

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

周宣¹, 王若水^{1,2}, 李超楠¹, 刘韵¹, 毕华兴^{1,2,3,4,5,6}, 杨宗儒⁷

(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, 北京 100083; 3. 水土保持国家林业局重点实验室(北京林业大学), 北京 100083; 4. 北京市水土保持工程技术研究中心(北京林业大学), 北京 100083; 5. 林业生态工程教育部工程研究中心(北京林业大学), 北京 100083; 6. 北京林果业生态环境功能提升协同创新中心, 北京 102206; 7. 山西吉县林业服务中心, 山西 临汾 042200)

摘要: 为探求适于晋西黄土区果农间作系统的水分调控措施, 选取该地区典型的苹果×大豆间作系统为研究对象, 结合覆盖与调亏灌溉 2 种节水措施, 分析了不同水分调控措施对苹果和大豆根系空间分布、耗水量与水分利用等指标的影响。试验设置灌溉上限 3 个水平: 田间持水量的 55% (W1, 低水), 70% (W2, 中水) 和 85% (W3, 高水), 2 种覆盖材料: 秸秆覆盖 (M1) 和地膜覆盖 (M2)。结果表明: 水分调控措施增加了苹果和大豆总根长密度, 且扩大了苹果在水平和垂直方向上的根长分布。苹果根长密度与距树行距离呈负相关, 而大豆则呈正相关, 且均与垂直深度存在负相关关系。大豆鼓粒期土壤水分随距树行距离的增加先减后增, 最小值为距树行 1.5~2.0 m, 与清耕 (CK0) 和单一覆盖 (CK1 和 CK2) 相比, 水分调控措施能显著提高 0—60 cm 土层内的土壤水分。聚类分析表明水分调控下苹果和大豆主要水分竞争区域为距树行 0.5~1.5 m、垂直方向 0—40 cm 土层范围内。M2W2 处理苹果细根集中分布在 20—40 cm 土层, 大豆细根主要在 0—20 cm 土层, 根系错位分布缓解了种间水分竞争, 其耗水量可较 W3 组减少 40~50 mm, 且其产量和水分利用可分别较其他水分调控措施提高 29.37%~41.92%, 12.29%~53.35%, 同时可使间作系统净收益最大, 可达 2 976.5 元/hm²。由此建议在未坐果的幼龄苹果树行间间作大豆时采用地膜覆盖措施, 同时在分枝期灌水 150 m³/hm², 结荚期灌水 400 m³/hm², 鼓粒期灌水 300 m³/hm², 可显著提高间作系统水分利用水平和经济效益。

关键词: 覆盖和灌溉; 果农间作; 根长密度; 耗水量

中图分类号: S274.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)01-0118-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.01.020

Effects of Different Water Regulation on the Fine Root Distribution and Water Consumption Characteristics of Apple-Soybean Alley Cropping System in Losses Plateau of West Shanxi Province, China

ZHOU Xuan¹, WANG Ruoshui^{1,2}, LI Chaonan¹, LIU Yun¹, BI Huaxing^{1,2,3,4,5,6}, YANG Zongru⁷

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2. Jixian Forest Ecosystem State Field Science Observatory, Beijing 100083; 3. Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation (Beijing Forestry University), Beijing 100083; 4. Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation (Beijing Forestry University), Beijing 100083; 5. Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering Ministry of Education (Beijing Forestry University), Beijing 100083; 6. Beijing Collaborative Innovation Center for Eco-environmental Improvement with Forestry and Fruit Trees, Beijing 102206; 7. Jixian Forestry Service Center, Linfen, Shanxi 042200)

Abstract: In order to investigate the effects of different water regulations on the root spatial distribution, water consumption, water use and other indexes in a typical alley cropping system comprising apple (*Malus pumila*)-soybean (*Glycine max*), an experiment of mulching and irrigation coupling was carried out in the Loess Plateau of Shanxi Province. Three levels of irrigation thresholds were set: 55% (low, W1), 70%

收稿日期: 2018-08-18

资助项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD07B0502); 中央高校基本科研业务费专项(2017PT12); 国家重点研发计划项目(2016YFC0501704); 国家自然科学基金项目(31470638); 科技创新服务能力建设—科研基地建设—林果业生态环境功能提升协同创新中心(PXM2018_014207_000024)

第一作者: 周宣(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事复合农林方面研究。E-mail: zhouxuan_sw@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

(medium, W2), and 85% (high, W3) of field capacity. Meanwhile, two mulching materials including straw (M1) and plastic film (M2) were also set. The results indicated that the water regulation increased the total root length density of apple and soybean, and also expanded the root length distribution of apple in horizontal and vertical directions. The apple root length density was negatively correlated with the distance from the tree row while the soybeans had positive correlation, and both the crops had negative correlations with the vertical depth. The distribution of soil moisture increased first with the distance from trees to the crops then decreased at grain filling stage, and the minimum values occurred in the distance of 1.5 ~ 2.0 m away from the tree line. Compared with clean tillage treatment (CK0) and single mulching treatment (CK1 and CK2), the water regulation treatments increased the soil moisture in 0—60 cm depth significantly. The cluster analysis showed that the main competition area in soil moisture for the two plants was in the distance 0.5 ~ 1.5 m away from the tree row with soil depth of 0—40 cm. The apple fine roots in the M2W2 treatment were concentrated in 20—40 cm soil layer while the soybeans' in 0—20 cm soil layer, which alleviated water competition between the two species. Additionally, the water consumption in M2W2 could be reduced by 40~50 mm compared with W3 and the yield and water use efficiency could be increased by 29.37% ~ 41.92% and 12.29% ~ 53.35%, respectively, compared to other water regulation treatments. The net income could be 2 976.5 yuan/hm². Above all, covering plastic film in young apple-soybean intercropping system, combined with irrigation amount of 150 m³/hm² at branching stage, 400 m³/hm² at podding stage and 300 m³/hm² at grain filling stage could significantly increase the water use level and economic benefits in the intercropping system.

Keywords: mulching and irrigation; fruit-crop intercropping; root length density; water consumption

农林复合经营模式对控制水土流失、恢复生态平衡和缓解农林争地矛盾有重要作用,近 10 年来在晋西黄土区得到应用广泛^[1]。苹果 (*Malus pumila*) 和大豆 (*Glycine max*) 是该地区主要的经济树种和粮食作物,但果树生长周期长、效益滞后,为充分利用现有土地资源,增加经济收入,在未坐果的幼龄果树行间间作大豆成为该地区广泛实行的农林复合经营模式之一。但该区降水稀少且时空分布不均,与当地作物生长期需水存在时序错位,严重制约了该地区的果农间作经营^[2]。且当地果农经营时多采用清耕制管理,蓄水保墒效果较差,更加剧了果树和间作作物对水分的竞争,致使整个系统生产力下降。目前间作高产栽培多以过量灌溉为基础,难以作为供水有限区水分高效管理的技术依据,此外,间作系统水分供需的巨大差额使得单一的保水措施不够高效^[3]。针对上述问题,本研究将地面覆盖和调亏灌溉相结合的模式引入间作系统。

目前,大量对覆盖和灌溉模式相耦合的研究主要集中在单作系统^[4]。有学者^[5]对覆盖或灌溉在间作系统中的应用进行了研究,认为水分是影响干旱、半干旱农业生产的主要因素。林木与作物间作可以有效提高土壤含水量,改善土壤水分环境,但地上遮光和地下竞争会导致作物减产^[6],而对水肥调控、交替灌溉、覆盖保墒等措施下间作生产研究^[7-8]发现,合适的农艺措施能达到增产增效的作用。在干旱或无灌溉条件下,种间互作和水分竞争问题尤为严重。细根 ($d < 2$ mm) 作为植物体吸收水分和养分的主要器官,

其空间分布可以反映间作系统各组分之间的竞争关系,也是制约系统生产力的重要因素,研究根系分布特征对深入分析间作系统耗水特性、缓解种间竞争和发展节水农业具有重要意义^[9],虽然对林木与间作作物的根系空间分布特征已有研究^[10]报道,但基于水分调控下林木和作物细根分布的定量研究并不多见。因此,如何采取有效的水分调控措施来提高间作系统对农业用水的高效利用,实现节水增收仍是目前亟需解决的关键问题,但种间互作和水分调控对间作系统细根分布和耗水特性方面的研究尚待深入,基于两因素相耦合的关键技术参数缺乏。

本文以晋西黄土区典型的幼龄苹果×大豆间作系统为研究对象,将地膜、秸秆覆盖的栽种模式与调亏灌溉的节水模式相结合,定量分析了不同调控措施下苹果和大豆细根的空间分布及耗水特征,以为该地区苹果×大豆间作系统节水高效模式提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省吉县 (36°53'10"—36°21'02" N, 110°27'30"—111°07'20" E), 该地属于黄土残垣沟壑区,表层为第四纪风积黄土,呈微碱性 (pH=7.9), 土壤贫瘠,有机质含量在 1% 以下。气候属温带大陆性气候,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 d 左右，平均气温 10 ℃，平均积温 3 357.9 ℃。

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×大豆间作模式为研究对象，果树栽植于 2013 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 3.9 m，平均胸径 7 cm，南北冠幅 3.2 m，东西冠幅 3.6 m，冠高 3.2 m。大豆品种为晋豆 35 号，株行距为 0.3 m×0.4 m，种植行距离果树 0.9 m，播种时间为 2017 年 4 月 12 日。每个试验小区共 2 棵果树，小区边缘距离树 1 m，小区面积 14 m² (图 1)。

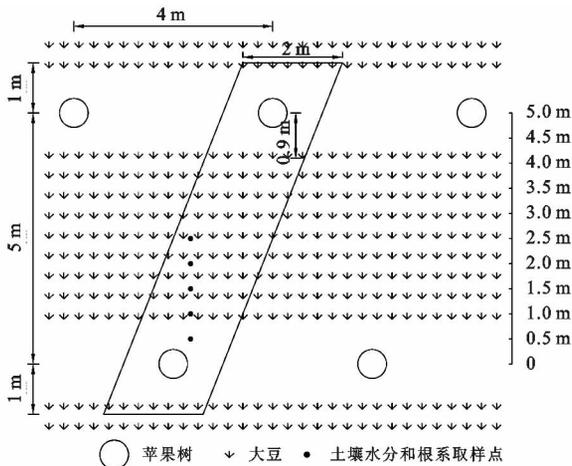


图 1 试验小区和监测点布设示意

1.3 试验设计

试验于 2017 年 4—10 月进行，设置两因素即灌水量和覆盖保墒。根据苹果和大豆适宜的土壤水分范围，设定灌溉上限 3 个水平：0—60 cm 土层平均质量含水量占田间持水量 (F_c) 的 55% (W1, 低水)，70% (W2, 中水) 和 85% (W3, 高水)，其中 F_c 为 22.14% (kg/kg)。地面覆盖包括秸秆覆盖 (M1) 和地膜覆盖 (M2)，秸秆覆盖材料为附近农地刈割后收集而来的玉米秸秆，截

成长度为 5—10 cm 的碎段，大豆出苗后覆于整个行间和树盘下，覆盖厚度为 5 cm，自然塌陷后厚度 3 cm；覆盖地膜为厚度 0.005 mm 的聚乙烯塑料白膜，大豆播种前覆于作物种植行间。

试验共设 6 个处理，另设 3 个对照：CK0 (清耕，不灌水不覆盖)、CK1 (秸秆覆盖不灌水) 和 CK2 (地膜覆盖不灌水)，每个处理重复 3 次，共计 27 个小区，采用随机区组设计。在大豆需水的关键时期 (分枝期、结荚期和鼓粒期) 分别灌水 1 次，灌溉前每个处理测定土壤含水量，并根据所测含水量与目标含水量的差值来制定灌水定额，灌水方式为畦灌，灌水量用水表进行控制，小区间设 2 m 宽隔离带以防止小区间水分互渗。试验设计见表 1。

表 1 试验设计

处理	灌水量/(m ³ ·hm ⁻²)			合计
	分枝期	结荚期	鼓粒期	
M1W1	50	100	50	200
M1W2	100	300	250	650
M1W3	300	400	600	1300
CK1	0	0	0	0
M2W1	50	100	500	200
M2W2	150	400	300	850
M2W3	350	500	500	1350
CK2	0	0	0	0
CK0	0	0	0	0

灌水量采用旱作作物灌水定额，计算公式为：

$$M = 10\gamma H(\theta_w - \theta_0) \quad (1)$$

式中： M 为灌水量 (m³/hm²)； 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 (0.6 m)； 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 (%)。

试验期间降水量及灌溉时间分布见图 2。2017 年大豆生育期内累计降水量为 427.6 mm，参照山西省气象科学研究所拟定的标准可划分为丰水年^[11]。

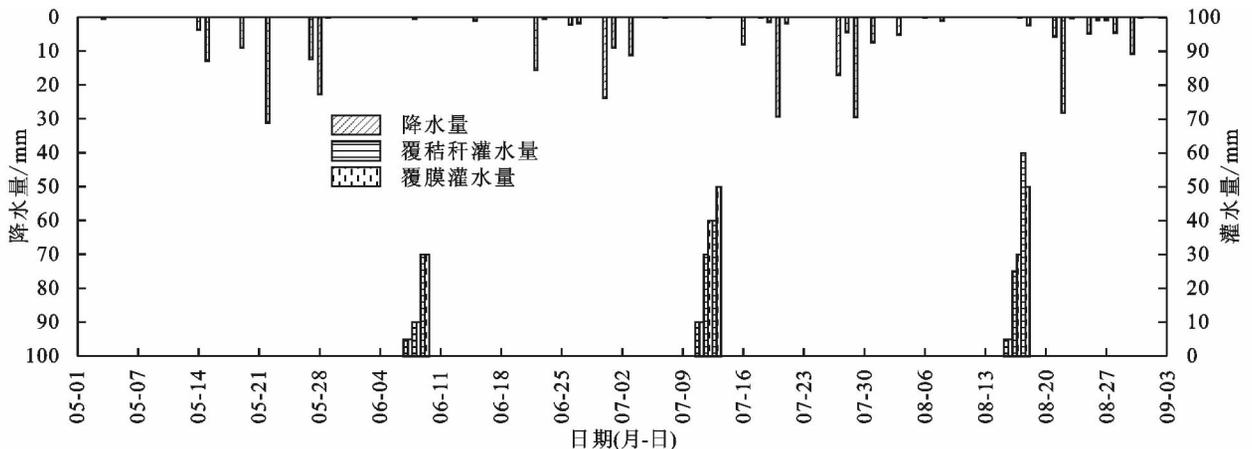


图 2 2017 年 5—9 月降水量及灌水量

1.4 测定项目和方法

1.4.1 土壤含水量 采用烘干法测定土壤含水量，

在距离树行 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 m 处布设取样点 (图 1)，取样深度为 0—60 cm，每层 10 cm。分别在

播种前、大豆分枝期、结荚期、鼓粒期和成熟期各进行 1 次土壤水分监测。

1.4.2 苹果和大豆根长密度 在大豆鼓粒期用直径为 10 cm 的根钻进行根系取样,取样点与土壤水分取样点一致,取样深度为 0—60 cm,每层 20 cm。仔细挑选活根,清洗干净后得到苹果和大豆根系样品,用游标卡尺测量分选出直径小于 2 mm 的细根。用 WinRHIZO 根系扫描系统分析根系根长,根长密度计算公式为:

$$\rho_L = L/V \quad (2)$$

式中: ρ_L 为根长密度 (m/m^3); L 为土体中总根长 (m); V 为土壤体积 (m^3)。

1.4.3 耗水量计算 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,其计算式为:

$$ET = I + P + U - R - F \pm \Delta W \quad (3)$$

式中: ET 为大豆生育期内的耗水量 (mm); I 为生育期内的灌水量 (mm); P 为生育期内有效降水量 (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 为播种和收获时 0—60 cm 土壤贮水消耗量的差值。试验区地势平坦,可视地表径流量为 0;地下水埋深在 30 m 以下,地下水补给水量为 0;40—60 cm 深处监测的土壤水分从未达到过田间持水量水平,深层渗漏量为 0, R 、 U 、 F 值均忽略不计。

1.4.4 产量和水分利用 在大豆成熟期分小区测量大豆籽粒产量。间作系统中水分利用效率为大豆种植面积内的产量与种植面积内耗水量的比值,计算式为:

$$WUE = GY/ET \quad (4)$$

式中: WUE 为水分利用效率 ($\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$); GY 为大豆经济产量 (kg/hm^2); ET 为间作系统耗水量 (mm)。

1.5 生产成本与经济收入计算方法

间作系统农业生产过程的成本包括资金投入和劳动力 2 部分。资金投入项目包括大豆种子、化肥、农药、地膜、灌溉水,这些材料的价格均依照当地的农业生产水平执行。劳动力投入主要包括土地翻耕、锄草、灌水等项目产生的雇佣劳动力的投入。其中,雇工成本按照 2017 年当地平均雇工工资计算,人工 130 元/(人·d)和农用机械 600 元/ hm^2 。由于本试验选取的幼龄果树尚未坐果,所以间作系统的经济收入均来自大豆产量,经济收入根据作物产量和 2016 年当地的收购价格计算(3.0 元/kg)。

1.6 数据处理与分析

采用 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,Duncan 法进行差异显著性检验($P=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 水分调控对苹果细根分布的影响

从苹果根长密度空间分布特征(图 3)中看出,苹果总根长密度最大和最小处理分别为 M2W3、M1W1,相同覆盖条件下,苹果根长密度随灌水量的增加呈递增趋势;相同灌水条件下,地膜覆盖的根长密度较秸秆覆盖增加 58.39%~59.11%。垂直方向上,灌水处理的细根最大深度由不灌水处理的 40 cm 扩展至 60 cm。苹果细根主要分布在 0—40 cm 土层,其中 M1W3、M2W1、M2W2 处理根系密集分布于 20—40 cm 土层,分别占 0—60 cm 土层总根长密度的 58.73%、66.67%、64.69%。在 40—60 cm 土层,M2W2 根系分布最广,根长密度可较 M2W3 提高 304.93%。水平方向上,苹果根长密度随距树行距离的增加而降低,集中分布在距树行 0.5~1.5 m 区域,与 CK0 相比各试验组均不同程度扩大了根系的水平分布范围,其中地膜覆盖效果更为明显。

2.2 水分调控对大豆细根分布的影响

大豆根长密度空间分布特征(图 4)表明,各试验组总根长密度较 CK0 提高了 1.93%~38.44%,根长密度最大为 M2W3。尽管 CK0 根系下扎较深,但由于水分条件差使得总根长密度最小。相同覆盖条件下,大豆根长密度随灌水量的增加呈递增趋势。相同灌水条件下,地膜覆盖的根长密度均高于秸秆覆盖但差异不明显。垂直方向上,各试验组的根长密度均随土层深度的增加而降低,大豆细根主要分布在 0—20 cm 土层,可占 0—60 cm 土层总根长密度的 56.26%~68.55%。水平方向上,距树行 0.5~1.0 m 为大豆根系稀疏区,其中以 CK0 最为明显,该区域内的根长密度仅占总根长密度的 10.31%。1.5~2.5 m 为根系密集区,各处理该区域内的根长密度所占比例为 67.03%~89.69%,且相同覆盖条件下,根系密集区内灌溉处理的根长密度均高于不灌溉处理。

2.3 根长密度与水平和垂直方向的相关性

对苹果和大豆各处理距树行 0.5~2.5 m、土层深度 0—60 cm 的根长密度与水平和垂直距离进行相关分析(表 2)。水平方向上,除 M2W2 外,其余处理苹果根长密度与距树行距离均为极显著负相关,各覆盖处理的相关系数均低于 CK0。秸秆覆盖下灌水处理的相关系数高于不灌水处理,而地膜覆盖则相反;大豆根长密度除 M1W2 和 CK2 外,其余处理均呈极显著正相关,相关系数最高为 CK0。垂直方向上,除 M2W1 和 M2W2 外,其余处理苹果根系与土层深度均呈极显著负相关,其中秸秆覆盖下为灌水量越大相关性越强;大豆除 CK0 外,其余处理根长密度与土层深度均呈极显著负相关。

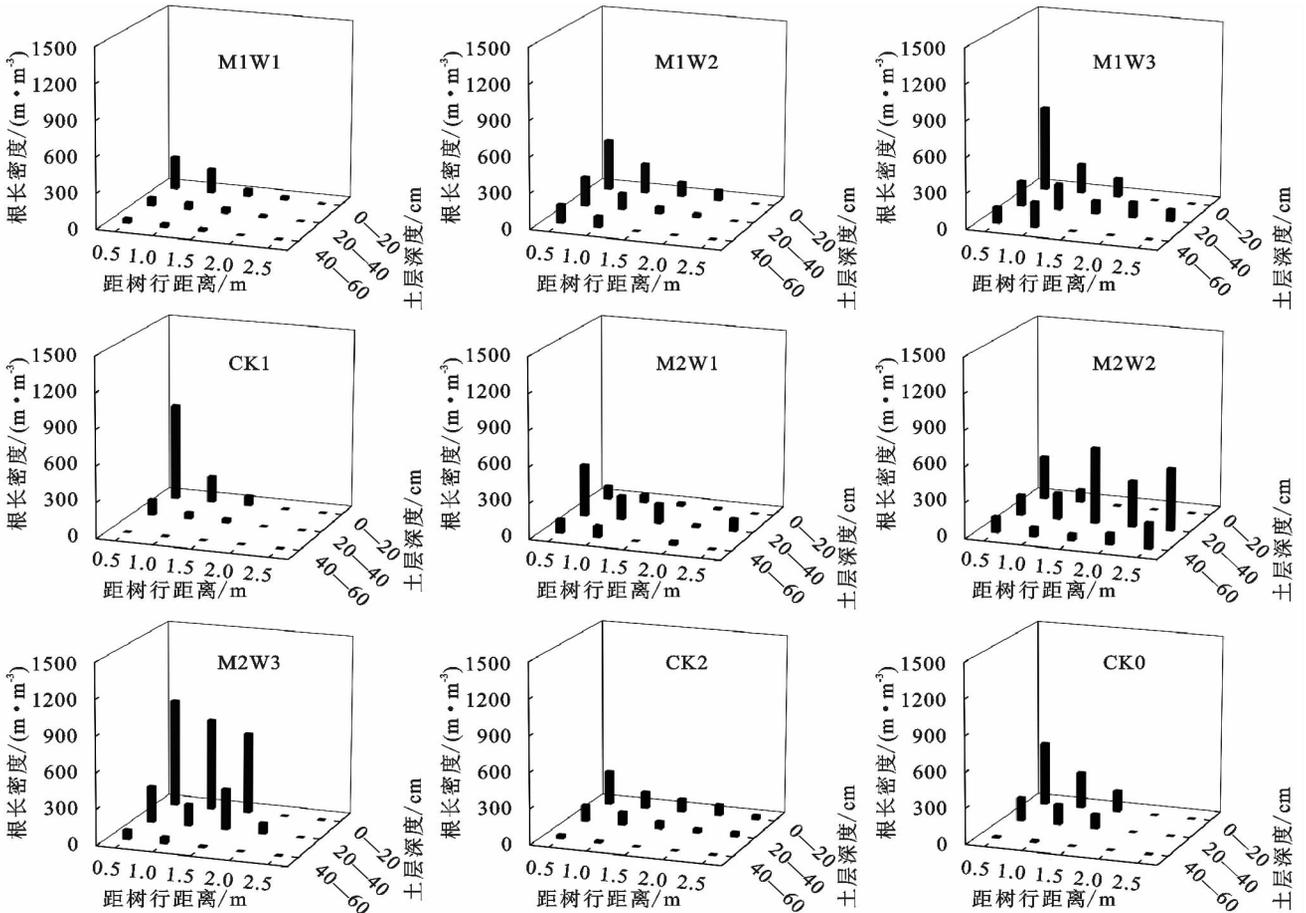


图 3 苹果根长密度空间分布特征

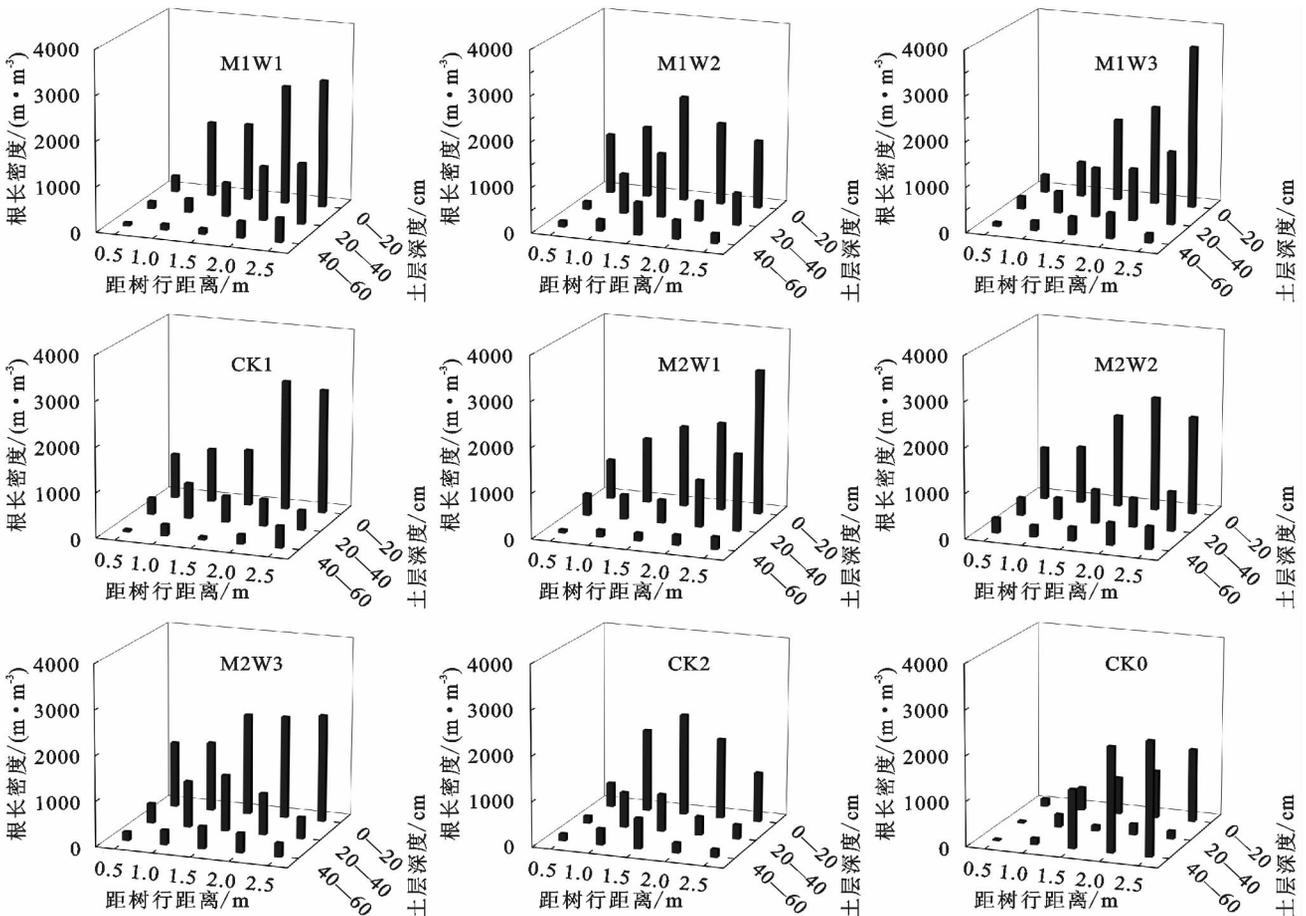


图 4 大豆根长密度空间分布特征

表 2 根长密度与水平和垂直方向的相关系数

处理	水平方向		垂直方向	
	苹果	大豆	苹果	大豆
M1W1	-0.954**	0.970**	-0.936**	-0.969**
M1W2	-0.948**	0.300 ^{ns}	-0.969**	-0.961**
M1W3	-0.937**	0.976**	-0.976**	-0.985**
CK1	-0.861**	0.882**	-0.937**	-0.942**
M2W1	-0.911**	0.929**	0.034 ^{ns}	-0.985**
M2W2	0.235 ^{ns}	0.887**	0.068 ^{ns}	-0.925**
M2W3	-0.920**	0.587*	-0.978**	-0.961**
CK2	-0.931**	0.129 ^{ns}	-0.984**	-0.919**
CK0	-0.965**	0.983**	-0.989**	0.386 ^{ns}

注:ns 表示不显著; * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$ 。

2.4 苹果×大豆间作系统土壤水分主要竞争区域

采用聚类分析法分析苹果和大豆根系重叠程度,

将各处理的根长密度分为 4 类,最小类对应较低的根长密度。再将各个监测点下苹果和大豆的分类级数求和进行对比,总级数大表明 2 种植物根系重叠程度高,不同处理 0—60 cm 土层总级数最大为 M1W2 和 CK1,最小为 M2W2。其中 0—20 cm 土层总级数在 0—60 cm 土层中所占比重最大,除 CK0 外,其余处理总级数均随土层深度的增加而降低;W2 水平在 20—40 cm 土层总级数较大,而在 40—60 cm 土层,相同覆盖下灌溉处理的总级数低于不灌溉处理。不同处理植物根系生态位宽度表现出较大差异,秸秆覆盖处理和 M2W1 主要水分竞争区域为距树行 0.5~1.0 m, M2W2 为 1.5~2.5 m 区域, M2W3 和 CK2 为 0.5~1.5 m 区域。

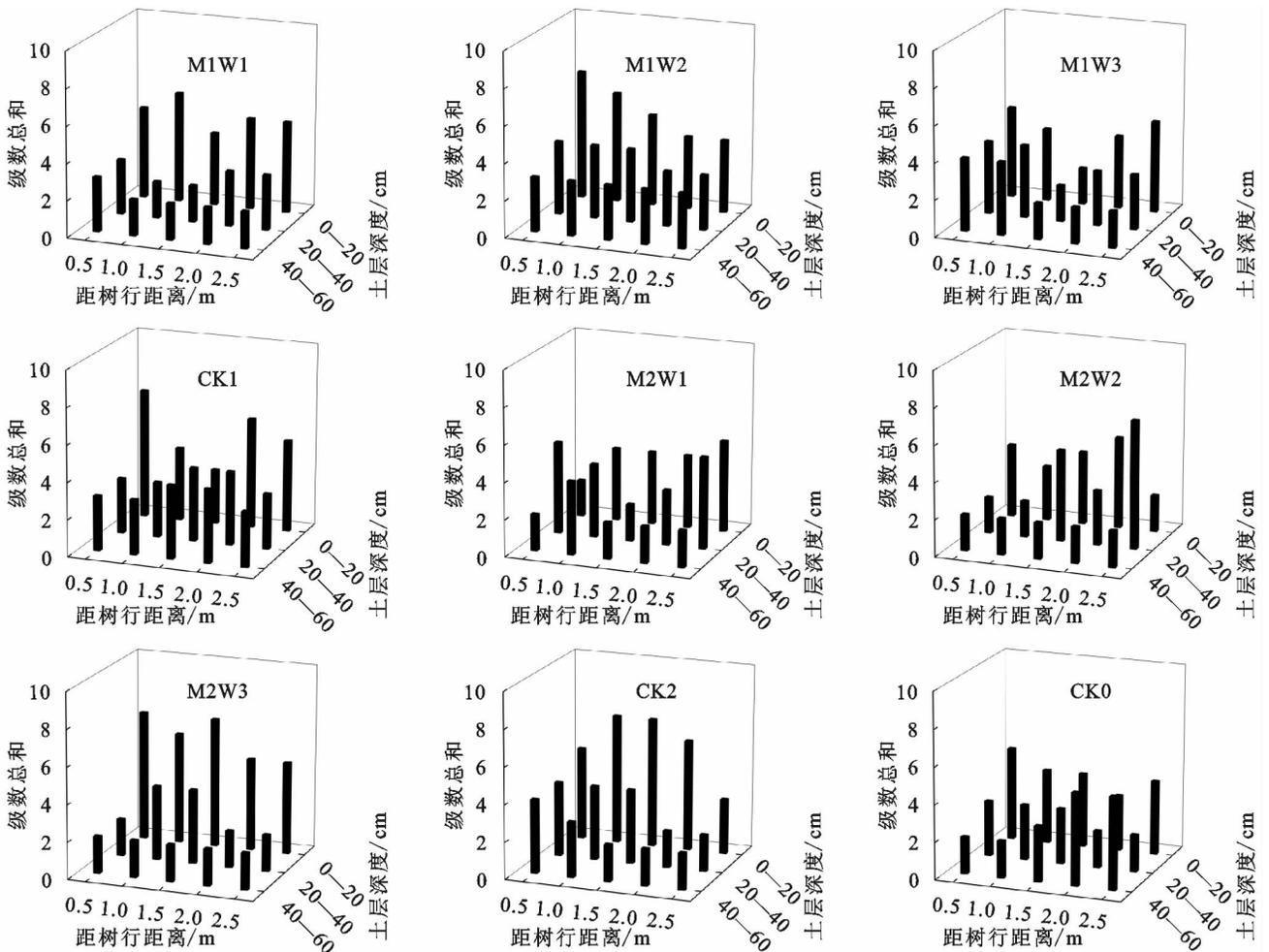


图 5 不同水分调控下苹果和大豆根长密度级数汇总情况

2.5 水分调控对大豆鼓粒期土壤水分的影响

大豆鼓粒期为间作系统生长最旺的时期,种间竞争也最为激烈,由图 6 可知,CK0 处理土壤水分最小且与 CK1 和 CK2 之间差异不显著,水分调控措施总体可提高 0—60 cm 土层的土壤水分。CK0 处理水分较大值出现在 2.0~2.5 m 范围,而其他水分调控处理土壤水分较大值出现在距树行 0.5~1.0 m

区域。M2W2、M2W3 和各对照组在不同距树行距离处的土壤水分差异较小,整体为弱变异性(变异系数小于 0.1),而其余处理为中等变异性(变异系数介于 0.1~1.0)。总体上,各处理土壤水分随距树行距离的增加表现为先减后增的趋势,数值最小在 1.0~2.0 m 区域,而随土层深度的增加呈递增趋势。CK0 处理水分较大值出现在 2.0~2.5 m 范围,而

其他水分调控处理土壤水分较大值出现在距树行 0.5~1.0 m 区域。

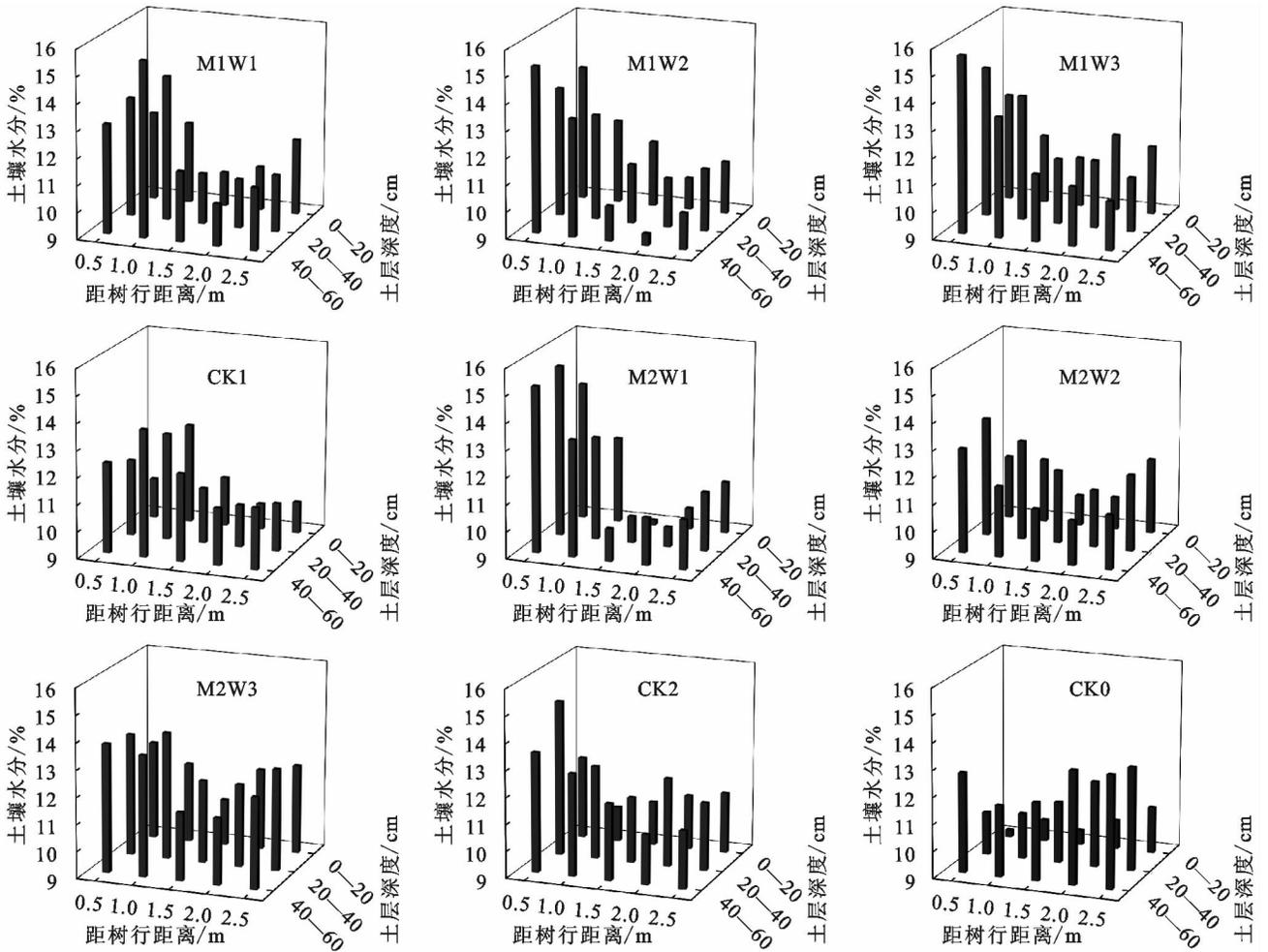


图 6 大豆鼓粒期土壤水分空间分布特征

2.6 不同水分调控对间作系统耗水特性和水分利用的影响

由表 3 可知,总体上,间作系统耗水量随灌水量的增加呈递增趋势,耗水量最大为 M2W3 处理,CK2 处理耗水量最小且与 CK0、CK1 之间无显著差异,相同灌水条件下,地膜覆盖下的耗水量均高于秸秆覆

盖。不同处理中产量最高为 M2W2,而 CK1、CK2 分别较 CK0 增产 2.10%,11.05%。相同灌水量条件下,地膜覆盖的耗水量、大豆籽粒产量和 WUE 均高于秸秆覆盖。WUE 最大为 M2W2 处理,可较其他处理提高 8.55%~53.35%,除 CK2 外,和其他处理之间均差异显著。

表 3 不同水分调控处理对间作系统耗水量和水分利用效率的影响

处理	灌水量/ mm	降水量/ mm	土壤贮水 消耗量/mm	耗水量/ mm	大豆籽粒产量/ (kg · hm ⁻²)	水分利用效率/ (kg · hm ⁻² · mm ⁻¹)
M1W1	20	427.6	-30.84	412.67d	1881.5ce	4.56c
M1W2	65	427.6	-33.15	459.45c	1921.2c	4.18d
M1W3	130	427.6	-38.89	518.70a	1871.1ce	3.61e
CK1	0	427.6	-31.34	396.26e	1810.3b	4.66c
M2W1	20	427.6	-35.23	416.36d	2052.6b	4.93b
M2W2	85	427.6	-32.92	479.68b	2655.5a	5.54a
M2W3	135	427.6	-30.79	532.11a	1979.4c	3.72f
CK2	0	427.6	-33.41	394.19e	2010.4b	5.10a
CK0	0	427.6	-28.58	398.75e	1848.3e	4.54c

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

秸秆覆盖下灌水处理可较 CK1 提高耗水量 4.14%~30.90%,增产 1.80%~3.94%,而 WUE

却较 CK1 降低 2.16%~22.53%。地膜覆盖下大豆生育期内灌水量为 20~85 mm 时,耗水量和产量分别

较 CK2 增加 5.62%~21.69%, 2.10%~32.09%, 当灌水量增至 135 mm 时, 耗水量较 CK2 增加了 25.92%, 但产量和 WUE 却分别降低了 1.54% 和 27.06%。总体上, M2W2 处理耗水量比 W3 组减少约 40~50 mm, 而产量和水分利用却分别提高了 34.16%~41.92% 和 48.82%~53.35%。

2.7 苹果×大豆间作系统经济效益分析

由表 4 可知, 各处理净收益之间存在一定差异, 其中 M2W2 处理的净收益最大, 达 2 976.5 元/hm², 最小为 M2W3 出现了亏本。秸秆覆盖下, 各灌水组总收入虽然均高于 CK1, 但是由于灌水投入使 M1W1、M1W2、M1W3 处理的净收益分别较 CK1 减少了 17.00%, 36.20%, 64.42%, 秸秆覆盖下随着灌溉量的增加, 净收益也逐渐减少。地膜覆盖下随着灌水量的增加净收益呈先增后减的趋势, 这是由于地膜覆盖下过多的灌水增加了成本。

表 4 不同处理大豆生产成本和经济效益

单位: 元/hm²

处理	基础投入 (资金+劳动力)	灌水投入 (资金+劳动力)	总投入 (资金+劳动力)	总收入	净收益
M1W1	4150	280	4530	5644.5	1214.5
M1W2	4150	680	5030	5763.6	933.6
M1W3	4150	1330	5680	6000.6	520.6
CK1	4150	0	4150	5613.3	1463.3
M2W1	4310	280	4690	6157.8	1567.8
M2W2	4310	680	5190	7966.5	2976.5
M2W3	4310	1330	5840	5571.0	-69.0
CK2	4310	0	4310	6151.2	1841.2
CK0	4150	0	4150	5544.9	1394.9

3 讨论

3.1 水分调控对间作系统根长密度的影响

本研究发现, 苹果和大豆根系分布既有重叠也有错位, 苹果细根主要分布在垂直方向 0—40 cm、水平方向 0.5~1.5 m 土层内, 灌溉处理的细根较无灌溉处理相比要下移; 而大豆细根集中分布于垂直方向 0—20 cm、水平方向 1.5~2.5 m 土层。大豆细根在距离树行 1.5~2.5 m 范围内占据了主导, 使得该区域内种间竞争程度较小。与清耕相比水分调控扩大了 2 种植物根系的空间生态位, 其中地膜覆盖效果优于秸秆覆盖。可能是因为覆膜的增温保墒效应改善了耕层土壤水热状况, 进而缓解了种间竞争, 促进了根系生长发育^[12]。此外, 本研究发现, M2W2 处理苹果根长密度与距树行距离以及土层深度均无相关性, 这与苹果和大豆根系分布差异有关, 该处理下苹果细根主要分布在 20—40 cm 土层, 而大豆细根集中分布在 0—20 cm 土层, 这种根系错位分布有效利用了土

壤的立体空间, 使苹果和大豆在土壤水分利用空间上形成差异, 缓解了种间水分利用竞争^[13]。

3.2 苹果×大豆间作系统水分竞争区域

根据生态位理论, 根系重叠在土壤干旱缺水时必然导致竞争^[14]。本研究发现, 不同水分调控下种间主要水分竞争区域表现出较大差异, 秸秆覆盖和 M2W1 处理主要竞争区域为 0.5~1.0 m, M2W2 为 1.5~2.5 m 区域, M2W3 和 CK2 为 0.5~1.5 m 区域, 而 CK0 在 0.5~2.5 m 区域的竞争强度均较大, 可见水分调控措施降低了苹果和大豆根系重叠区域从而缓解种间水分竞争。许华森等^[15]对相同研究区核桃×大豆间作系统的研究指出, 清耕下种间水分竞争区域为距树行 1.0~2.5 m 范围, 说明不同树种在不同林龄期间其间作作物根系分布差异较大。

3.3 水分调控对间作系统根区土壤水分环境的影响

本研究中大豆鼓粒期各水分处理土壤水随距树行距离的增加表现为先减后增, 随土层深度的增加呈递增趋势, 不同水分调控下土壤水分数值最大为距树行 0.5~1.0 m 区域, 最小为 1.5~2.0 m 区域。但田阳等^[16]和高路博等^[17]发现在苹果与农作物间作模式中, 距离树行越近的区域土壤水分越小, 这种差异可能是本研究 0.5~1.0 m 为果树冠幅完全覆盖区域, 该区域内虽然果树根系分布较为密集, 但仍处于幼龄阶段, 耗水较低; 此外, 水分调控和果树的水力提升作用增加了该范围内的土壤水分^[18]。1.5~2.0 m 区域土壤水分消耗较大, 可能是该区域耗水以大豆为主, 且该生育期为大豆生长旺盛期, 水分需求强烈, 种内水分竞争占据主导。本研究中, 覆盖措施可提高 0.5~1.0 m 区域内的土壤水分, 说明对于幼龄果树而言, 覆盖措施能提高其根系范围内土壤水分含量。

3.4 水分调控对间作系统耗水特性的影响

本研究中相同灌水条件下, W1、W2 组地膜覆盖的耗水量、产量和 WUE 均高于秸秆覆盖, 而 W3 组地膜覆盖的产量和 WUE 均较低, 说明适度的水分亏缺更有利于提高间作系统的水分利用。地膜覆盖在间作系统中可达到增产增收的效果, 可能是因为覆膜有效贮存了雨水和灌溉水并能防止水分蒸发^[19], 而秸秆覆盖保水性较覆膜差, 降雨量较小时残茬截获的雨水不能被植物吸收利用影响了根系及作物生长进而降低了产量。本研究发现, 水分调控措施可以改变间作系统根系的生长与分布, 有节水增产的效果, 其中 M2W2 处理的效果最佳, 该处理苹果和大豆在垂直方向上根系错位分布提高了土壤水分利用。此外, M2W2 处理较其他处理有最高的产量和较低的耗水

量所以,其水分利用最高。这说明在间作系统中采取地膜覆盖和适中补水灌溉量相结合的水分调控模式是实现节水增产的较好组合。

4 结论

(1)与无水分调控措施相比,水分调控增加了苹果和大豆细根空间分布,其中覆膜和灌溉分别扩展了苹果细根水平分布和下扎深度。根长密度与水平和垂直方向存在显著相关性,总体上苹果根长密度与水平方向呈负相关,而大豆为正相关,且 2 种植物与垂直深度均存在负相关关系。

(2)聚类分析表明不同水分调控下种间主要水分竞争差异较大,其中 M2W2 为距树行 1.5~2.5 m, M2W3 和 CK2 为 0.5~1.5 m 区域,其余覆盖处理在 0.5~1.0 m 区域,垂直方向上各处理主要竞争深度均在 0—40 cm 土层。

(3)大豆鼓粒期各处理土壤水分随距树行距离的增加呈先减后增,而随土层深度的增加呈递增趋势,不同水分调控措施下土壤水分最大为 0.5~1.0 m 区域,最小为 1.5~2.0 m 区域。

(4)水分调控条件下覆膜的产量和 WUE 均高于覆秸秆,其中 M2W2 处理可较高水处理节水 40~50 mm,产量可较 M1W3、M2W3 分别提高 41.92% 和 34.16%,水分利用则分别提高 53.35% 和 48.82%,同时净收益最大,可达 2 976.5 元/hm²。

综上,晋西黄土区幼龄苹果与大豆间作时建议采用地膜覆盖措施,同时在分枝期灌水 150 m³/hm²,结荚期灌水 400 m³/hm²,鼓粒期灌水 300 m³/hm² 不仅能提高经济收入,同时可缓解种间水分竞争和提高间作系统水分高效利用。

参考文献:

[1] 王丹,毕华兴,许华森. 苹果花生间作系统土壤水分动态及主要竞争区域[J]. 干旱地区农业研究,2018,36(1):89-94.

[2] 胡惠杰,王猛,尹小刚,等. 气候变化下东北农作区大豆需水量时空变化特征分析[J]. 中国农业大学学报,2017,22(2):21-31.

[3] Seth M, Rameshwar, Saini J P, et al. Productivity and economics of wheat (*Triticum aestivum*) + chickpea (*Cicer arietinum*) intercropping under irrigation and nutrient management [J]. Indian Journal of Agronomy, 2016, 61(3): 286-291.

[4] 武继承,管秀娟,杨永辉. 地面覆盖和保水剂对冬小麦生

长和降水利用的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(1): 86-92.

[5] 徐小林,吴昌强,李大明,等. 稻草覆盖对花生木薯间作系统产量和土壤性状的影响[J]. 中国农学通报,2017, 33(29):19-24.

[6] 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.

[7] 杨彩红,柴强,黄高宝. 荒漠绿洲区交替灌溉小麦/玉米间作水分利用特征研究[J]. 中国生态农业学报,2010, 18(4):782-786.

[8] 高飞,王若水,许华森,等. 水肥调控下苹果—玉米间作系统作物生长及经济效益分析[J]. 干旱地区农业研究, 2017,35(3):20-28.

[9] 何春霞,孟平,张劲松,等. 华北低丘山区核桃—决明子复合模式的根系分布[J]. 林业科学研究,2013,26(6): 715-721.

[10] 许华森,云雷,毕华兴,等. 核桃—大豆间作系统细根分布及地下竞争[J]. 生态学杂志,2012,31(7):1612-1616.

[11] 云雷. 晋西黄土区果农间作系统种间关系研究[D]. 北京:北京林业大学,2011.

[12] Li X, Šimůnek J, Shi H, et al. Spatial distribution of soil water, soil temperature, and plant roots in a drip-irrigated intercropping field with plastic mulch [J]. European Journal of Agronomy, 2017, 83: 47-56.

[13] 李玉英,胡汉升,程序,等. 种间互作和施氮对蚕豆/玉米间作生态系统地上部和地下部生长的影响[J]. 生态学报,2011,31(6):1617-1630.

[14] 王婷,马亮,马英杰. 干旱区枣棉复合系统细根空间分布特征及种间地下竞争关系[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2017,45(1):54-60.

[15] 许华森,毕华兴,高路博,等. 晋西黄土区果农间作系统根系生态位特征[J]. 中国农学通报,2013,29(24):69-73.

[16] 田阳,周玉喜,云雷,等. 晋西黄土区苹果—农作物间作土壤水分研究[J]. 水土保持研究,2013,20(2):29-37.

[17] 高路博,毕华兴,许华森,等. 晋西幼龄苹果×大豆间作的土壤中水分、养分空间分布特征及对大豆的影响[J]. 中国农学通报,2013,29(24):36-42.

[18] 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.

[19] 周始威,胡笑涛,王文娥,等. 春玉米不同生育期土壤湿润层深度调控的稳产节水效应[J]. 农业工程学报, 2016,32(21):125-132.