叶脉,多次测量取平均值。

(2)叶片光合指标选择晴朗无云的天气,在大豆分枝期、结荚期和鼓粒期采用美国 Li—Cor 公司 Li—6400 便携式光合仪测定苹果和大豆的光合指标,测定时间为 9:00—17:00,每个指标测 3 个重复,最后取平均值,叶片选取同叶绿素指标。

测量指标包括净光合速率 P_n ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)、蒸腾速率 T_r ($\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。

1.4.3 作物生长指标的测定 在大豆分枝期、结荚期和鼓粒期,用卷尺测定株高(cm),游标卡尺测量主茎第 3 节的茎粗(mm),长宽系数法测定大豆叶面积($\text{长} \times \text{宽} \times 0.75$)^[12],并将单位土地面积上叶面积换算为叶面积指数(LAI),大豆植株的选取同叶绿素。

1.4.4 产量的测定 于成熟期分小区测量大豆籽粒产量。因幼龄果树不挂果或挂果较少,不计苹果产量。

1.5 数据处理与统计分析

1.5.1 耗水量的计算 采用水量平衡原理计算间作系统中大豆各生育期的耗水量,计算公式为:

$$ET = I + P + U - R - F \pm \Delta W$$

式中:ET 为阶段耗水量(mm);I 为阶段内灌水量(mm);P 为阶段内有效降水量(mm);U 为地下水补给水量(mm);R 为地表径流量(mm);F 为深层渗漏量

(mm); ΔW 为阶段初和阶段末 0—60 cm 土壤贮水消耗量的差值(mm)。本试验地势平坦,可视地表径流为 0;地下水埋深 30 m 以下,地下水补给量为 0;滴灌不考虑深层渗漏量,深层渗漏为 0,R、U、F 值均忽略不计。

1.5.2 水分利用效率 基于大豆产量的间作系统水分利用效率计算公式为: $WUE = GY/ET$ 。式中:WUE 为水分利用效率 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$;GY 为大豆籽粒产量(kg/hm^2)。灌溉水利用效率计算公式为: $IWUE = GY/I$ 。式中:IWUE 为灌溉水利用效率 (kg/m^3);I 为灌水量(m^3/hm^2)。

1.6 数据处理与分析

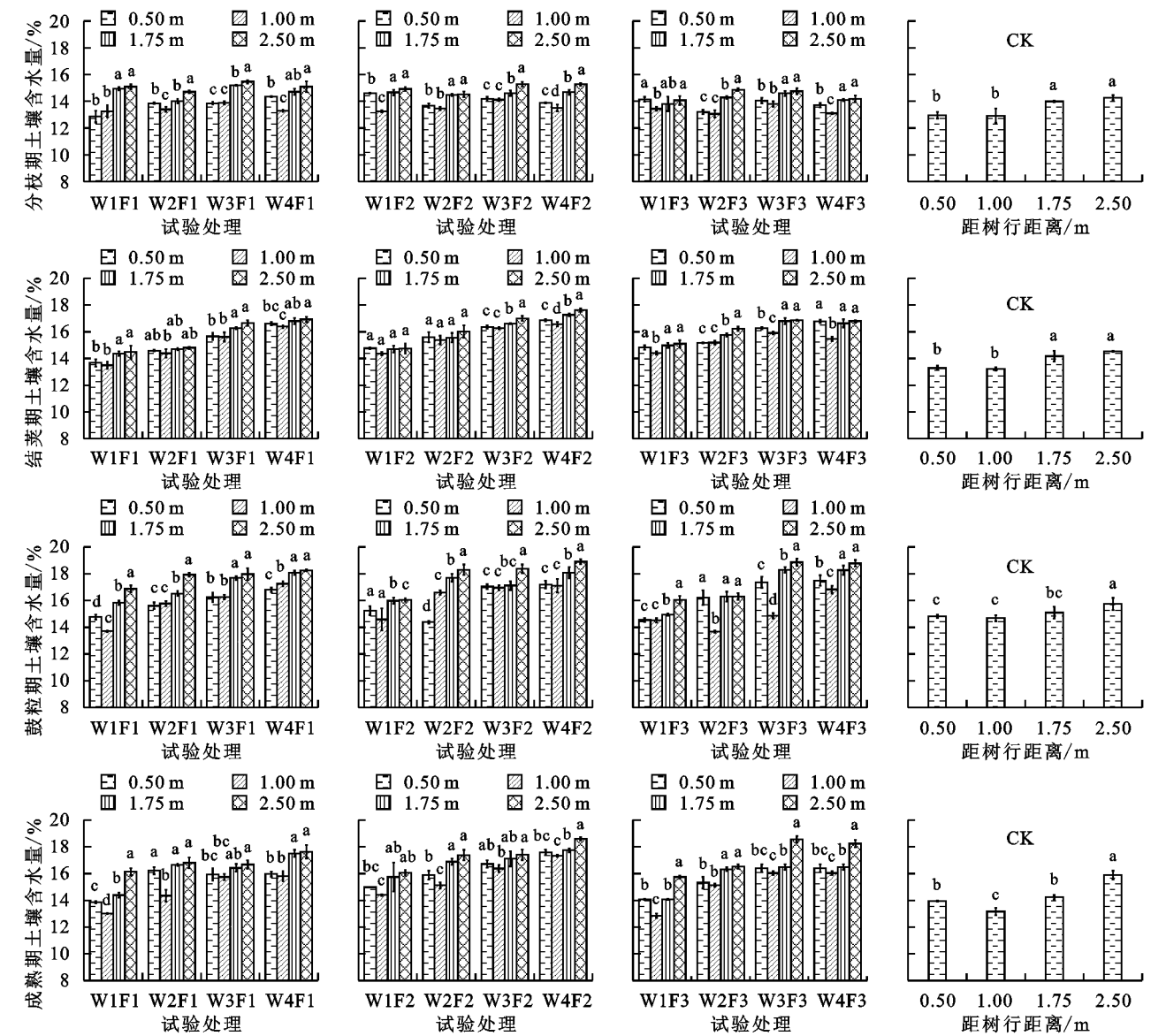
采用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据处理,使用 Origin 9.0 软件作图,采用 SPSS 20.0 软件进行方差分析和相关分析,LSD 法进行差异显著性检验($P=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤水分空间分布

由图 3 可知,0—60 cm 土层土壤平均含水量总体随距树行距离的增大先降后升,最小值出现在 1 m 处。在相同的施肥水平下,分枝期内不同距离的土壤含水量总体上随灌水量的增加先升高后降低,W3 水平下达到最大值,其余生育期均随灌水量的增加而升高。在相同的灌溉水平下,土壤含水量随施肥量的增加先升高后降低,在 F2 水平下达到最大值。

在垂直方向上(图 4),土壤含水量随生育期呈先增后降的趋势,鼓粒期达到最大。不同生育期 0—60 cm 土层土壤含水量均随土层深度的增加而增加,0—30 cm 土层土壤含水量变化比较剧烈,30—60 cm 土层土壤含水量变幅逐渐趋于稳定。在相同的施肥水平下,0—30 cm 土壤含水量随灌水量的增加先升高后降低,W3 组达到最大值。0—60 cm 土层内,W3 和 W4 组垂直变化较低灌水变化剧烈,鼓粒期尤为明显。全生育期,W3F3 和 W4F3 处理 50—60 cm 土壤含水量均大于其他处理。



注:不同小写字母表示同一处理不同距离之间土壤含水量差异显著($P<0.05$)。

图 3 大豆生育期内土壤含水量水平变化动态

方差分析(表 2)表明,灌水量、施肥量对 0—60 cm 土层内土壤含水量影响均达到极显著水平($P<0.01$),其中,灌水量因素对于土壤含水量的影响大于施肥量和两者交互作用。

表 2 不同生育期土壤含水量的双因素方差分析

因子	分枝期	结荚期	鼓粒期	成熟期
灌水量	34.111 **	549.592 **	317.441 **	451.051 **
施肥量	35.795 **	78.498 **	13.970 **	87.407 **
灌水×施肥	4.015 **	14.984 **	8.200 **	11.131 **

注:ns 为相关性不显著($P>0.05$);* 为相关性显著($P<0.05$);** 为相关性极显著($P<0.01$)。下同。

2.2 苹果和大豆叶绿素含量

由表 3 可知,不同水肥处理下苹果叶片 SPAD 值均随生育期呈增加趋势。生育前期 SPAD 值增加最为迅速,生育中期增加趋于平缓,生育后期增加缓慢。苹果叶片 SPAD 最大值出现在成熟期,为 61.74。不同水肥处理的苹果 SPAD 值较 CK 提高 5.4%~14.7%。

在相同的灌溉水平下,整个生育期内,F2 组的苹果 SPAD 值可较其余施肥组提高 0.5%~7.8%。在相同施肥水平下,整个生育期,W3 组苹果和大豆的 SPAD 值可较其余灌溉组提高 0.3%~5.2%。苹果各生育期 SPAD 最大值均为 W3F2 处理,果实膨大期 W3F2 处理显著高于其余处理,且较其余处理提高 0.5%~14.3%($P<0.05$)。

不同水肥处理下大豆叶片 SPAD 值随生育期变幅与苹果叶片类似。大豆叶片最大值出现在鼓粒期,为 50.06。不同水肥处理的苹果 SPAD 值较 CK 提高 1.7%~9.2%。相同的灌溉水平下,除大豆出苗期外,F2 组的大豆 SPAD 值可较其余施肥组提高 0.7%~4.7%。在相同施肥水平下,整个生育期,W3 组大豆的 SPAD 值可较其余灌溉组提高 0.2%~8.5%。

方差分析表明,除大豆出苗期外,其余生育期灌水量、施肥量对果树和大豆叶片 SPAD 值的影响均

达到极显著水平,交互作用对果树和大豆叶片 SPAD 值均无显著影响。

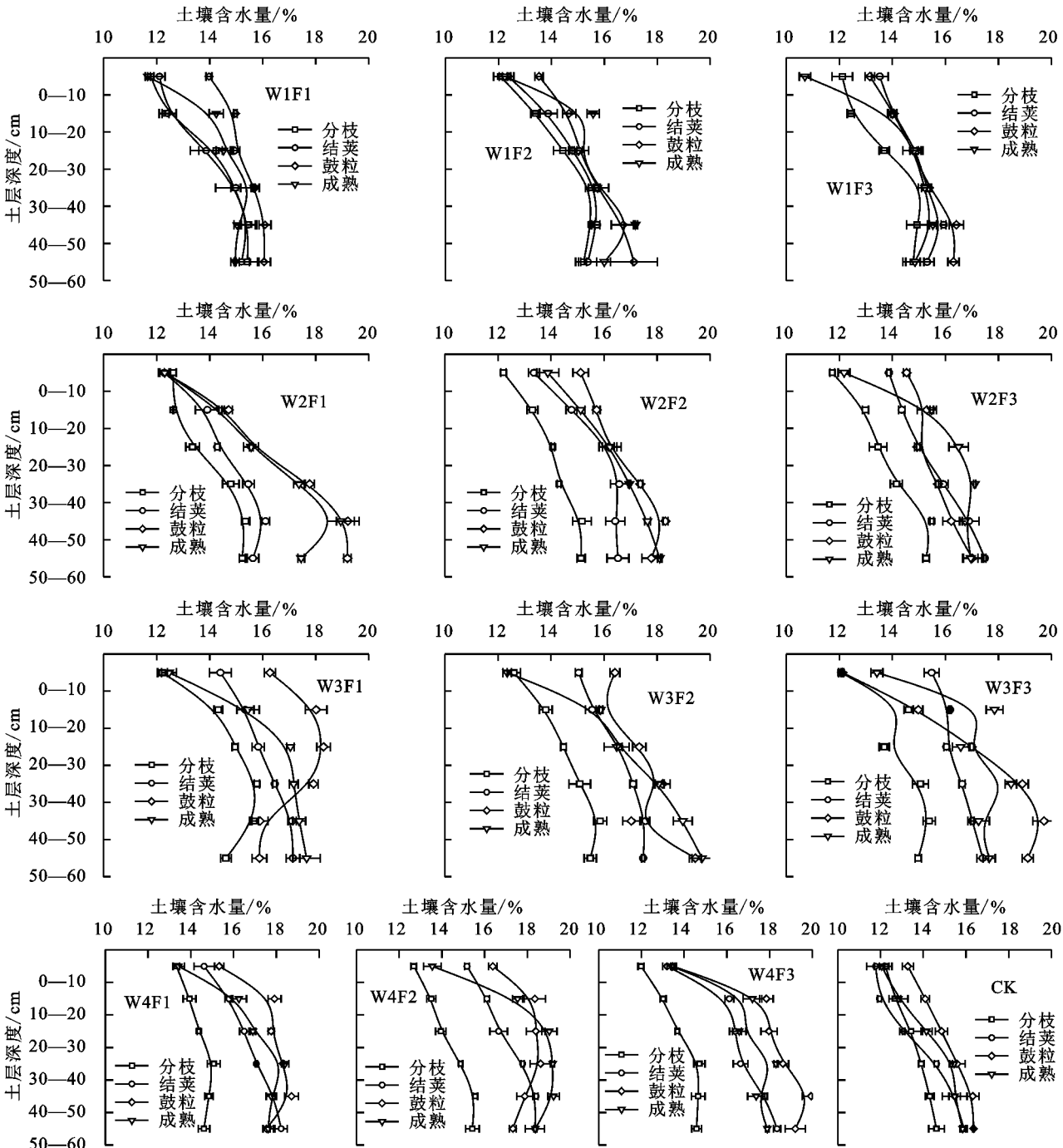


图 4 大豆生育期内土壤含水量垂直变化动态

2.3 苹果和大豆光合生理特性

2.3.1 苹果光合特性 由图 5 可知,各处理果树的 P_n 和 T_r 均在果实膨大期达到峰值,且均随生育期呈先增后减的趋势。不同生育期各处理苹果 P_n 和 T_r 日变化均为单峰曲线, P_n 和 T_r 峰值分别出现在 11:00 和 13:00,最小值均在 17:00。总体上,在相同的灌溉水平下,不同生育期苹果 P_n 和 T_r 均随施肥量的增加呈先增后减的趋势,坐果至成熟期,F2 组的 P_n 和 T_r 较其余施肥组分别提高 1.6%~7.8% 和 7.9%~14.4%。总体上,在相同的施肥水平下,坐

果期苹果 P_n 以及果实膨大期和成熟期苹果 T_r 不同灌水水平差异显著($P<0.05$),分枝至鼓粒期,W3 组的 P_n 和 T_r 较其余灌水组分别提高 1.3%~12.0% 和 4.8%~38.1%。其中,全生育期 W3F2 处理的 P_n 和 T_r 较其余处理提高 1.4%~34.7% 和 3.7%~67.9%。

方差分析表明,灌水和施肥对果树叶片的 P_n 和 T_r 影响均达到极显著水平,两者交互作用对不同生育期的 P_n 和 T_r 值影响显著性水平因生育期的不同而异,其中对坐果期 P_n 和果实膨大期 T_r 影响极显

著,对成熟期 P_n 影响显著,对果实膨大期 P_n 和成熟期 T_r 无显著影响。

2.3.2 大豆光合特性 由图 6 可知,大豆的 P_n 和 T_r 均在开花结荚期达到峰值,且均随生育期呈先增后减的趋势。不同生育期各处理大豆 P_n 和 T_r 日变化与苹果类似。总体上,在相同的灌溉水平下,不同生育期大豆 P_n 和 T_r 均随施肥量的增加呈先增后减的趋势,分枝至鼓粒期,F2 组的 P_n 和 T_r 较其余施

肥组分别提高 2.2%~6.9%和 4.7%~12.3%。在相同的施肥水平下,全生育期大豆 P_n 和 T_r 不同灌水水平差异显著,分枝至鼓粒期,W3 组的 P_n 和 T_r 较其余灌水组分别提高 2.0%~14.6%和 4.0%~36.1%。其中,全生育期 W3F2 处理的 P_n 和 T_r 较其余处理提高 3.9%~42.6%和 3.6%~69.0%。

方差分析表明,灌水和施肥以及两者交互作用对大豆叶片不同生育期的 P_n 和 T_r 均有极显著影响。

表 3 不同滴灌水肥调控下苹果和大豆叶绿素含量变化动态

处理		苹果 SPAD 值				大豆 SPAD 值			
		花芽分化期	坐果期	果实膨大期	成熟期	出苗期	分枝期	结荚期	鼓粒期
	W1F1	43.18±0.65f	53.06±0.71ef	54.89±0.18d	57.90±0.65d	35.73±0.50bcde	42.53±0.44e	42.68±0.08d	45.37±0.38f
	W1F2	44.77±0.42bcd	53.90±0.92bcd	55.48±1.38bc	58.50±0.78bc	35.73±0.41bcde	42.87±0.10de	42.90±0.26cd	46.82±0.10e
	W1F3	44.52±0.45cde	51.87±0.38fg	54.97±1.01d	58.01±0.89d	36.00±0.32abcd	41.89±1.22e	41.97±0.67d	46.26±0.56e
	W2F1	44.06±0.14de	53.26±1.00ef	55.69±0.43cd	58.98±0.67cd	36.34±0.63abc	43.87±1.54cd	43.03±0.55bcd	47.80±0.54d
	W2F2	45.49±0.39ab	54.06±1.50bc	57.13±0.24ab	59.51±0.33ab	36.08±1.55abcd	44.99±0.75bc	43.34±0.53abcd	48.38±0.35cd
	W2F3	44.79±0.48bcd	53.88±0.92def	56.29±0.33cd	58.86±0.39cd	34.77±0.03de	43.60±0.24bc	42.82±0.41cd	48.18±0.37d
	W3F1	44.44±0.48cde	54.31±1.00cdef	56.84±0.69c	59.68±0.75c	36.67±0.56ab	45.94±0.22ab	43.84±0.24abcd	49.22±0.12b
	W3F2	46.03±0.12a	56.80±0.47a	58.09±0.19a	61.74±0.28a	36.30±0.88abc	46.61±0.26a	45.23±0.26a	50.06±0.18a
	W3F3	44.74±0.62bcd	54.54±0.85cde	57.09±0.64c	60.00±0.34c	36.92±0.75ab	44.16±0.57bc	43.76±0.36abcd	48.98±0.52bc
	W4F1	44.33±0.20cde	53.13±1.07ef	56.43±0.61cd	58.96±0.47cd	35.30±0.76cde	44.86±0.77bc	44.51±0.80abc	49.19±0.53b
	W4F2	44.93±0.43bc	55.13±0.28ab	57.78±0.32a	59.61±0.21a	36.91±0.48ab	44.72±1.24bc	44.94±0.18ab	49.36±0.33b
	W4F3	43.81±0.92ef	54.54±0.31cde	57.27±0.40c	60.11±0.99c	37.23±1.39a	44.60±0.72cd	43.66±0.30abcd	48.98±0.17bc
	CK	40.97±0.76g	50.49±0.28g	52.56±0.51e	54.18±0.60e	34.56±0.67e	41.79±0.89e	41.99±0.59d	44.20±0.62g
显著性 检验 (F 值)	灌水量	5.713 **	11.989 **	23.445 **	22.563 **	—	20.680 **	36.739 **	121.350 **
	施肥量	19.472 **	11.700 **	10.352 **	7.542 **	—	5.579 **	16.392 **	11.263 **
	灌溉×施肥	1.972ns	2.157 ns	0.413 ns	2.259 ns	—	0.807 ns	1.485 ns	2.210 ns

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

2.4 大豆生长指标

由表 4 可知,不同水肥处理下,W3F2 处理在大豆各生育期的生长指标均为最大值,并显著高于其他处理($P<0.05$)。分枝期至结荚期各处理株高、茎粗和叶面积指数增加较快,其中,W4F2 处理增长速度较其他处理增大 5.6%~59.0%。全生育期,在相同的灌溉水平下,大豆株高、茎粗和叶面积指数均随施肥量的增加先升高后降低,F2 组较其余施肥组提高 1.9%~15.0%,2.9%~13.1%,14.4%~41.0%;在相同的施肥水平下,分枝期内大豆叶面积指数随灌水量的增加而升高,其余生育期大豆株高、茎粗和叶面积指数随灌水量的增加先升高后降低,W3 组较其余灌水组增高 3.0%~18.6%,4.0%~19.5%,19.6%~44.7%。

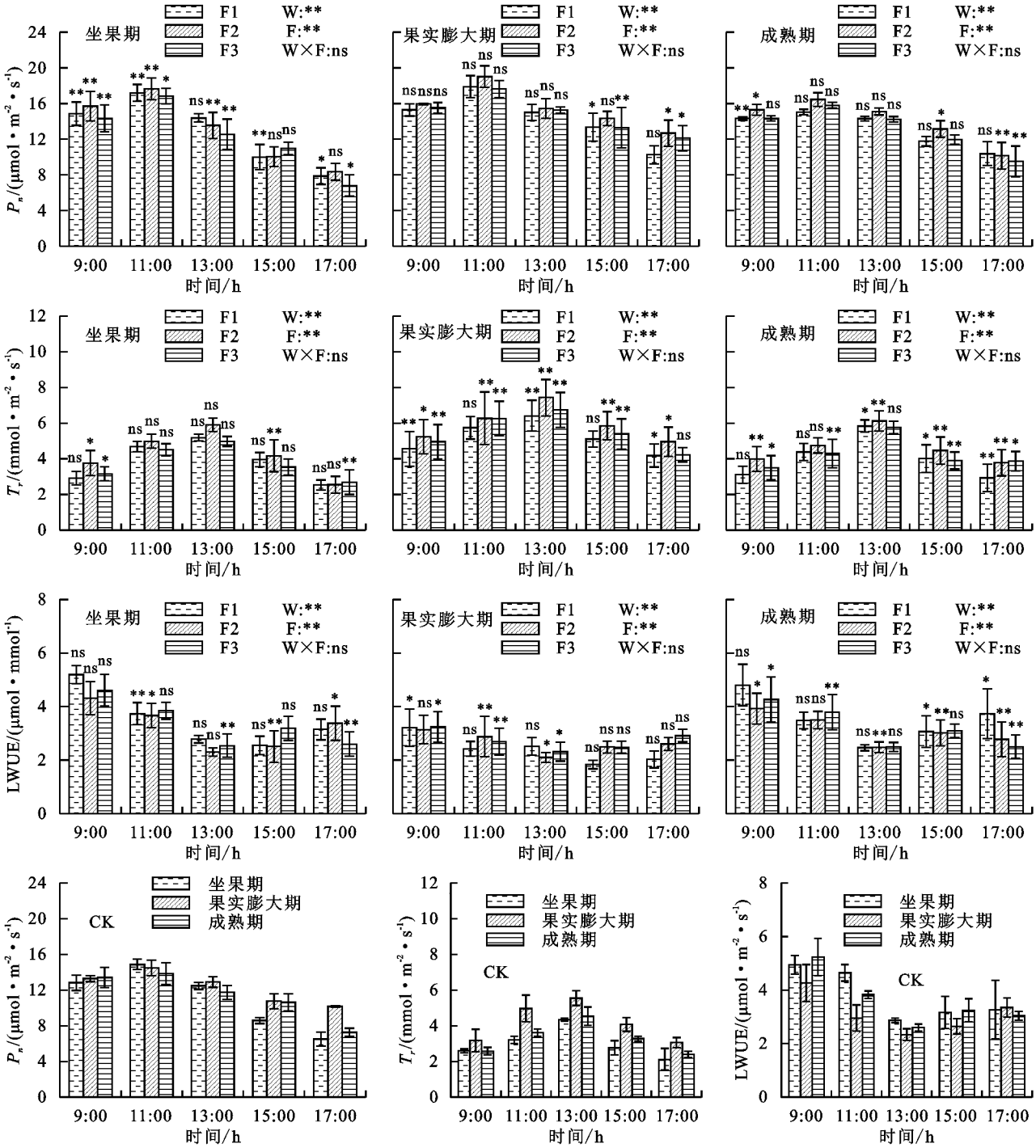
方差分析表明,灌水量和施肥量对大豆分枝期和结荚期各生长指标均有极显著影响,灌水量对大豆鼓粒期各生长指标均有极显著影响,施肥量仅对鼓粒期大豆茎粗影响极显著,全生育期两者交互作用仅对结荚期株高影响显著。

2.5 大豆产量及水分利用效率

由表 5 可知,W3F2 处理下大豆产量达到最大值,较其他处理提高 10.9%~99.3%。在相同的灌溉水平下,产量随施肥量的增加先升高后降低,F2 水平下达到最大值,较 F1 组和 F3 组增大 1.1%~26.3%;在相同的施肥水平下,产量随灌水量的增加先升高后降低,W3 组较其余灌水组提高了 17.7%~79.8%。耗水量总体上随灌水量的增大而增大,除 W1 组外,耗水量随施肥量的增加先增大后减小。WUE 对水肥因素的响应规律与产量相同,即 W3F2 处理下达到最大,较其他处理提高 8.0%~70.0%。在相同的灌溉水平下,F2 组较 F1 组和 F3 组增大 2.3%~29.2%;在相同的施肥水平下,W3 组较其余灌水组增大 9.0%~57.2%。在相同的灌溉水平下,IWUE 除 W3 组外,其余灌水组均随施肥量的增加先增大后减小;在相同的施肥水平下,IWUE 均随灌水量的增大而降低,且 W1 组显著高于其他灌水水平。

根据方差分析表明,灌水量、施肥量及两者交互作用对大豆籽粒产量、耗水量、水分利用效率及灌溉

水利效率均达到极显著影响,且灌水量因素的影响大于施肥量和两者交互作用。



注:同一施肥组同一时间的值为 W1、W2、W3、W4 组的均值,误差棒表示均值的标准差(n=9);CK 处理的误差棒表示均值的标准差(n=3)。下同。

图 5 不同水肥调控对苹果光合作用的影响

3 讨论

3.1 滴灌水肥调控对土壤水分空间分布的影响

本研究发现,在水平方向上,间作系统土壤含水量随着距树行距离的增加先降后升,最小值出现在 1 m 处,而廖文超等^[13]对晋西黄土区核桃与作物的研究中发现,随着距树行距离的增加,土壤含水量呈逐渐增大的趋势,这种差异可能是果树的水力提升作用增加了果树和大豆行间(距树行 0.5 m 处)的土壤水分^[14]。

在竖直方向上,不同生育期间作系统土壤含水量均随土层深度的增加而增加,0—30 cm 土层土壤含水量变化比较剧烈,30—60 cm 逐渐趋于稳定,可能是由于滴灌湿润体主要分布在 0—60 cm 范围内,但仅在 0—30 cm 土层形成湿润饱和区^[15],而苹果细根主要分布在 0—40 cm 土层,大豆细根主要分布在 0—20 cm,土壤水分分布与作物主要根系分布较匹配,提高了水分利用率^[1]。W3F3 和 W4F3 处理

50—60 cm 土壤含水量均大于其他处理,可能是由于间作系统对水分的竞争随着土壤水分亏缺变得越来越强烈,低灌水处理的作物需利用深层次土壤水分以维持自身正常的生长发育^[16]。总体上,滴灌条件下

水平方向上土壤含水量随着距树行距离的增加先降后升,竖直方向上土壤含水量均随土壤深度的增加而增加,灌水后在 0—30 cm 形成湿润饱和区,其中 W3F2 处理更有利于间作植物的水分吸收利用。

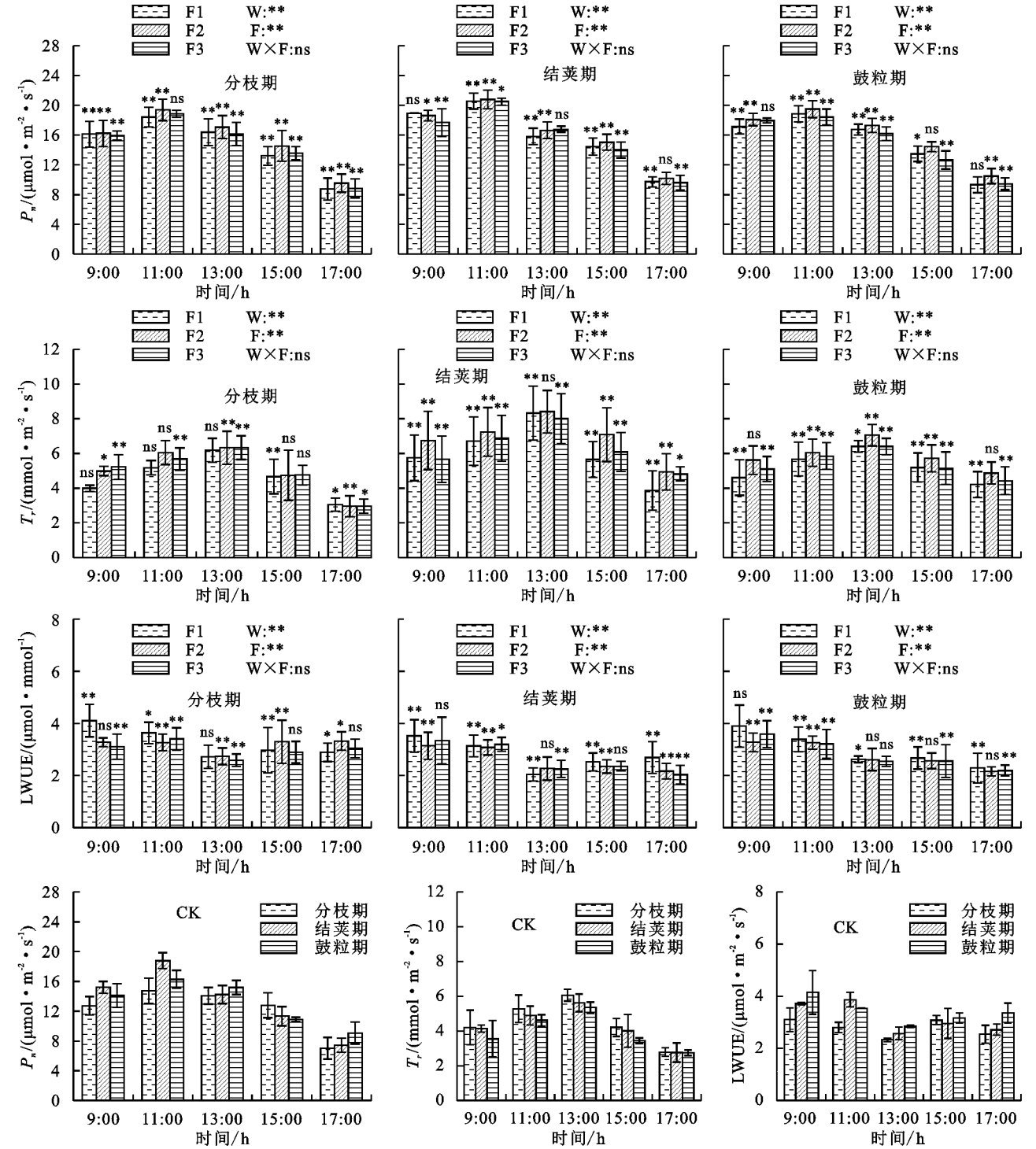


图 6 不同水肥调控对大豆光合作用的影响

3.2 滴灌水肥调控对苹果和大豆光合生理特性的影响
本研究发现,在滴灌施肥处理下,不同生育期苹果和大豆叶绿素均较对照组有不同程度的增加。尤其在生育中后期,W3F2 处理显著大于其余各处理,而齐付国等^[17]对膜下棉瓜套作研究发现,低灌水处理较高灌水处理的叶绿素含量高,差异可能是由于本

研究中滴灌采用随水施肥措施,更有利于根系对肥料的吸收利用,提高了叶片叶绿素含量^[18]。苹果和大豆的净光合速率和蒸腾速率日变化均呈单峰型曲线,峰值分别出现在 11:00 和 13:00,无光合“午休”现象,而一些学者^[19]对单作系统的光合特性研究发现,叶片净光合速率和气孔导度日变化呈双峰型曲线,差

异一方面可能是由于果农间作系统能明显改善农田小气候,降低系统内的大气湿度并提高地面温度^[20],从而降低了间作系统的光合有效辐射,而高光强是多种植物光合“午休”现象出现的最重要的生态因子;另一方面可能是由于滴灌后湿润饱和区主要集中在表层土壤,是作物细根的主要分布区域,水分利用效率提高,导致气孔导度增大。此外,本研究中 F2 组净光合速率和蒸腾速率较其他水平的施肥处理均有不同程度的增大,可能是氮肥的适量施加缓解了间作系统因种间竞争造成的氮比例失调^[21],有效降低了氮

缺失对叶片光合作用的抑制程度。且本研究中 W3 组净光合速率和蒸腾速率较其他水平的灌水均有不同程度的增大,这与李发永等^[8]对南疆沙漠绿洲区不同种植和滴灌模式下枣棉间作系统的研究结果类似,说明适宜的水肥用量也会提高晋西黄土区果农间作系统叶片净光合速率和蒸腾速率。总体上,灌水施肥增大了果农间作系统叶片的叶绿素、净光合效率和蒸腾速率,且净光合速率和蒸腾速率均呈单峰型曲线,其中 W3F2 处理显著提高了苹果和大豆的叶绿素含量,提高了光合效率。

表 4 不同水肥调控对大豆生长指标的影响

试验处理		分枝期			结荚期			鼓粒期		
		株高/cm	茎粗/mm	叶面积指数	株高/cm	茎粗/mm	叶面积指数	株高/cm	茎粗/mm	叶面积指数
	W1F1	28.76±2.20b	6.49±0.51b	1.36±0.24b	56.22±2.40c	13.21±0.86b	4.16±0.39b	63.90±2.54c	14.37±0.22c	5.11±0.42c
	W1F2	29.64±1.02b	7.30±0.96b	1.40±0.71b	65.56±3.17b	14.36±0.76ab	4.92±0.70b	67.50±1.61bc	14.71±0.25c	5.56±0.72c
	W1F3	27.58±1.44b	6.65±0.30b	1.07±0.13b	53.96±2.72c	12.61±0.35b	4.46±0.73b	62.73±1.10c	14.60±0.12c	5.50±0.69c
	W2F1	29.19±1.47b	7.40±0.52b	1.38±0.13b	64.24±1.84b	14.07±1.53b	4.78±0.46b	65.62±2.61bc	14.58±0.72c	5.71±0.16bc
	W2F2	30.67±1.72b	7.44±0.97b	1.79±0.31ab	67.61±1.48ab	14.52±0.32ab	5.06±0.24b	71.62±1.71ab	16.89±1.02ab	6.69±0.70b
	W2F3	29.83±1.26b	6.49±0.51b	1.29±0.40b	65.53±2.96b	12.56±0.42b	4.67±0.74b	72.70±4.72ab	15.58±0.75bc	6.38±0.21bc
	W3F1	32.22±1.62ab	7.73±0.73ab	1.79±0.31ab	66.31±2.71b	15.84±0.33a	5.80±0.23ab	76.43±2.60a	17.62±0.19ab	7.47±0.22ab
	W3F2	35.57±1.90a	8.45±0.15a	2.35±0.26a	71.62±2.99a	15.86±0.44a	6.99±0.89a	76.62±1.60a	18.34±0.08a	8.18±0.59a
	W3F3	31.67±1.08ab	7.59±0.89b	1.50±0.09b	70.50±1.11ab	14.16±0.61b	5.25±0.53ab	74.05±2.26ab	16.23±1.28bc	8.06±0.56ab
	W4F1	29.31±2.01b	7.35±0.23b	1.87±0.20ab	65.83±1.00b	14.67±0.86ab	5.21±0.44b	72.95±2.15ab	15.48±1.01bc	6.53±0.39bc
	W4F2	30.32±0.98b	7.82±0.54ab	2.31±0.13a	70.50±1.11ab	14.75±0.87ab	5.46±0.76ab	72.83±1.34ab	16.42±0.97b	6.67±0.67b
	W4F3	27.90±1.74b	6.70±0.71b	1.66±0.18ab	53.96±2.72cd	14.65±0.44ab	4.41±0.71b	70.30±1.88bc	15.59±0.59bc	5.62±0.64c
	CK	27.20±1.10b	6.31±0.74b	1.04±0.06b	49.69±0.76d	13.35±1.10b	4.02±0.33b	53.95±1.36d	13.77±0.62c	5.06±0.14c
显著性检验 (F 值)	灌水量	10.124 **	3.104 **	12.120 **	23.984 **	7.771 **	7.198 **	37.089 **	16.076 **	24.844 **
	施肥量	4.712 *	3.865 **	15.235 **	31.396 **	6.789 **	5.006 *	1.373 ns	6.137 **	2.535 ns
	灌水×施肥	0.516 ns	0.312 ns	0.612 ns	5.534 **	0.923 ns	0.797 ns	3.196 ns	1.589ns	1.115ns

表 5 不同水肥调控对间作系统产量和水分利用的影响

处理		大豆籽粒产量/ (kg·hm ⁻²)	耗水量/ mm	水分利用效率/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	灌溉水利用效率/ (kg·m ⁻³)
	W1F1	1050.08±21.67j	397.74±3.60hi	2.64±0.06h	21.00±0.43c
	W1F2	1305.05±48.71g	405.56±3.49g	3.22±0.14f	26.10±0.97a
	W1F3	1224.53±5.73h	396.40±3.85hi	3.09±0.04fg	24.49±0.11b
	W2F1	1247.81±34.06h	435.44±2.91c	2.87±0.07g	4.30±0.12e
	W2F2	1576.87±37.57d	426.04±3.70f	3.70±0.08d	9.28±0.22d
	W2F3	1507.64±15.42ef	421.99±4.59f	3.57±0.03e	8.87±0.09d
	W3F1	1888.15±35.72b	455.00±3.39d	4.15±0.10b	4.02±0.08e
	W3F2	2093.53±44.95a	466.90±5.05c	4.48±0.10a	3.95±0.08e
	W3F3	1774.37±32.01c	455.64±5.74d	3.89±0.08c	4.22±0.08e
	W4F1	1500.07±28.94ef	501.45±2.81b	2.99±0.07g	1.69±0.03f
	W4F2	1523.09±31.10e	510.45±4.37a	2.98±0.09g	1.71±0.03f
	W4F3	1464.63±25.19f	501.97±5.75b	2.92±0.02fg	1.65±0.03f
	CK	1149.00±9.40i	392.34±3.30i	2.93±0.02g	—
显著性检验 (F 值)	灌水量	845.951 **	1015.720 **	500.848 **	8703.375 **
	施肥量	132.168 **	7.583 **	95.866 **	206.970 **
	灌水×施肥	32.817 **	4.028 **	30.983 **	70.404 **

3.3 滴灌水肥调控对间作大豆生长、产量及水分利用的影响

植物光合作用的强弱受多种因素的影响,如叶绿素、胞间二氧化碳浓度、酶活性等,而这些因素又与水分、养分等环境条件密切相关。水分胁迫下可通过气孔和非气孔因素影响光合作用,养分可通过调节类囊体蛋白和叶片叶绿素含量而直接影响叶片的光合能力^[22]。通过相关分析(表 6)表明,发现不同生育期总体上水肥及两者交互作用对叶片光合作用均达到极显著影响。且叶片光合速率的大小是衡量植物吸收光能转化为体内同化物质强弱的标准^[23],因此苹果和大豆叶片 P_n 、 T_r 和 SPAD 值与籽粒产量和水分利用效率呈显著

正相关,说明间作系统光合生理特性的提高有利于产量的增加,进而促进水分利用效率的提高。

本研究表明,间作大豆产量和 WUE 随灌水量和施肥量的增加呈先增后减的趋势,且灌水因素对产量的影响高于施肥,可能是由于随着灌水定额的减小,滴灌湿润饱和区面积减小,间作系统种间竞争更为激烈,大豆产量急剧降低,而过量灌水致使养分向深层淋溶,导致养分利用率降低^[24];施用氮肥会增加作物根系生长,而过量施氮会降低根系活力、渗透物质含量与相关酶活性,从而加速植株衰老,以致高肥处理下产量降低^[25]。综上,本研究中 W3F2 处理产量和水分利用效率较其他处理高。

表 6 不同水肥调控下苹果大豆叶片光合生理指标与产量及耗水指标的相关性

生育期	光合生理指标	大豆籽粒产量	耗水量	水分利用效率	灌溉水利用效率
大豆分枝期	P_n	0.768**	0.333ns	0.725**	-0.108ns
	T_r	0.742**	0.595**	0.572**	-0.402ns
	SPAD	0.901**	0.684**	0.730**	-0.558**
大豆结荚期	P_n	0.677**	0.337ns	0.627**	-0.078ns
	T_r	0.849**	0.818**	0.612**	-0.476ns
	SPAD	0.751**	0.878**	0.465ns	-0.559**
大豆鼓粒期	P_n	0.734**	0.468ns	0.644**	-0.172ns
	T_r	0.894**	0.697**	0.717**	-0.456ns
	SPAD	0.817**	0.819**	0.572**	-0.471ns
苹果坐果期	P_n	0.662**	0.176ns	0.677**	0.104ns
	T_r	0.619**	0.348ns	0.554**	0.120ns
	SPAD	0.658**	0.458ns	0.566**	-0.055ns
苹果果实膨大期	P_n	0.803**	0.413ns	0.748**	-0.118ns
	T_r	0.891**	0.610**	0.755**	-0.445ns
	SPAD	0.665**	0.597**	0.516ns	-0.164ns
苹果成熟期	P_n	0.706**	0.194ns	0.736**	0.044ns
	T_r	0.836**	0.563**	0.723**	-0.438ns
	SPAD	0.651**	0.552**	0.515ns	-0.039ns

4 结论

不同滴灌水肥处理下,土壤含水量具有明显的空间分布特征,水平方向均为随距树行距离的增加先减后增,最小值出现在 1.0 m 处,垂直方向上为随土层深度的增加而增加。灌水、施肥和交互作用对土壤含水量的影响均为极显著水平,灌水量对土壤含水量的影响程度最高,且 W3F2 处理能维持较好的土壤水分水平。滴灌水肥调控措施有效提高了苹果和大豆的 SPAD 值,分别较 CK 处理提高 5.4%~14.7%和 1.7%~9.2%,最大均为 W3F2 处理。苹果和大豆的 P_n 和 T_r 日变化动态呈单峰曲线,峰值分别出现在 11:00 和 13:00,不同生育期内苹果和大豆的 P_n 和 T_r 随灌水量和施肥量的增加先增后降,W3F2 处理光合效率最高。

灌水量和施肥量对大豆株高、茎粗和叶面积指数具有极显著影响,水肥调控处理显著提高了大豆生长指标,各指标最大值均为 W3F2 处理。大豆产量和 WUE 随灌水量和施肥量的增加均表现为先增后降,W3F2 处理的产量和 WUE 分别较其余处理提高 10.9%~99.3%,8.0%~70.0%。综上,在保证大豆高产和水分利用效率最优的条件下,建议采用田间持水量的 80%为灌水上限的灌溉制度,同时在大豆幼苗至分枝期、结荚期和鼓粒期共施加 92.00 kg/hm² 的氮肥。

参考文献:

[1] 周宣,王若水,李超楠,等.不同水分调控对晋西黄土区苹果×大豆间作系统细根分布与耗水特性的影响[J].水土保持学报,2019,33(1):118-128.

[2] Gao X D, Zhao X M, Wu P T, et al. Effects of large

- gullies on catchment-scale soil moisture spatial behaviors: A case study on the Loess Plateau of China[J]. *Geoderma*, 2016, 261: 1-10.
- [3] Kiani M, Gheysari M, Mostafazadeh-Fard B, et al. Effect of the interaction of water and nitrogen on sunflower under drip irrigation in an arid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 171: 162-172.
- [4] Fandika I R, Kadyampakeni D, Zingore S. Performance of bucket drip irrigation powered by treadle pump on tomato and maize/bean production in Malawi[J]. *Irrigation Science*, 2012, 30(1): 57-68.
- [5] 焦念元, 宁堂原, 杨萌珂, 等. 玉米花生间作对玉米光合特性及产量形成的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(14): 4324-4330.
- [6] Wanvestraut R H, Jose S, Nair P K R, et al. Competition for water in a pecan (*Caryaillinoensis* K. Koch)-cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the southern United States[J]. *Agroforestry Systems*, 2004, 60: 167-179.
- [7] 褚军, 薛建辉, 金梅娟, 等. 杨麦间作系统对太湖流域土壤氮流失的削减效应[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(16): 167-177.
- [8] 李发永, 劳东青, 孙三民, 等. 滴灌对间作枣棉光合特性与水分利用的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(12): 119-129.
- [9] 周罕觅, 张富仓. 苹果幼树生理特性和水分生产率对水肥的响应研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(4): 77-87.
- [10] 乔英, 孙建, 孙三民, 等. 滴灌对塔里木灌区骏枣根系分布的影响研究[J]. *节水灌溉*, 2012(3): 21-24.
- [11] 汪明华, 李佳佳, 陆少奇, 等. 大豆品种耐高温特性的评价方法及耐高温种质筛选与鉴定[J]. *植物遗传资源学报*, 2019, 20(4): 891-902.
- [12] 王志梁, 任媛媛, 张岁岐. 黄土高原不同玉米-大豆间作模式对玉米生长发育的影响[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(6): 321-326.
- [13] 廖文超, 毕华兴, 赵云杰, 等. 晋西苹果+大豆间作土壤水分分布及其对大豆生长的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2014, 12(1): 24-28.
- [14] Debruyne S A, Feldhake C M, Burger J A. Tree effects on forage growth and soil water in an Appalachian silvopasture[J]. *Agroforestry Systems*, 2011, 83(2): 189-200.
- [15] 李仙岳, 史海滨, 龚雪文, 等. 立体种植农田不同生育期及土壤水分的根系分布特征[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(3): 140-146.
- [16] Gao Y, Duan A, Qiu X, et al. Distribution of roots and root length density in a maize/soybean strip intercropping system [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 98(1): 199-212.
- [17] 齐付国, 刘小飞, 孙景生, 等. 膜下灌水量对棉瓜套作模式下棉花叶片光合特性和产量的影响[J]. *西北农业学报*, 2015, 24(9): 78-83.
- [18] 任玉忠, 王水献, 谢蕾, 等. 干旱区不同灌溉方式对枣树水分利用效率和果实品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(22): 95-102.
- [19] 侯裕生, 王振华, 李文昊, 等. 水肥耦合对南疆沙区滴灌红枣光合特性及叶绿素相对含量的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2018, 36(9): 914-924.
- [20] 许华森, 毕华兴, 高路博, 等. 晋西黄土区苹果+大豆间作系统小气候及其对作物生产力的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2014, 12(2): 9-15.
- [21] 陈翠莲, 张继强, 赵通, 等. 追施氮肥对‘李广杏’树体营养及光合特性的影响[J]. *经济林研究*, 2019, 37(2): 13-22.
- [22] 李林锋. 氮磷钾配方施肥对鸦胆子幼苗光合特性的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2010, 32(6): 1136-1141.
- [23] 杨小龙, 须晖, 李天来, 等. 外源褪黑素对干旱胁迫下番茄叶片光合作用的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(16): 3186-3195.
- [24] 杨蕊菊, 马忠明. 水肥耦合对小麦/玉米带田产量及构成因素的影响[J]. *西北农业学报*, 2015, 24(1): 54-59.
- [25] 阿丽艳·肉孜, 张巨松, 郭仁松, 等. 不同施氮量对枣棉间作棉花根系形态与生理特性的影响[J]. *西北农业学报*, 2013, 22(10): 96-102.