

# 滴灌模式对黄土高原苹果树生长、 产量及根系分布的影响

刘星,曹红霞,廖阳,周宸光

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院,旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100)

**摘要:**以8 a生富士苹果为材料,设3种滴灌方式:分根交替滴灌(ADI)、单管滴灌(UDI)和双管滴灌(BDI),以及3个灌水量处理:高水(W1)、中水(W2)、低水(W3),通过大田试验,研究陕北黄土山地苹果区不同滴灌方式和灌水量对苹果地上部和地下部生物量、产量、水分利用效率等的影响。结果表明:苹果树在4个生长阶段的耗水量依次为果实膨大期(III)>开花坐果期(II)>萌芽展叶期(I)>果实成熟期(IV),处理间耗水量大小排序为W1>W2>W3,ADI处理在各灌水量下均比其他滴灌方式下的耗水量小;苹果树生长中期和后期新梢长度、粗度以及叶面积指数(LAI)随滴灌量增加呈现先增大后减小的趋势,ADI-W2处理苹果树的新梢粗度与长度以及LAI最大;苹果树根系主要分布在0~80 cm土层中,但主要集中分布于20~60 cm土层中,在2018年与2019年,ADI-W2处理根系干重密度在南北侧40~60 cm土层达到最大值(137.9 g·m<sup>-3</sup>,163.7 g·m<sup>-3</sup>),吸收根长密度在南北侧40~60 cm土层达到最大值(820.1 m·m<sup>-3</sup>,959.9 m·m<sup>-3</sup>);苹果树产量与生长后期的新梢长度、粗度、LAI有显著的正相关性,ADI-W2处理下产量和水分利用效率在2 a均为最高,在2019年分别达到43 970.08 kg·hm<sup>-2</sup>,7.12 kg·m<sup>-3</sup>。综合考虑苹果新梢生长、根系分布、产量和水分利用效率等因素,建议最优的滴灌模式应是ADI-W2处理。

**关键词:**苹果树;滴灌;分根交替滴灌;根系分布;产量;水分利用效率

**中图分类号:**S661.1;S275.6 **文献标志码:**A

## Effects of drip irrigation methods on the growth, yield and root distribution of apple trees on the Loess Plateau

LIU Xing, CAO Hongxia, LIAO Yang, ZHOU Chenguang

(College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** To explore the effect of different drip irrigation methods and irrigation rates on the growth and water consumption of apples in mountainous areas on the Loess Plateau and to provide a basis for decision-making to achieve reasonable irrigation of apple orchards in the mountainous areas of Loess Plateau and improve water use efficiency, an experiment used 8 a raw apple (Fuji) as the material and three drip irrigation methods, alternate root drip irrigation (ADI), single-pipe drip irrigation (UDI), and double-pipe drip irrigation (BDI). There were three irrigation rate treatments including high (W1), medium (W2), and low water (W3). The effects of different drip irrigation methods and irrigation rates on biomass and yield of apple aboveground and belowground in the field trials were investigated. The results showed that the water consumption of apple at four growth stages in the mountain area in northern Shaanxi was in the order of fruit expansion (III)>flowering and fruiting (II)>germination and leafing (I)> fruit ripening (IV). The order of water consumption was W1>W2>W3, and the water consumption of ADI treatment was the smallest compared with other drip irrigation methods. The length, thickness and LAI of the new shoots at the middle and later stages of apple growth showed an overall trend of increasing first and then decreasing with increasing drip irrigation. The ADI-W2 had the largest apple diameter, length of the new shoots, and growth

of *LAI* at the middle and growing stages. Apple roots were mainly distributed in the 0~80 cm soil layer, but, mainly distributed in 20~60 cm soil layer. The soil layer of 40~60 cm reached the maximum value ( $137.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  and  $163.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ), and the absorption root length density reached the maximum value in the soil layer of 40~60 cm on the north and south sides ( $820.1 \text{ m} \cdot \text{m}^{-3}$  and  $959.9 \text{ m} \cdot \text{m}^{-3}$ ) in 2018–2019. There was a significant correlation between the yield of apple trees and the new length, thickness, and *LAI* at the later growth stage, as well as the root dry weight density of the 20~60 cm soil layer on the north and south sides and the root length density ( $p < 0.05$ ). The yield and efficiency of ADI-W2 were the highest in both years, reaching  $43970.08 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $7.12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  in 2019, respectively. Considering the growth of new shoots, root distribution, yield and water use efficiency of apples, it is suggested that the optimal drip irrigation mode should be ADI-W2 treatment. This study can provide theoretical and technical reference for apple water management in mountainous areas in northern Shaanxi.

**Keywords:** apple tree; drip irrigation; alternate root drip irrigation; root distribution; yield; water use efficiency

苹果作为大众水果之首,营养价值高、色泽艳丽、口感极佳,一直以来都受到人们的青睐。陕北黄土区土层深厚,海拔高,光照充足,昼夜温差大,有利于果实糖分的积累,是苹果的最佳适生区。生产的苹果色艳、个大、细腻、香味浓厚、含糖量高、耐贮运、无污染,是该区颇具影响的特色产业<sup>[1]</sup>。但由于当地降雨量小且分配不均,苹果树生长发育对水分的需求与降雨的季节分配量错位,水分供需矛盾突出,再加之日照强烈、空气干燥,土壤水分蒸发散失快,山地苹果园季节性干旱缺水严重<sup>[2]</sup>。灌溉是改善旱地果园水分供应状况的有效措施,但不合理的灌水方式,不仅会造成水资源浪费以及水分利用效率的降低,还会造成土壤湿度过大、病害滋生,影响果实产量和品质<sup>[3]</sup>,因此对苹果树进行科学、合理的水分管理与调控,成为果树生产管理的关键环节。不同灌水模式对苹果树耗水规律、果实产量等均会产生显著影响<sup>[4]</sup>。开展适宜滴灌方式研究,对滴灌条件下苹果的合理水分调控和灌溉决策具有重要意义。

分根交替灌溉是在作物的某些生育期或全生育期交替对部分根区进行灌溉,其余根区则采取水分胁迫的新型灌溉方式,通过根系产生根源信号脱落酸来调节最优气孔开度,同时根系交替经受一定程度的干旱锻炼,提高根系对水分和养分的利用率,达到不牺牲光合产物积累而减少棵间蒸发损失的节水目的<sup>[5]</sup>。分根交替灌溉在玉米<sup>[6]</sup>、葡萄<sup>[7]</sup>、番茄<sup>[8]</sup>、果树<sup>[9]</sup>等作物进行了大量研究,发现其有提高水分利用效率、节水、适产和优质的效果。前人对分根交替灌溉在果树生长发育、产量、耗水、根系分布等方面均有大量研究<sup>[10]</sup>,发现分根交替灌溉能显著提高灌溉水利用效率和植物水分利用效率,

诱导灌水区域的根系数目增加,调控营养生长和生殖生长的平衡,保证植株正常生长发育<sup>[11]</sup>。焦润安等<sup>[12]</sup>研究发现,分根交替滴灌处理在促进苹果幼树根系生长上具有明显的优势,主要是由于这种灌溉方式改善了土壤的透气性和水分环境,提高了根系活力,显著增加了吸收根根长和输导根干重,提高了根干重。刘贤赵等<sup>[13]</sup>研究发现,分根交替滴灌处理通过干、湿交替使部分根系经受一定程度的水分胁迫,利用植物普遍存在的补偿生长机制刺激了根系的生长,从而分生出较多的毛细根群(即吸收根),增强了根系吸收土壤养分、水分的能力,这可能是植物对环境的一种适应性反应。宋磊等<sup>[14]</sup>对桃树的研究表明,分根交替灌溉的产量相比常规灌溉低 10%,但水分利用率提高 75%。Du<sup>[15]</sup>等通过对西北干旱地区的葡萄研究发现,分根交替灌溉提高葡萄产量 13% ( $P < 0.05$ ), *WUE* 提高 30% ( $P < 0.05$ )。

前人对不同灌水条件下苹果的研究主要集中于地上部生物量、产量、水分利用效率等方面<sup>[16]</sup>,但是不同研究条件下适宜的滴灌方式与灌水量不尽相同,此外在滴灌条件下将地上部、地下部生物量进行系统分析的相关研究较为少见。特别是不同滴灌方式对陕北山地苹果地上部、地下部生长发育等方面的系统研究还较为薄弱。耗水量、根系分布、产量以及水分利用效率等综合指标的复合联系以及不同滴灌条件下的土层根系空间分布与产量的相关关系研究较少。本研究以陕北地区山地苹果为研究对象,选用 8 a 生寒富苹果树为材料,研究不同滴灌条件对苹果生长指标、根系指标、产量和水分利用效率的影响,确定该种植模式下适宜的滴灌方式与灌水定额,以期为山地苹果园滴灌水分管理提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验于2018年3月下旬到2019年10月下旬在陕西省榆林市子洲县前清水沟村现代农业示范园区(37°27'N, 110°2'E, 海拔1 020 m)进行。试验地为典型的黄土高原山地地区,属温带半干旱性气候。多年年均降雨量453.6 mm,且年内分布不均,70%以上降雨主要集中于7—10月,年均蒸发量2 290 mm。多年平均气温9.1℃,无霜期164 d,年平均日照时数2 543.3 h(日照百分率达60%)。试验地选在背风向阳的缓坡地山地苹果园,该地区土层深厚,太阳辐射强,昼夜温差大,供试土壤为砂壤土,pH值8.5,偏碱性,土壤容重为 $1.41 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,塬面地下水埋深在150~250 m以下,是典型旱作中、晚熟苹果适生区。

### 1.2 试验设计

试验选取8 a生矮化晚熟品种寒富为试验树。种植株行距为 $2 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ ,长势大小均一,个体差异性较小。试验地东西长约30 m,南北宽约31.5 m,面积约945  $\text{m}^2$ 。试验设计有3种滴灌方式、3个灌水量,共设有9个处理,每个处理均随机选取长势良好、大小均一的苹果树,各处理重复3次。3种滴灌方式分别为:单管滴灌(UDI)、双管滴灌(BDI)、双管分根交替滴灌(ADI)。单管滴灌(UDI):沿树干平行铺设滴灌管( $\phi 16 \text{ mm}$ ),滴灌管位置紧贴树干。双管滴灌(BDI):两侧滴灌管平行于树行布置且距离树干0.6 m。双管分根交替滴灌(ADI):同双管滴灌(BDI)布置,采用交替滴灌灌溉方式灌水,每次灌溉利用其中一根滴灌管灌水,随灌水事件交替进行。共设有3个灌水量处理:高水(W1,  $85\% \theta_f$ ,  $\theta_f$ 为田间持水量)、中水(W2,  $75\% W1$ )、低水(W3,  $55\% W1$ )。W1根据UDI-W1处理的灌水上限为 $85\% \theta_f$ 确定,在不同滴灌方式下,同一灌水处理灌水量相同。具体灌溉定额见表1。采用滴灌灌水,滴头流量 $3 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ ,滴头间距30 cm,每个灌水小区采用独立水表和水阀控制灌水。

根据TRIME-TDR系统测定的UDI-W1处理土壤含水量是否达到70%田间持水量作为灌水依据,若低于 $70\% \theta_f$ 则进行灌水。土壤含水率测定每7 d进行1次,当发现土壤含水率低于下限时进行灌水,高于下限则不灌。灌水量计算公式为:

$$I = 0.1r \times H \times P \times S \times (\theta_{\max} - \theta_{\text{TRIME}}) \quad (1)$$

式中, $I$ 为每棵树灌水量(L); $P$ 为计划湿润比,取0.3; $H$ 为计划湿润层(m),取0.8 m; $S$ 为单棵试验树控制灌溉面积,为 $2 \text{ m} \times 3 \text{ m} = 6 \text{ m}^2$ ;  $\theta_{\max}$ 和 $\theta_{\text{TRIME}}$ 分别代表灌水上限( $85\% \theta_f$ )和TRIME-TDR测定土壤实际含水量(土壤重量含水率%); $\gamma$ 为土壤容重,取 $1.41 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。2018—2019年各处理的灌水量见表1。每个处理设有3个重复,小区之间埋设有不透水膜隔阻每个独立小区之间进行水分流动,同时每个独立小区周围设置保护树。

于10月末(采摘后),施用 $700 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \text{ P}_2\text{O}_5$ ,  $570 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \text{ K}_2\text{O}$ 和 $430 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 尿素作为基肥,第2年6月中旬再施用 $430 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \text{ K}_2\text{O}$ 和 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 尿素作为追肥。各小区除试验处理外其他管理措施一致。

### 1.3 观测项目与方法

新梢长度和粗度分别采用卷尺和游标卡尺测定。在苹果树东、南、西、北4个方向的上、中、下部各选取1个新梢进行测定,每处理测定36个新梢。新梢长度和粗度测定于5月初开始至8月中旬新梢停长结束,每隔7 d测定1次。叶面积指数(LAI)采用冠层分析系统(Sunscan)从叶片生长期开始测定,每隔7 d测定1次,直至生育期结束。

根系样品于2018年10月与2019年10月(果实收获后)采用根钻法进行取样,根钻直径10 cm,距离树干60 cm,于树干东、南、西、北4个方位取样,取样深度80 cm,每个处理3个重复,每个取样位置每层土壤样品分别标记带回室内,将所有根系挑拣出来,充分洗净,将分离出的根系用镊子平铺于尺寸为 $20 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$ 的有机玻璃皿中,用扫描仪(Epson perfection 4870型)对根系进行扫描,再用WinRHIZO根系分析软件(Regent Instruments Company, Canada)对扫描结果进行分析,并计算吸水根(直径 $\leq 2 \text{ mm}$ )的根长密度<sup>[17]</sup>,即

$$RDL = LR/VS \quad (2)$$

式中, $RDL$ 为根长密度( $\text{m} \cdot \text{m}^{-3}$ ); $LR$ 为根系长度(m); $VS$ 为土壤体积( $\text{m}^3$ )。

扫描后的根系先在 $105^\circ\text{C}$ 下进行杀青5 min,然后在 $75^\circ\text{C}$ 恒温下烘干36 h,用精度为0.0001 g的电子天平进行称量,获得根系干质量,再将根系干质量除以土芯体积得到每个样品的根系干质量密度。

2018—2019年实际收获日期分别为10月23、10月24日。收获后,测定每个苹果树的果实数量、质量,得到每处理单株产量后换算为每公顷产量。

土壤含水率测定采用 TRIME-T3 管式 TDR 系统 (IMKO 公司德国)。在试验树周围布设 4 根 Trime 管, 离树干 60 cm 处分别布置在树干东、南、西、北 4 个方向。在 0~80 cm 土层, 每隔 10 cm 测定土壤含水率。

作物耗水量 ( $ET$ ) 计算方法<sup>[18]</sup>为:

$$ET = \Delta W + I + P_r + G - D - R \quad (3)$$

式中,  $ET$  为作物耗水量 (mm);  $\Delta W$  为 2 次测量土壤贮水量的减少量 (mm);  $I$  为灌水量 (mm);  $P_r$  为有效降雨量 (mm);  $G$  为地下水补给量 (mm);  $D$  为深层渗漏量 (mm);  $R$  为地表径流 (mm)。由于试验地点地下水水位在地表 50 m 以下故不考虑地下水补给, 即  $G = 0$ ; 试验滴灌流量较小, 且灌水定额较低, 灌水引起的深层渗漏可忽略不计, 即  $D = 0$ ; 地表径流较小, 故地表径流 ( $R$ ) 可忽略, 因此 (3) 式可简化为

$$ET = \Delta W + I + P_r \quad (4)$$

$WUE$  计算方法为

$$WUE = Y/ET \quad (5)$$

式中,  $Y$  为产量 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )。

#### 1.4 数据统计与分析

用 SPSS 数据处理系统 (SPSS 23.0) 进行苹果树根系和果树生长指标的方差分析, 采用 Duncan 新复极差多重比较法进行显著性分析。采用 Origin 2018 进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同滴灌处理下苹果树各生育期耗水量

表 2 为 2018—2019 年不同滴灌条件下各生育阶段苹果树的耗水量 ( $ET$ )。2018—2019 年各处理下苹果全生育期的耗水量 ( $ET$ ) 分别为 5 847 ~ 7 001.5、6 009.9 ~ 6 945.3  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ , 各滴灌方式下的  $W2$ 、 $W3$  与  $W1$  相比耗水量差异显著, 耗水量为  $W1 > W2 > W3$ 。

各处理下苹果树各生育阶段耗水量为果实膨大期 (III 期) > 开花坐果期 (II 期) > 萌芽展叶期 (I 期) > 果实成熟期 (IV 期)。苹果树 I 期耗水量约占全生育期耗水总量的 7.4% ~ 10.9%, II 期约占 15.4% ~ 24.6%, IV 期约占 2.9% ~ 7.1%, 而 III 期耗水量占全生育期耗水总量的 64.7% ~ 68.6%, 远高于其他 3 个生育阶段。

表 1 2018—2019 年苹果树各灌水量处理的灌溉定额 / ( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )

Table 1 Irrigation quota of different irrigation rates treatment of apple trees from 2018 to 2019

灌水量处理 Irrigation amount treatment	2018	2019
W1	1363	1453
W2	1023	1089
W3	749	800

表 2 2018—2019 年滴灌处理下苹果树不同生育期耗水量 ( $ET$ ) / ( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )

Table 2 Water consumption of apple trees in different growth periods under drip irrigation in 2018—2019

年份 Year	处理 Treatment	生育期 Growth period			
		I	II	III	IV
2018	BDI-W1	547.8±66.74a	1718.4±52.16a	4525.9±118.61a	209.4±23.8abc
	BDI-W2	502.5±48.29 b	1493.2± 59.12cd	4398.3±198.9cd	224.2±51.1a
	BDI-W3	470.1±9.84 b	1427.2±72.93de	4270.6±81.95de	199.3±33.6c
	ADI-W1	540.5±26.54a	1592.2±53.45bc	4342.8±115.15bc	203.4±39.3bc
	ADI-W2	490.3±13.61a	1369.2±19.83ef	4121.2±62.15ef	218.4±16.6ab
	ADI-W3	453.8±41.08e	1184.3±48.77g	4012.8±96.44g	196.1±43.8c
	UDI-W1	544.6±51.34a	1646.1±63.07ab	4451.2±125.58ab	196.6±39.6c
	UDI-W2	496.1±40.13b	1459.2±47.16de	4301.4±45.61de	200.4±29.3c
	UDI-W3	460.9±44.04d	1301.8±52.53f	4181.4±64.55f	193.6±43.8c
2019	BDI-W1	756.2±36.41a	1246.5±65.5a	4515.2±128.08a	427.4±49.01ab
	BDI-W2	680.4±35.82bcd	1160.7±104.19abc	4396.2±151.90ab	434.6±34.22ab
	BDI-W3	663.5±41.08cd	999.8±41.52bcd	4191.6±54.76bcd	421.1±44.28ab
	ADI-W1	701.4±27.05bc	1051.4±78.62abcd	4312.3±112.42abc	424.2±42.32ab
	ADI-W2	642.6±85.93d	950.9±105.10cd	4142.7±59.51cd	438.2±41.01ab
	ADI-W3	639.9±50.27d	941.8±92.06d	4022.9±64.46d	405.3±42.39b
	UDI-W1	726.2±48.87ab	1194.4±61.79ab	4463.3±87.14a	430.6±54.31ab
	UDI-W2	672.5±64.78cd	1054.2±52.32abcd	4322.4±153.84abc	446.5±33.471a
	UDI-W3	658.7±56.49cd	956.2±33.03cd	4115.5±161.06cd	409.2±48.17b

注: I - 萌芽展叶期 (04-08—05-21); II - 开花坐果期 (05-22—06-22); III - 果实膨大期 (06-23—10-04); IV - 果实成熟期 (10-05—10-23)。不同小写字母表示同一年不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。

Note: I - germination stage (04-08—05-21); II - flowering to fruit set stage (05-22—06-22); III - fruit growth stage (06-23—10-04); IV - fruit maturation stage (10-05—10-23). Different letters indicate values that are significantly different at  $P < 0.05$  level among treatments in same year, the same below.

表 3 2018 年苹果树新梢长度、粗度和叶面积指数

Table 3 Growth length, diameter of new shoots and leaf area index of apple in 2018

处理 Treatment	新梢长度 Shoot growth length			新梢粗度 Shoot growth thickness			叶面积指数 Leaf area index		
	生长初期/cm Initial stage	生长中期/cm Middle stage	生长后期/cm Later stage	生长初期/mm Initial stage	生长中期/mm Middle stage	生长后期/mm Later stage	生长初期 Initial stage	生长中期 Middle stage	生长后期 Later stage
BDI-W1	16.76±1.51a	33.03±3.62b	37.87±4.57ab	3.63±0.35a	6.75±1.11cd	8.54±0.47bcd	0.63±0.04a	1.27±0.05abc	1.74±0.08bc
BDI-W2	17.26±1.84a	32.63±2.36b	38.8±3.82ab	3.97±0.87a	7.49±0.99b	9.16±1.29abc	0.63±0.07a	1.41±0.11a	1.91±0.09ab
BDI-W3	16.64±1.08a	29.47±3.92bc	36.53±4.5ab	3.30±0.82a	6.75±0.81cd	6.75±0.81cd	0.53±0.04a	1.21±0.10abc	1.64±0.15c
ADI-W1	16.80±1.17a	37.33±3.05a	44.07±3.38a	3.56±0.87a	7.08±0.73bc	8.50±0.88bcd	0.56±0.06a	1.33±0.06ab	1.80±0.06bc
ADI-W2	17.24±1.08a	38.27±2.62a	49.02±5.44a	3.42±1.08a	9.64±1.57a	11.76±0.69a	0.62±0.10a	1.39±0.06ab	2.07±0.05a
ADI-W3	16.5±2.65a	33.03±3.87b	43.07±4.42ab	3.17±0.6a	7.44±0.72b	10.30±0.98ab	0.56±0.03a	1.24±0.07abc	1.67±0.14c
UDI-W1	16.81±1.85a	24.83±2.78d	33.53±4.2ab	3.45±1.63a	6.26±0.71d	7.76±0.84bcd	0.53±0.04a	1.20±0.10bc	1.69±0.12c
UDI-W2	16.73±1.62a	25.73±4.29cd	34.17±3.07ab	3.43±1.01a	5.54±0.37e	7.78±1.14bcd	0.60±0.05a	1.27±0.10abc	1.79±0.17bc
UDI-W3	16.25±1.7a	22.07±3.25d	27.5±2.25b	3.80±0.44a	4.80±0.41f	6.29±0.68d	0.63±0.04a	1.12±0.10c	1.62±0.14c
M	ns	**	**	ns	**	**	ns	**	**
I	ns	**	ns	ns	*	*	ns	**	**
M×I	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注 Note: \*  $P<0.05$ , \*\*  $P<0.01$ 。M—滴灌方式 Drip irrigation methods; I—灌水量 Irrigation rates.下同。The same below.

表 4 2019 年苹果树新梢长度、粗度和叶面积指数

Table 4 Growth length, diameter of new shoots and leaf area index of apple in 2019

处理 Treatment	新梢长度 Shoot growth length			新梢粗度 Shoot growth thickness			叶面积指数 Leaf area index		
	生长初期/cm Initial stage	生长中期/cm Middle stage	生长后期/cm Later stage	生长初期/mm Initial stage	生长中期/mm Middle stage	生长后期/mm Later stage	生长初期 Initial stage	生长中期 Middle stage	生长后期 Later stage
BDI-W1	17.37±1.6a	31.43±3.81cd	39.47±3.9de	4.58±0.5a	8.30±1.16a	10.15±0.7a	0.75±0.05a	1.35±0.15abc	1.83±0.18bc
BDI-W2	18.33±1.8a	32.53±2.21cd	40.53±3.69cd	4.57±1.26a	7.68±0.77ab	10.47±0.86a	0.83±0.1a	1.37±0.05abc	1.94±0.13ab
BDI-W3	17.83±1.17a	29.07±1.38de	35.93±2.3ef	4.15±0.29a	6.16±0.35ab	9.67±0.84ab	0.75±0.08a	1.30±0.09bc	1.76±0.06c
ADI-W1	18.77±2.57a	36.43±2.64b	45.00±4.4b	5.15±0.47a	7.78±1.4ab	10.68±1.3a	0.78±0.09a	1.40±0.08abc	1.95±0.14ab
ADI-W2	17.63±2.61a	40.10±2.7a	49.27±3.86a	5.16±0.85a	8.40±1.66a	11.81±0.73a	0.85±0.04a	1.52±0.12a	2.12±0.09a
ADI-W3	18.3±1.56a	33.57±2.6bc	43.87±3.5bc	4.46±0.34a	6.25±0.98ab	9.7±0.86ab	0.78±0.06a	1.23±0.14cd	1.85±0.05bc
UDI-W1	18.27±1a	26.93±3.7ef	30.33±2.2gh	4.6±0.77a	5.47±0.49ab	6.84±0.91bc	0.72±0.05a	1.48±0.16ab	1.71±0.18c
UDI-W2	17.4±2.6a	27.77±2.08ef	33.23±3.67fg	5.32±0.9a	7.07±0.89ab	9.28±1.36ab	0.77±0.05a	1.48±0.10ab	1.96±0.03ab
UDI-W3	17.47±2.51a	24.87±2.62f	26.43±2.75h	5.01±0.73a	4.72±0.54b	6.21±0.8c	0.76±0.07a	1.03±0.07d	1.7±0.08c
M	ns	**	**	ns	**	**	ns	ns	**
I	ns	**	**	ns	**	**	ns	**	**
M×I	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns

不同滴灌方式相同灌水量下,分根交替滴灌(ADI)处理在各灌水量下的耗水量最小,双管滴灌(BDI)耗水量最大,单管滴灌(UDI)处理处于上述两者之间;而在W2下,ADI处理在苹果II、III期的耗水量较BDI处理和UDI处理减少更多,2018年BDI-W2处理的II期耗水量比ADI-W2处理增多了9.1%,2019年增多了22.1% ( $P<0.05$ ),2018年UDI-W2处理的III期耗水量比ADI-W2处理增多了4.4%,2019年增多了4.3%。

## 2.2 不同滴灌处理对苹果生长特性的影响

2018年苹果生育初期,不同处理新梢长度16.25~17.26 cm,新梢粗度在3.17~3.97 mm,叶面积指数在0.53~0.63之间;2019年的生育初期,新梢生长长度在17.37~18.77 cm,新梢粗度在4.46~5.32 mm,叶面积指数在0.72~0.85,2a各处理指标在生育初期没有显著差异(表3、表4)。在苹果生长的

中期和后期,不同滴灌处理对苹果树新梢长度、粗度和LAI的影响出现差异。苹果树的新梢茎粗与长度以及LAI在生长中期与生长后期为ADI-W2处理最大,且第二年出现了小幅度的增长,新梢长度在2019年生长中期与生长后期分别增长了4.8%与0.5%。2018年新梢粗细的生长后期与2019年新梢长度的生长中期,仅有ADI-W2与UDI-W3出现了显著差异,其他7个处理间并无显著性差异。

当滴灌方式相同而滴灌量不同时,苹果生长中期和后期的新梢长度、粗度以及LAI大小随滴灌量增加出现先增大后减小的整体趋势,大小规律排序大致为W2>W1>W3。2018年新梢生长后期的长度ADI-W2处理分别比ADI-W1与ADI-W3长9.5%和12.3%。当滴灌方式不同而滴灌量相同,苹果生长中期和后期的新梢长度、粗度以及LAI大小的整体规律为ADI>BDI>UDI,在2019年ADI-W2处理

新梢生长后期的粗度分别比 BDI-W2 与 UDI-W2 多 28.4%、51.1%。生长初期灌水量和滴灌方式以及二者的交互作用对苹果新梢茎粗与长度以及 LAI 没有显著影响;生长中期灌水量和滴灌方式对苹果新梢的长度和粗细均有显著影响,二者的交互作用没有显著影响;仅有 2019 年灌水量和滴灌方式在生长中期对 LAI 有显著影响。根据生长中后期新梢生长长度、茎粗与 LAI 3 个指标整体最优原则分析,确定较优滴灌处理的排序依次为:ADI-W2、ADI-W1、BDI-W2、BDI-W1、ADI-W3、UDI-W2、BDI-W3、UDI-W1、UDI-W3。

### 2.3 不同滴溉处理对苹果树根系分布的影响

常见的根系指标主要包括吸收根长密度、根干重密度,均为根系研究中的重要参数。不同滴灌处理下根系指标随土层深度变化如图 1、图 2 所示,为避免各处理根系累计曲线均呈现所带来的图形辨识度降低,仅对 3 个典型处理的累计曲线进行呈现。图 1 显示苹果树的根系在 0~80 cm 土层中均有分布,但主要分布在 20~60 cm 土层,该土层根系在 2018 年与 2019 年分别占总根系的 56.7%与 66.3%。各处理土层南北侧(NS)与东西侧(EW)的根长密度在不同深度土层差异较大,其中 0~20 cm 与 60~80 cm 土层的根长密度较小,各处理间土层的南北侧和东西侧均无明显差异。ADI 处理的各土层中吸

收根根长密度均随着灌水量的提高出现先增加后减小的趋势,其中 W2 处理最大,而 BDI 处理和 UDI 处理的各土层中根长密度均随着灌水量的上升出现增加的趋势,其中 W1 处理最大。2018 年各处理土层南北侧的吸收根根长密度在 226~513  $\text{m} \cdot \text{m}^{-3}$ ,东西侧的根长密度在 237.7~452.1  $\text{m} \cdot \text{m}^{-3}$ ;2019 年各处理土层的吸收根根长密度较 2018 年增长 9.1%~18.2%。ADI 处理与 BDI 处理的吸收根长密度主要集中在南北侧,而 UDI 处理主要集中在东西侧,分根交替滴灌有明显的生根效果,3 种滴灌方式的吸收根根长密度在南北侧土层排序为 ADI>BDI>UDI,ADI 处理的吸收根根长密度在 2018 年分别比 BDI 处理与 UDI 处理增大 24.6%、66.3%,2019 年增大为 23.6%、64%。ADI-W2 处理土层的吸收根根长密度最大值出现在南北侧的 40~60 cm 的土层(2018 年与 2019 年分别为 820.1、959.9  $\text{m} \cdot \text{m}^{-3}$ ),ADI-W2 处理累计吸收根根长分别在南北侧与东西侧的 40~60 cm 土层中达到 87.9%和 85.8%。由图 2 可知,根干重密度受灌水方式和灌溉定额作用导致在不同侧的土层中出现差异,各处理南北侧土层平均根系干重密度集中在 35.69~93.3  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,东西侧在 39.7~69.3  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。20~40 cm 土层,3 种滴灌方式下根系干密度差异较大,2018 年 ADI 处理土层的根系干重密度在 W2 水平下达到最大值(137.9  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ),

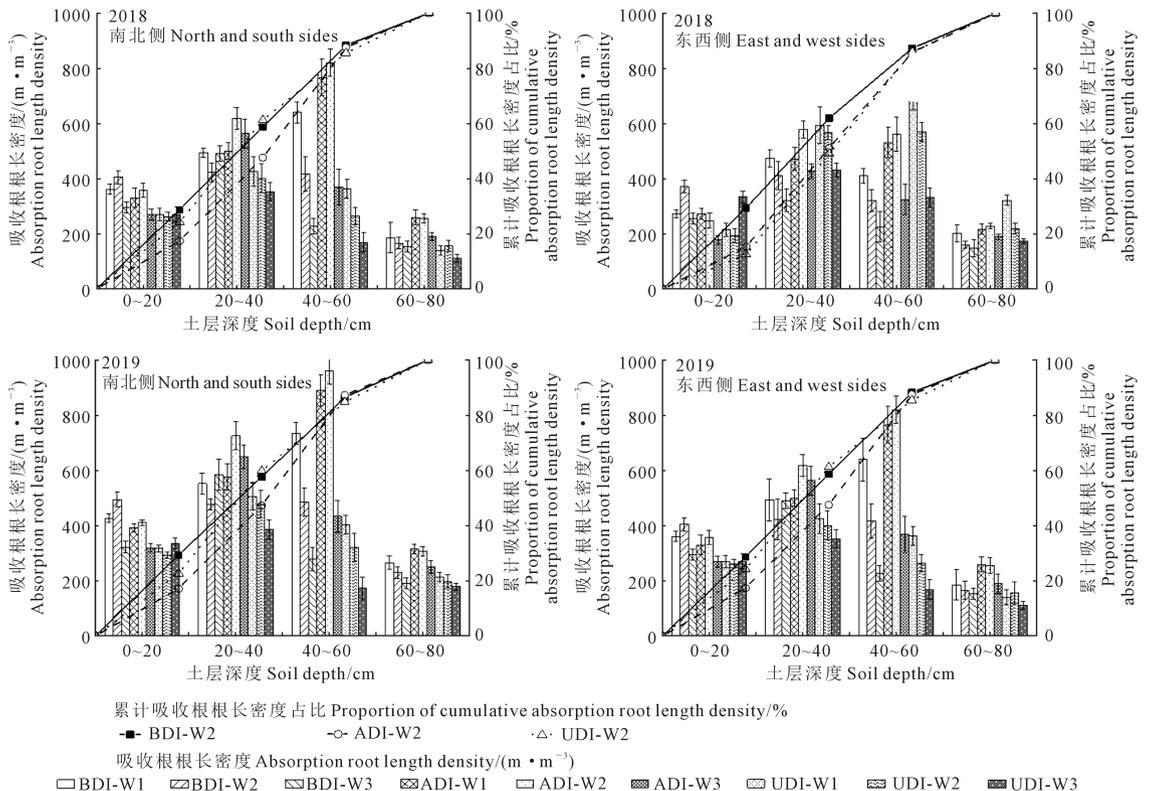


图 1 不同滴溉处理对苹果树吸收根根长密度的影响

Fig.1 Effects of different drip irrigation treatments on absorption root length density of apple trees

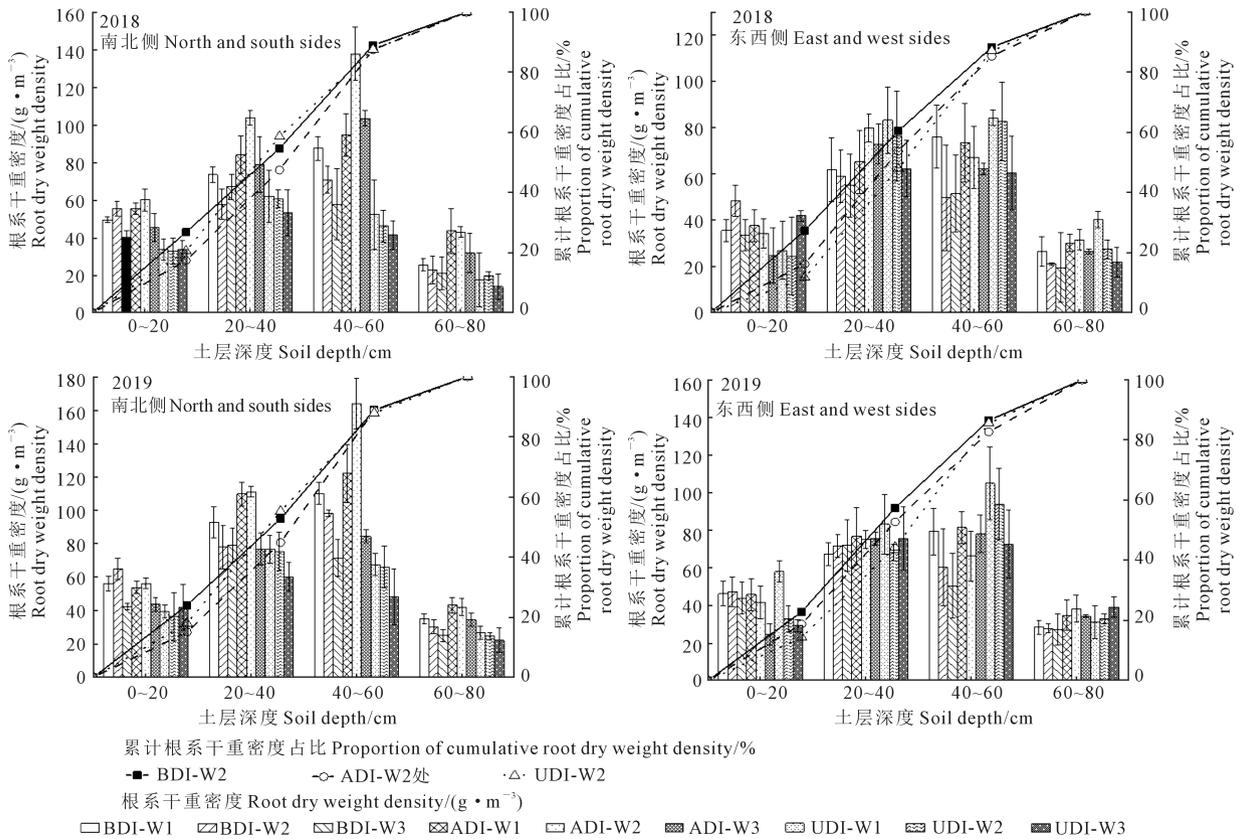


图2 不同滴灌处理对苹果树根系干重密度的影响

Fig.2 Effects of different drip irrigation treatments on root dry weight density of apple tree

较 BDI 处理与 UDI 处理最大值分别增加 31.5% 与 22.1%, 2019 年 ADI-W2 处理土层的根系干重密度为  $163.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。与 UDI 处理相比, W1、W2 和 W3 水平下 ADI 处理土层的根系干重密度在 2018 年分别高 2.1%、29.4% 和 12.6%, 而 UDI-W1 处理的根系干重密度在东西侧土层达到最大值 ( $83.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ )。W1、W2 和 W3 水平下 ADI 处理土层的根系干重密度在 2018 年分别比 UDI 处理高 2.1%、29.4% 和 12.6%。在 2019 年, ADI-W2 处理累计根干重密度在南北侧 20~40 cm 与 40~60 cm 土层中分别达到 44.8% 和 88.7%, 在东西侧土层分别达到 52.8% 和 82.7%。在 0~20、60~80 cm 土层, 各处理土层根系干重密度在不同侧无明显差异。

综上, ADI 处理在适度灌水量下能有效促进根系干物质量和根长的累积, 且其干物质量和根长并非平均分配到各土层, 而是集中分布在南北侧 40~60 cm 土层, 占总根干物质量的 40.01%。本试验结果表明, 分根区交替灌溉主要通过增加土层南北侧 40~60 cm 根系生长来提高总根系干物质量和根长, 为果树生长和产量的形成提供营养基础。根据上述 2 个根系指标在各层土壤中的表现, 从根系指标综合考虑, ADI-W2 处理为最优的滴灌处理。虽然

苹果根系在 0~80 cm 土层中均有分布, 但根系干物质量和吸收根根长均主要分布在 40~60 cm 土层中, 所以在进行灌溉时, 40~60 cm 土层的水分状况应作为重点依据。

#### 2.4 不同滴灌处理对苹果树产量和水分利用效率的影响

分根交替滴灌下苹果产量与灌水量之间的关系不是线性的, 其他两种滴灌方式下产量随灌水量的增加而增加, 灌水量最大的处理并未达到最高产量 (图 3)。不同水分处理下, ADI-W2 处理产量最高, 在 2 a 分别达到  $33\ 010.15$ 、 $43\ 970.08 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 使用单管滴灌会导致产量明显降低, 分根交替滴灌增产效果明显, 2018 年分根交替滴灌在 W2 条件下比 W1 和 W3 分别增产 13.4% 和 21.7%, 2019 年分别增产 4% 和 18.5%。在灌水量为 W2 时, 2018 年分根交替滴灌比 BDI 和 UDI 分别增产 28.3% 和 42.7%, 2019 年分别增产 30.7% 和 54.3%。对于水分利用效率, 除了 UDI-W2 和 UDI-W3, 各处理的 WUE 均达显著水平, 除 ADI 以外, 其他两种滴灌方式 WUE 随灌水量的增加而减少, ADI-W2 达到各处理水分利用效率的最大值 ( $7.12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ), 3 种滴灌方式 WUE 排序为 ADI>BDI>UDI, 分根交替滴灌在

适度的亏缺下能够较大提升水分利用效率。

## 2.5 黄土高原苹果树生长指标与产量之间的关系

由图 4 可知,苹果产量与新梢长度、粗度以及叶面积指数在生长后期均出现了显著的正相关关系,而在生长初期与生长中期相关关系不显著,提高生育后期的新梢长度叶、粗度以及叶面积指数有利于提高产量。随着苹果树的生长发育,叶片会出现衰败等情况,可以通过调节灌溉措施来达到最适叶面积指数。新梢长度在后期达到 45~50 cm、新梢粗度在 10~14 mm 有利于获得较高的产量,2018 年生长中期,随新梢粗度增加,产量先增大后减小,新梢粗度 7 mm 产量达到最大值,可能是因为生长旺盛的中期新梢与果实生长存在竞争关系,控制新梢粗度有利于最终产量的形成。叶面积指数在生长后期与产量的关系为速率逐渐变缓的增加趋势,叶面积指数在 2.1 左右能够保持较高产量,叶面积指数继续增加对产量影响减小。

在不同滴灌条件下,为了进一步明确产量与根

系指标的关系,对不同土层根长密度和根干重密度与产量进行回归分析。由表 5 可知,各处理产量与不同深度的根干重密度与根系长密度呈正相关,在 20~40、40~60 cm 土层具有显著的线性回归关系,一定范围内的根干重密度与根系长密度增加有利于产量的提高。根干重密度比根长密度与苹果产量相关系数更大(40~60 cm 土层中 2 a 分别为  $R^2 = 0.87, R^2 = 0.80$ ),在 0~20 cm 土层,各处理产量与根干重密度及根系长密度无显著相关性,这可能是由于表层土壤根系分布处理间无差异所致。在 60~80 cm 土层,根系指标与产量没有显著的相关性,可能是该层根系分布比较少所致。

综上所述,土层 20~60 cm 苹果根长密度和根干重密度与苹果产量呈正向线性相关。20~60 cm 土层根系的占比较大,因此对本试验滴灌布置而言,合理控制水分湿润深度,对促进该层的根系生长、增加产量十分有利。

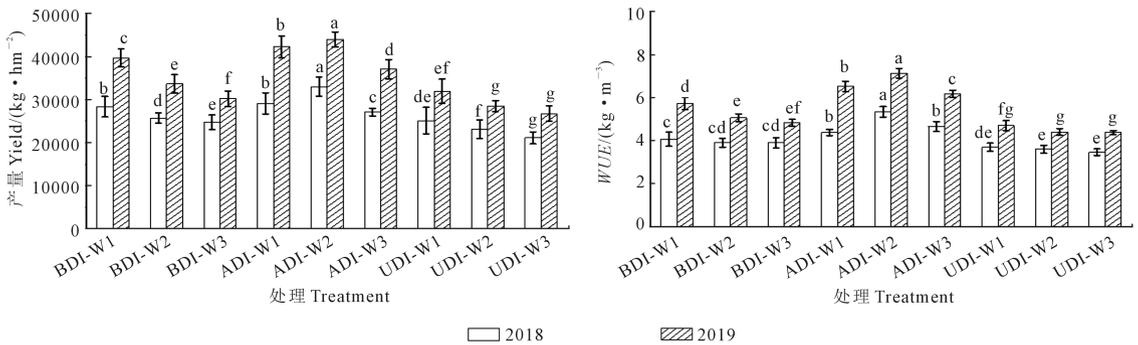


图 3 2018 年和 2019 年滴灌处理下苹果产量和水分利用效率 (WUE)

Fig.3 Fruit yield and WUE under drip irrigation in 2018 and 2019

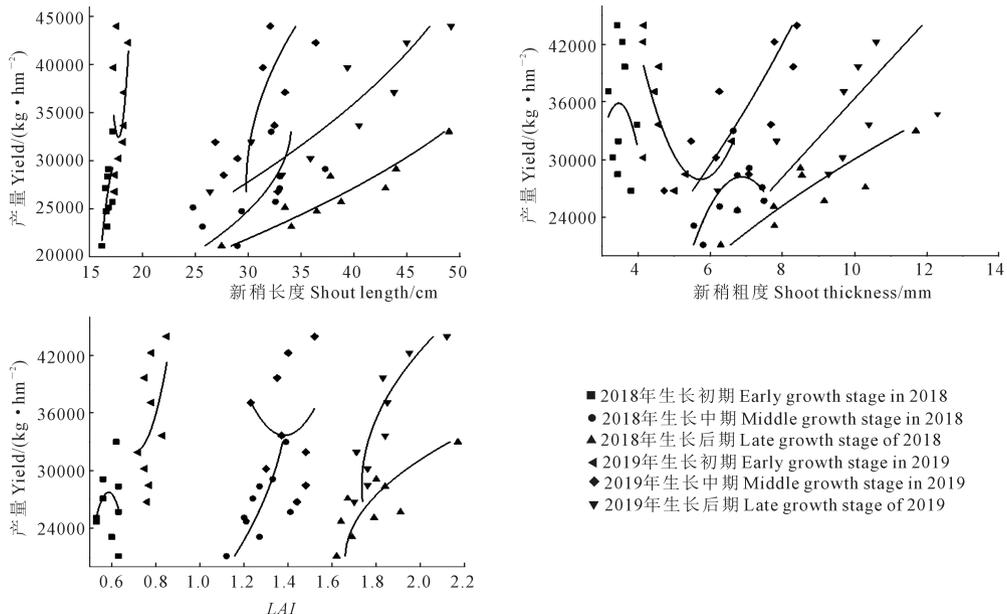


图 4 2018 年和 2019 年苹果树不同生长时期各生长指标与产量的关系

Fig.4 Relationship between growth indexes and yield of apple trees in different growth periods in 2018 and 2019

表5 苹果树产量与不同土层深度的根系生理指标间的相关关系

Table 5 Correlation between apple tree yield and root physiological indexes in all directions of soil depth

年份 Year	深度 Depth /cm	根干重密度 Root dry weight density /(g·m <sup>-3</sup> )		根系长密度 Root long density/(m·m <sup>-3</sup> )	
		回归方程		回归方程	
		Regression equation	R <sup>2</sup>	Regression equation	R <sup>2</sup>
2018	0~20	y = 247.52x + 16583	0.31	y = 12.926x + 22678	0.03
	20~40	y = 268.34x + 7668	0.67*	y = 43.551x + 5722.4	0.62*
	40~60	y = 195.42x + 12289	0.87**	y = 17.122x + 18786	0.64*
	60~80	y = 438.82x + 14635	0.33	y = 69.514x + 12952	0.12
2019	0~20	y = 382.18x + 17828	0.26	y = 24.36x + 27249	0.05
	20~40	y = 623.71x - 14463	0.80**	y = 50.446x + 7546.9	0.45
	40~60	y = 309.25x + 8806.1	0.79**	y = 27.197x + 20981	0.69*
	60~80	y = 346.89x + 23986	0.19	y = 53.755x + 22075	0.18

### 3 讨论

本研究发现苹果树在4个生长阶段的耗水量依次为 III>II>I>IV,这与以前的研究结果相似<sup>[19]</sup>。通常苹果树生长的 I 阶段光强度较弱,主要是叶片发芽和初期生长,耗水量较低;在 II 阶段,果树叶片进入快速生长的初期,耗水量增加;苹果树进入生长的 III 阶段,温度较高,太阳辐射强烈,果实快速膨大,蒸腾蒸发加强,耗水量进一步升高;苹果树生长的 IV 阶段,由于降雨增加,同时苹果树的生长减缓,叶片蒸腾功能变弱,水的消耗量很低<sup>[20]</sup>。研究表明,在不同的生长阶段适度的水分亏缺处理能有效减少蒸散<sup>[21]</sup>,与 W2 和 W3 处理相比,W1 处理的水分消耗更高,但 W3 不利于产量的形成,特别在 III 阶段没有足够的水分补给,抑制果实的膨大,所以 W3 处理下果实的产量较其他处理低,这一研究已得到证实<sup>[22]</sup>。这可能是由于缺水使树冠的生长受到抑制,叶面积减小,从而降低蒸腾作用。同时对于不同滴灌方式而言,ADI 处理在各灌水梯度下的耗水量更小,能够利用部分根系产生的根源信号 ABA 来调节气孔保持最适开度,减少蒸腾耗水而节水,同时还可以减少每次灌水间隙裸间土壤湿润面积,减少裸间蒸发损失<sup>[23]</sup>,这一现象在温度较高的 III 阶段更为突出。

本研究发现苹果的根系分布在 0~80 cm 土层,吸收根根长密度和根干重密度随土壤深度呈先上升后下降的趋势,且主要分布在 20~60 cm 土层内,这与孙文泰等<sup>[24]</sup>的研究结果类似。孙文泰等<sup>[24]</sup>对陇东旱塬苹果的根系分布研究表明,根系主要分布在距树干 0~90 cm 范围内的 20~60 cm 土层中,以 20~40 cm 根系最为密集。

根系分布取决于滴灌滴头的出水位置与出水量,根系功能不仅取决于根系生物量与吸收根长,还取决于它的空间分布<sup>[25]</sup>。于坤等<sup>[26]</sup>采用的穴贮

滴灌,水分运移更深,根系随水分下沉更深,这样会使水分向下运移得更深,水分对根系分布具有引导作用,同样根也会向下深扎,这就导致了根系主要分布的深度不同。宋小林等<sup>[27]</sup>对黄土高原苹果树根系研究发现,根系分布与水分分布相关,果树根系的生长和根系在不同湿润土层的分配比例与灌水湿润的土体范围有关,根系的生长有明显的趋水特征。周青云等<sup>[28]</sup>采用根系分区交替滴灌,研究发现未灌水根区根系受到一定程度的水分胁迫后,刺激根系的吸水补偿功能,同时也会增强根系的生长。本试验中分根交替处理根系发育较 BDI 处理与 UDI 处理要优。而 ADI 处理在南北侧根系发育优于东西侧,交替的滴灌方式主要湿润南北侧的土壤,使得南北侧具有更适宜的根系生长水分条件,促进该侧根系发育。当植株遭受水分亏缺时,最早是根系受到影响,土壤水分降低会直接导致根吸收的水分含量减少<sup>[29]</sup>,从而影响到根系和地上部生物量的生长发育<sup>[30]</sup>。由于灌水量的减少,导致水分在土壤中的分布量变小,果树的根系分布范围也就受到了抑制<sup>[31]</sup>。当灌水量为 W3 时,滴灌只能湿润上部土层,下部根系得不到水分供应,长期处于水分亏缺状态,从而抑制了下部土层根系的生长,此现象对于未滴灌侧更为明显,ADI-W3 处理东西侧根系发育受到明显抑制。W2 比 W3 水分向下运移更深,可以减少上层根系冗长,促进苹果根系向深层分布,增加根系对深层土壤水分的利用,因此 ADI-W2 处理下土层南北侧根系在土壤中(40~60 cm)分布更加密集;而 ADI-W1 处理并不有利于促进生根,同时土壤水分含量高,通气性差也会影响根系发育,因此 ADI-W2 处理根系发育最佳。本研究通过对苹果产量与各层根系干质量密度和根长密度进行回归分析,得出在 20~60 cm 土层苹果根系干质量密度和根长密度在一定范围内增大有利于苹果产量的提高。

不同滴灌处理除了会直接影响地下生物量,同样也影响地上生物量如新梢的生长,遭受水分亏缺影响冠层的发育。徐巧等<sup>[32]</sup>对干旱山地苹果树生长的研究表明,整个新梢生长期,水分供应对新梢的加长生长影响较大,适宜的水分供应新梢平均长达 28.7 cm,比极度干旱条件下(13.4 cm)提高了 114.2%。宋凯等<sup>[33]</sup>对苹果幼树的研究发现,分根交替灌溉处理(APRI)对苹果幼树的新梢粗度增长量在水分处理期间也表现为逐渐增加的趋势,合理的滴灌方式加上适度的灌水量对果树新梢长度、新梢茎粗以及叶面积指数各指标会产生积极的影响。

这与殷飞等<sup>[34]</sup>,李泽霞等<sup>[35]</sup>的研究结果相似,唐龙等<sup>[36]</sup>对苹果研究也得出相似结论。本试验分根交替与灌水量对苹果树生理指标产生的影响大小跟其他人研究出现小幅度差异,这可能是由于土壤类型不同,土壤类型、质地等会导致不同地区的苹果树对滴灌方式与灌水量的响应不同,同时与品种、树体大小、树龄都有关系。苹果产量与新梢长度、粗度以及叶面积指数在生长后期均出现了显著的正相关关系,新梢长度在后期达到 45~50 cm、新梢粗度在 10~14 mm 能保持较好的产量,新梢与叶面积指数的增大有利于提高树体储存营养水平,促进苹果发育,提高产量。

其他处理随亏缺程度加重产量有一定的减少,ADI 未减产,这一点表明 ADI 自我调节重新分配养分的能力较其他处理要优。ADI 在相同的灌水量下能保证更高的产量,这一点得益于分根交替处理下根系通过产生缺水信号物质 ABA 来调节气孔实现最优开度,在保持净光合速率适度下降的情况下使蒸腾速率显著下降,最终提高水分利用效率<sup>[37]</sup>。另一方面 ADI 在适度灌水量下的根系发育较好,根系干重密度和根长密度在主要吸水层远高于其他两种滴灌方式,有着较好的根系吸水条件保证了 ADI 在果实成熟期的产量。

## 4 结 论

本研究以陕北黄土高原山地苹果树为研究对象,通过大田试验,研究了不同滴灌模式对苹果树生长、产量、耗水量以及水分利用效率的影响,主要结论如下:

1) 研究发现苹果树在 4 个生长阶段的耗水量依次为 III>II>I>IV,2018 年和 2019 年 III 阶段的用水量分别占整个生长季节总用水量的 66.7% 和 66.1%,远高于其他生长阶段。对于不同滴灌方式,ADI 处理与 BDI 处理、UDI 处理相比节水效果显著。

2) 分根交替促进新梢和叶面积的生长,ADI-W2 处理苹果树的新梢茎粗与长度以及 LAI 在生长中期与生长后期最大,2019 年该处理的新梢长度在生长后期为 49.27 cm, LAI 最大为 2.12,新梢粗度则为 11.81 mm。新梢长度与粗度随水分亏缺程度的加重先增大后减小,W3 处理水分亏缺一定程度上抑制了苹果树新梢与叶面积生长,生长后期的新梢长度和粗度与产量有显著的正相关性。

3) 苹果根系分布在 0~80 cm 土层中,其中主要集中分布于 20~60 cm 土层中,该层的吸收根长密度在 2018 年与 2019 年分别占总根系的 56.7% 与

66.3%。分根交替滴灌促进土层吸收根长密度与根系干重密度的增长,分根交替滴灌对南北侧 40~60 cm 土层的根系促进作用最明显,2018、2019 年 ADI-W2 处理根系干重密度在南北侧 40~60 cm 土层分别达到最大值(137.9 g·m<sup>-3</sup>,163.7 g·m<sup>-3</sup>),吸收根长密度在南北侧 40~60 cm 土层达到最大值(820.1 m·m<sup>-3</sup>,959.9 m·m<sup>-3</sup>)。灌水量增加会使根系分布下移,其中 20~60 cm 土层根干重密度与根系长密度与产量有显著的相关性。

4) 分根交替滴灌在适度水分亏缺下能够大大提升果实产量与水分利用效率,ADI-W2 处理的产量最高,水分利用效率也最大。综合考虑,双管分根交替滴灌,灌水量为 W2 可以作为陕北山地苹果滴灌条件下灌水的最佳模式。

## 参 考 文 献:

- [1] 刘威宏,王延平,韩明玉,等.根区滴灌对干旱山地苹果树生长发育和结实的影响[J].灌溉排水学报,2016,35(7):40-45.
- [2] 张林森,李雪薇,王晓琳,等.根际注射施肥对黄土高原苹果氮素吸收利用及产量和品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(2):421-430.
- [3] 漆栋良,胡田田,吴雪,等.适宜灌水施肥方式利于玉米根系生长提高产量[J].农业工程学报,2015,31(11):144-149.
- [4] 李天星.陕西苹果补灌效应及灌溉需水量空间分布规律研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [5] 赵娣,王振华,张金珠,等.不同灌溉方式和灌水量对北疆加工番茄生理生长及产量的影响[J].水土保持学报,2018,32(6):175-185.
- [6] 刘水,李伏生.不同水氮条件下灌溉方式对玉米干物质和氮钾利用的影响[J].生态学报,2014,34(18):5249-5256.
- [7] 杜太生,康绍忠,胡笑涛,等.果树根系分区交替灌溉研究进展[J].农业工程学报,2005,(2):172-178.
- [8] 胡笑涛,王振昌,马黎华.番茄果实及茎秆微变化对分根区交替灌溉的响应[J].农业工程学报,2014,30(12):87-95.
- [9] 韩小虎,王雷,王钰馨,等.分根交替灌溉对桃树~(13)C 分配和光合能力的影响[J].核农学报,2016,30(6):1218-1226.
- [10] Jaouhari N E, Abouabdillah A, Bouabid R, et al. Assessment of sustainable deficit irrigation in a Moroccan apple orchard as a climate change adaptation strategy[J]. The ence of the Total Environment, 2018, 642(15):574-581.
- [11] 赵娣,王振华,李文昊,等.分根区交替灌溉对膜下滴灌加工番茄根系特征及产量的影响[J].核农学报,2018,32(10):2069-2079.
- [12] 焦润安,张舒涵,李毅,等.生草影响果树生长发育及果园环境的研究进展[J].果树学报,2017,34(12):1610-1623.
- [13] 刘贤赵,刘德林.连续亏缺灌溉与根系分区灌溉对苹果幼树根系生长的影响[J].中国生态农业学报,2010,18(6):1199-1205.
- [14] 宋磊,岳玉苓,狄方坤,等.分根交替灌溉对桃树生长发育及水分利用效率的影响[J].应用生态学报,2008,19(7):1631-1636.
- [15] DU T S, Kang S Z. Alternate furrow irrigation: a practical way to improve grape quality and water use efficiency in arid northwest China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(3):509-519.
- [16] 刘贤赵,宿庆,孙海燕.根系分区交替灌溉不同交替周期对苹果树生长、产量及品质的影响[J].生态学报,2010,30(18):4881-4888.