

# 晋西黄土区苹果园生长季土壤水分动态

冯金超<sup>1</sup>, 党宏忠<sup>1</sup>, 王檬檬<sup>2</sup>, 田大栓<sup>3</sup>, 姚源<sup>4</sup>, 却晓娥<sup>1</sup>, 吴丽丽<sup>1</sup>

(1.中国林业科学研究院 荒漠化研究所, 北京 100091; 2.内蒙古农业大学 沙漠治理学院,

呼和浩特 010010; 3.中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4.宁夏枸杞产业发展中心, 银川 750001)

**摘 要:**为了揭示黄土残塬沟壑区苹果园剖面土壤含水量的变化,对晋西黄土区苹果园的可持续发展提供科学依据,试验以 17 龄苹果树果园土壤为研究对象,通过 ECH<sub>2</sub>O 土壤水分探头对 50,100,150,200,250,300 cm 处深度土壤体积含水量进行一个生长季的定位观测,分析了土壤水分的空间分异及动态变化。结果表明:(1) 6 个层次土壤含水量差异显著,平均值分别为:22.27%,21.38%,18.92%,17.94%,10.60%,9.55%,表现出自上而下降低的趋势。(2) 观测期内,150 cm,200 cm,250 cm,300 cm 深度土壤含水量对降雨无响应,且 100 cm 层次土壤含水量对降雨的响应远远滞后于 50 cm 层次。随着土层深度的增加,土壤体积含水量表现出自上而下依次降低的趋势;降雨仅能影响 100 cm 以内深度的土壤含水量;晋西黄土高原残塬沟壑区苹果园土壤在 200 cm 的土层深度以下已有土壤干化现象产生。

**关键词:**黄土高原; 土壤水分; 干层; 降雨量

中图分类号:Q142; Q948; S154

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)01-0139-07

## Dynamics of Soil Moisture in Apple Orchards in the Growing Season in the Loess Region of Western Shanxi

FENG Jinchao<sup>1</sup>, DANG Hongzhong<sup>1</sup>, WANG Mengmeng<sup>2</sup>,

TIAN Dashuan<sup>3</sup>, YAO Yuan<sup>4</sup>, QUE Xiaoe<sup>1</sup>, WU Lili<sup>1</sup>

(1.Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2.College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University,

Huhot 010018, China; 3.Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4.Ningxia Wolfberry Industry Development Center, Yinchuan 750001, China)

**Abstract:** To investigate the temporal variations of soil moisture and provide scientific basis for the sustainable development of apple orchards in the gully area in Loess Plateau, we monitored the soil moisture at the depths of 50 cm, 100 cm, 150 cm, 200 cm, 250 cm, 300 cm by ECH<sub>2</sub>O during the growing season in an apple orchard in Shanxi Province on the Loess Plateau. The results show that there are significant differences in soil moisture contents among the depths of 50 cm, 100 cm, 150 cm, 200 cm, 250 cm and 200 cm, with the average values of 22.27%, 21.38%, 18.92%, 17.94%, 10.60% and 9.5%, respectively; the precipitation can affect a maximum of soil water content at 100 cm depth; during the study period, the response of soil water content at 100 cm depth to precipitation far lagged behind that at 50 cm depth. In addition, the soil moisture at the depths of 150 cm, 200 cm, 250 cm and 300 cm had no significant responses to the precipitation; the soil moisture showed the decreasing trend with the increase of the soil depth. The precipitation could only affect soil moisture within 100 cm depth. At the 200 cm depth, the soil dessication had occurred in the apple orchard in the gully area in western Shanxi Province on the Loess Plateau.

**Keywords:** Loess Plateau; soil water content; dry layer; rainfall

收稿日期:2019-03-01

修回日期:2019-03-21

资助项目:国家重点研发计划“黄土残塬沟壑区水土保持型景观优化与特色林产业技术及示范(2016YFC0501704)”

第一作者:冯金超(1984—),男,山东省泰安市人,博士,助理研究员 主要研究方向:氮水循环。E-mail:fengjinchao@caf.ac.cn

通信作者:党宏忠(1971—),男,甘肃省定西市人,博士,副研究员 主要研究方向:水土保持与荒漠化防治。E-mail:hzdang@caf.ac.cn

土壤水分是陆地水资源的一个重要组成部分,尤其在干旱半干旱区域,如国内黄土高原地区,地下水埋深在距离地表 30—100 m 的土层中,无法参与土壤水分循环<sup>[1]</sup>,是制约植物生长的关键性因子,显得尤为重要。20 世纪末,得益于退耕还林政策,超过两千万  $\text{hm}^2$  的耕地被恢复林地,旨在恢复生态系统的历史环境条件<sup>[2-5]</sup>。随着经济的发展,单纯的人工林已无法满足当地的经济需求,在加强水土保持林建设的同时,营造经济林成为了提高当地收入的必然选择<sup>[6]</sup>。黄土丘陵沟壑区地处中国西北部,是典型的旱作农耕地,也是我国重要的特色果品生产基地。因其高海拔,较大的昼夜温差以及充足的光照有利于苹果糖分积累和果实着色;同时,降雨量相对较低,气候干燥,病虫害小,环境污染较轻;黄绵土土层深厚疏松,土壤通透性强,适宜于苹果树的生长。因此,该区域 20 世纪 80 年代开始种植苹果树,90 年代苹果种植面积迅速增加,目前已成为全国优质苹果的主要生产区之一<sup>[7]</sup>。该地区 80% 的山地果园都是旱地雨养果园,水是作物增产的主要限制因子<sup>[8-9]</sup>。该区水资源极缺,年降雨量小,且年内分布不均。由于不合理的人工植被配置等因素,导致该地区土壤干层现象严重<sup>[10]</sup>。广泛发育的土壤干层加剧了土壤退化,降低了植被生产力,阻断了土壤水分的入渗,使土壤水库的调节作用减弱,改变了该地区的生态水文进程<sup>[11-14]</sup>。研究表明,黄土塬区存在高龄果园深层干化的现象,影响深度可达 10 m 甚至更深<sup>[15]</sup>。目前,在黄土高原,关于植被与土壤水分的关系,众多学者已经对天然植被和人工植被在不同尺度、地形和土地利用方式等方面开展了大量工作<sup>[8-14]</sup>,而对于经济林水分动态研究,仍有待于进一步加强。因此,本研究在 2017 年生长季(4—10 月),对晋西黄土丘陵沟壑区苹果园土壤水分进行连续定位观测,揭示土壤含水量的动态规律及对降雨的响应,有利于对黄土塬区苹果园的可持续发展提供科学依据以及确定合理的人工干预方式。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究地点位于山西省吉县雷家庄,地理位置为  $110^{\circ}35'E$ ,  $36^{\circ}04'$ ,属于黄土高原残塬丘陵沟壑区,平均海拔 1 100 m。气候为暖温带大陆性半干旱气候,多年平均降水量为 522.8 mm,2017 年为欠水年。降水年内分布不均,主要集中在 6—9 月,约占全年降水量的 70%,最大年降雨量 828.9 mm(1956 年),最小年降雨量 277.7 mm(1997 年)。年平均气温  $10^{\circ}\text{C}$ ,超过  $10^{\circ}\text{C}$  的年均积温  $3\,357.9^{\circ}\text{C}$ ,无霜期平均 172 d。研究样地果园土壤为黄土,黄土母质呈微碱性, pH

值在 8.4 左右。果园面积  $3\,300\text{ m}^2$ ,果树为 17 a 龄红富士,栽植密度  $4\text{ m}\times 6\text{ m}$ 。

### 1.2 研究方法

试验选择山西吉县有代表性的东城乡雷家庄村果园作为研究样地,样地内土壤质地均一,无黏土层、母质层等相对不透水层。试验以 17 龄苹果树果园土壤为研究对象,并于 2017 年 6 月在样地表层用环刀( $100\text{ cm}^3$ )取原状土,每个层次取 3 个重复,用以测定土壤田间持水量。土壤田间持水量测定采用威尔科克斯(Wilcox)法也称环刀法,方法如下:

用环刀在样地上采取原状土,同时在同一土层上取些散状土,带回室内。将原状土放入水中,有孔盖的一端向下,且水不没环刀顶,浸一昼夜。散状土风干后通过孔径为 1 mm 的土筛,装入环刀。然后打开装有湿土的环刀的有孔盖子,连同滤纸一起放在盛风干土的环刀上。经过 8 h 吸水后,从环刀中取 15~20 克原状土土样,用称重烘干法,测定其含水量。三次重复,求平均值,即为该层的田间持水量  $W$ ,其计算公式为:

$$W = (W_w - W_d)W_d \times 100\%$$

式中: $W_w$  为湿土重; $W_d$  为干土重。

同时,在距表层 50,100,150,200,250,300 cm 处各安装 1 个  $\text{ECH}_2\text{O}$  土壤水分探头,长期动态监测土壤体积含水量。数据线外套有塑料软管,以防止动物啃噬影响数据获取。水分监测系统于 2017 年 3 月初布设,经过 1 个月的试运行,消除采集系统安装过程中对土壤的扰动后,开始进行正式数据采集。数据采集时间从苹果树开始生长到果实采摘为止(2017 年 4 月—10 月底),土壤水分数据采用 EM50 数据采集器采集,采集间隔为 1 h。土壤气象要素的监测均采用 SQ2020 数采器采集数据,采集间隔为 2 min。

### 1.3 数据分析

土层  $k$  在时间尺度的土壤体积含水量的平均值  $\bar{\theta}_k$  的计算公式如下:

$$\bar{\theta}_k = \frac{1}{N_j} \sum_{j=1}^{N_j} \theta_{j,k}$$

式中: $j$  为监测时间; $k=50\text{ cm}, 100\text{ cm}, 150\text{ cm}, 200\text{ cm}, 250\text{ cm}$  和  $300\text{ cm}$ 。

土层  $k$  在监测期内土壤体积含水量的标准差( $s$ )计算公式如下:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_k (\bar{\theta}_{k,j} - \bar{\theta}_k)^2}{N_j - 1}}$$

同时,我们引入了变异系数  $C_V$ (标注差与平均值的比例),公式为:

$$C_V = \frac{S}{\bar{\theta}}$$

2 结果与分析

2.1 研究区降水特征

降雨量是黄土区土壤水分年际变化的主要影响因素,在枯年土壤水分变异较大,在丰水年土壤水分变异程度变低<sup>[16]</sup>。研究区 2017 年 4 月 27 日至 11 月 1 日总降雨量 317.4 mm(图 1),24 h 降雨量≤5 mm 43 次,共降雨 36.8 mm,占试验期总降雨量的 11.6%;24 h 5—10 mm 的事件 11 次,共降雨 77.6 mm,占试验期总降雨量的 24.4%;24 h 降雨量≥10 mm 的事件 13 次,共降雨 203 mm,占试验期总降雨量的 64.0%。试验期间,最大日降雨量为 22.4 mm,最大一次降雨事件的累积降雨量为 59.4 mm,出现在 7 月末。7 月、8 月份作为降雨最多的季节,其降雨特征见表 1。其中,出现降雨的天数为 19 d,最大日降雨量出现在 7 月 26 日,达到 24 mm;超过 10 mm/h 降雨的雨强有 4 次,占总时降雨时长的 4.9%,介于 5 mm/h 到 10 mm/h 之间的降雨有 7 次,占总时降雨时长的 8.5%,小于 5 mm/h 的降雨为 71 次,占总时降雨时长的 86.6%。

表 1 7 月、8 月降雨特征

序号	日期	降雨量/ mm	1 h 雨强/mm		
			最大值	最小值	平均值
1	2017-7-05	12.60	10.20	2.40	6.30
2	2017-7-06	1.80	0.80	0.20	0.60
3	2017-7-15	8.60	8.60	8.60	8.60
4	2017-7-17	5.00	4.20	0.20	1.30
5	2017-7-21	16.40	16.40	16.40	16.40
6	2017-7-25	0.80	0.80	0.80	0.80
7	2017-7-26	24.00	7.40	0.20	2.64
8	2017-7-27	12.20	5.80	0.20	1.55
9	2017-7-28	22.40	6.40	0.20	2.24
10	2017-8-06	3.20	1.60	0.20	0.64
11	2017-8-07	0.20	0.20	0.20	0.20
12	2017-8-15	18.60	16.20	0.20	6.20
13	2017-8-18	0.80	0.80	0.80	0.80
14	2017-8-20	1.80	0.80	0.20	0.45
15	2017-8-21	0.80	0.40	0.20	0.27
16	2017-8-22	20.40	10.20	0.20	3.40
17	2017-8-26	4.40	1.40	0.20	0.67
18	2017-8-28	8.00	2.40	0.20	0.91
19	2017-8-30	4.80	1.40	0.20	1.00

在监测时间段内,苹果的物候期包括花期(4 月底—5 月中旬),幼果期(5 月中旬—6 月底),果实膨大期(7 月初—8 月底),果实着色期(9 月),果实成熟期(10 月)5 个时期。各物候期表现出明显的差异:最高降雨量出现在果实膨大期,即 7 月、8 月份,达到 167 mm;最低值出现在果实着色期,仅有 10.8 mm;花期、幼果期、果实成熟期分别为 26.6 mm,56.4 mm 和 56.6 mm。

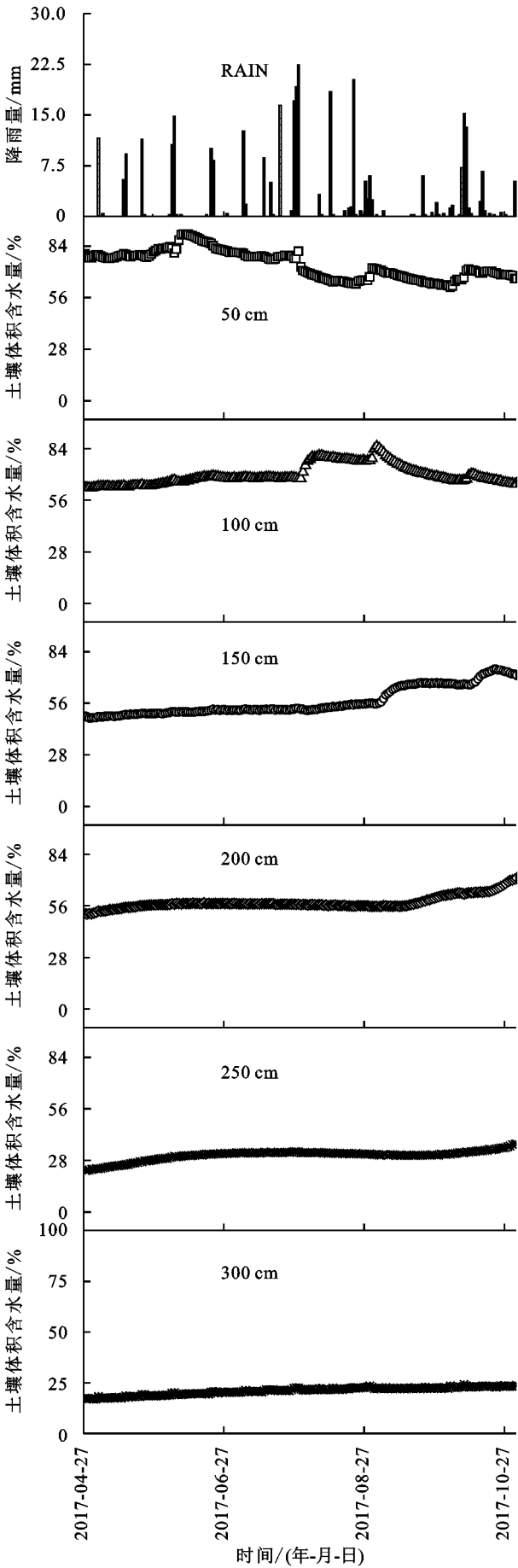


图 1 观测期降雨量与不同土层土壤体积含水量

## 2.2 果园土壤水分空间变异特征

果园的土壤水分容易受到土壤结构、根系分布以及降雨和蒸散发的影响,因此具有很强的空间异质性。充分把握土壤水分在垂直方向上的变异特征有助于理解土壤水分对地表植物生长和发育的调节功能以及对土壤水分储量预测预报均具有一定积极意义<sup>[17]</sup>。50 cm 以下各层的土壤含水量表现出极显著的相关关系( $p < 0.05$ ),表明较深层次土壤含水量主要受到临近上层土壤含水量的影响;最上层 50 cm 土壤体积含水量与其相邻的 100 cm 土壤体积含水量并不存在显著的相关性关系( $p > 0.05$ ),这可能是由于 50 cm 深度土壤含水量更容易受到降雨影响,波动较为剧烈所导致。

不同土壤层次土壤体积含水量的空间变异如图 1 所示。在整个监测时期内,土壤体积含水量的空间变异明显。50 cm 深度土壤平均体积含水量最高,范围从 18.92% 到 27.94%,平均值为 22.26%,300 cm 深度土壤平均体积含水量最低,范围从 8.14% 到 10.55%,平均值为 9.55%。在整个监测时期,土壤体积含水量表现出随着深度增加依次降低的趋势。徐巧的研究<sup>[18]</sup>也得出,30—220 cm 土层,土壤含水量随土层深度的增加而降低,220—800 cm 土层土壤含水量随土层深度增加变化趋势平缓,表现出比较稳定的变化过程。50 cm 以下各层的土壤含水量表现出极显著的相关关系( $p < 0.05$ ),表明较深层次土壤含水量主要受到临近上层土壤含水量的影响;最上层 50 cm 土壤体积含水量与其相邻的 100 cm 土壤体积含水量并不存在显著的相关性关系( $p > 0.05$ ),这可能是由于 50 cm 深度土壤含水量更容易受到降雨影响,波动较为剧烈所导致。

同时,我们引入了  $C_v$  用来描述整个时期土壤含水量的变异程度。 $C_v$  越大,土壤含水量变化越剧烈, $C_v$  越小,土壤含水量越稳定<sup>[19]</sup>。根据 Nielsen 等的划分标准<sup>[20]</sup>,土壤水分变异系数  $C_v \leq 0.1$  时表示该层土壤水分变异情况为弱变异, $C_v$  介于 0.1,1 之间表示变异情况为中等变异,大于 1 为强变异。不同层次土壤含水量在所在深度范围内的变异系数均小于 0.1,均属于弱变异。50 cm 深度的  $C_v$  值最高,表明此层次水分的变异程度最高。这是由于表层土壤受降雨影响较大所导致,这与毕华兴等的研究结果一致<sup>[21]</sup>,其通过地统计学研究发现,在晋西黄土区表层土壤具有较高的变异程度。

## 2.3 果园土壤水分时间变异特征

2017 年 4 月 27 日—11 月 1 日果园不同层次土壤体

积含水量随时间的动态变化表明,50 cm 深度土壤含水量在试验期间有 4 次明显的波动,波动时间与强降雨时间相对应。100 cm 深度土壤含水量出现一次波动,而下面四层土壤含水量基本保持稳定。这表明,50 cm 深度土壤含水量是受降雨影响最强的土层,随着土层深度的增加,降雨对土壤含水量的影响减弱;而 150 cm 及以下土壤含水量基本不受降雨影响(图 1)。

在整个生长季,雨养果园 0~3 m 的贮水量随着时间表现出一定的波动趋势(图 2)。花期降雨量少,缺少水分的补给,而同时气温回升较快,土壤的蒸发潜力较大,水分补给少而损失较多,因此土壤贮水量最低,仅有 476.1 mm。幼果期降雨量增加幅度较大,相应的土壤的贮水量出现明显的增加。果实膨大期为降雨最为丰沛的 7 月、8 月份,贮水量达到最大值,为 513.8 mm。进入果实着色期后,降雨量有明显的减少,此时贮水量也出现了回落。果实成熟期后,温度降低,蒸腾和蒸发作用都减小,土壤水分散失减少,而同期保持了较高的降雨量,土壤贮水量有一定程度的回升。总体而言,在整个生长季,0~3 m 土壤贮水量表现出先增加后减少,在生长季末期又逐步增加的趋势。

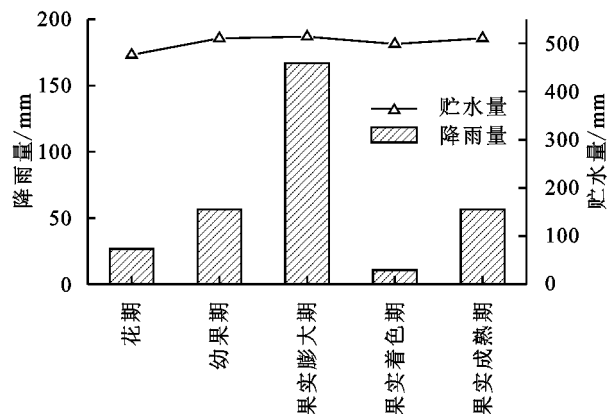


图 2 不同物候期降雨量及不同土层体积含水量

## 3 讨论

### 3.1 果园不同土层土壤含水量特征

在土壤表层,土壤含水量受到植被蒸腾和土壤蒸发的作用更容易受到影响,植被的蒸腾和土壤的蒸发能够消耗 60% 的降雨。基于此原因,在干旱半干旱地区,土壤表层的土壤含水量通常较低。黄土高原有强烈的蒸发散潜力,这将导致持续的低含水量。

由于土壤表层的含水量能够被降雨补给,表层土壤含水量往往高于深层;另一方面讲,深层的土壤很难受到降雨的影响。而深层土壤的含水量受到土壤根系的影响,导致土壤含水量要低于表层。孙蕾等发现<sup>[22]</sup>,雨季过后,土壤含水量表现出上层较大,下层



远远低于上层的趋势,深层呈现干燥化。黄土高原的降雨事件可以粗略的分为两类:高频率低雨量的降雨和低频次高雨量的降雨。前者对于土壤含水量基本没有影响,其只能影响到表层 1 cm 的土壤,因此,土壤含水量的变化主要由较大的降雨事件所引起。降雨事件越强,它所能影响到的土壤含水量的深度越深。随着土层深度的增加,土壤含水率对降雨的响应逐层减弱,表现为滞后时间逐层延长、土壤水分增量逐层减小、土壤含水率下降速率逐层降低<sup>[6]</sup>。在半干旱的黄土高原,由于黄土层的厚度不同,土壤水分的空间分布与时间变异都是独一无二的。李佳畅长期监测发现<sup>[23]</sup>,自然降雨很难下渗补充到 200 cm 以下土层。在本研究中,一个生长季的数据表明,晋西黄土丘陵残塬沟壑区雨养果园 100 cm 以下土层含水量没有明显的变化,这说明降雨的入渗并未超过 100 cm,这与曹扬等的研究结果一致<sup>[24]</sup>。我们认为,一个生长季的连续含水量监测,能够反映深层土壤的稳定的含水量的情况,尽管有待进一步的数据验证。

### 3.2 典型降雨事件对土壤体积含水量的影响

降雨是黄土高原雨养果园土壤水分的唯一来源,在黄土丘陵沟壑区,储存于深层土壤中的水分,对于维系植物的生存具有重要意义<sup>[25]</sup>。研究表明,黄土高原地区降雨能够渗透到 100—300 cm 深度的土壤中,在丰水年,甚至能达到 500 cm 深度。在黄土丘陵沟壑区,由于其独特的地形条件,降雨能够渗透到的深度一般不超过 200 cm。本研究选取了四次典型的降雨事件,分析了其对土壤各层次含水量的影响(图 3)。

第一次降雨事件发生在 6 月 4 日,历时 14 h,累积降雨量 22.6 mm。降雨开始前,50 cm,100 cm,150 cm,200 cm,250 cm,300 cm 深度的土壤体积含水量分别为 23.06%,20.67%,18.36%,18.09%,10.22%,9.29%。降雨开始以后,各层土壤体积含水量均没有显著的变化,随着时间的推移,最上层 50 cm 处的体积含水量开始逐步升高并达到最大值 25.72%。以小时作为横坐标,体积含水量作为纵坐标,其线性拟合方程为  $y = 0.031x + 22.10$  ( $R^2 = 0.853$ ,  $p < 0.01$ ),100 cm 及以下层次土壤体积含水量基本无变化。第二次降雨事件发生在 7 月 27 日,历时 41 h,累积降雨量 58.6 mm。降雨开始前,自上而下六层深度的土壤体积含水量分别为 22.74%,21.30%,18.69%,17.88%,11.00%,10.13%。本次降雨的历时与降雨量都远远超过第一次,其土壤体积含水量的响应时间与强度均远远强于第一次降雨,在第 46 h 时,土壤体积含水量就出现明

显的拐点,然后迅速升高,达到最高值 27.94%。此次降雨量也影响到 100 cm 深度的土壤体积含水量,在降雨开始 90 h 时,此层的土壤体积含水量也出现明显的拐点,进而达到最大值 22.68%。150 cm 及以下土层体积含水量无明显变化。随着深度的增加,土壤含水量对降雨的响应时间变长,响应的强度减弱,这与吴胡强等的研究结果一致<sup>[14]</sup>。第三次降雨事件发生在 8 月 27 日,历时 24 h,累积降雨量 16.40 mm。降雨开始前,自上而下六层深度的土壤体积含水量分别为 22.27%,22.60%,19.89%,17.81%,10.59%,9.70%。此次降雨雨强弱,降雨历时短,仅对 50 cm 层次土壤含水量产生影响,且存在滞后现象,在降雨开始后 60 h 才出现拐点。第四次降雨事件发生在 10 月 8 日,历时 40 h,累积降雨量 39.20 mm。降雨开始前,自上而下六层深度的土壤体积含水量分别为 20.42%,20.77%,19.54%,17.72%,10.70%,9.47%。此次降雨雨量较强,降雨历时时间长,其对 50 cm 和 100 cm 层次土壤含水量均产生影响,且滞后时间短,两层土壤水分对降雨的响应在降雨开始后 40 h 即出现拐点。

### 3.3 土壤干层

土壤干化现象最早发现于 20 世纪 60 年代,经调查研究表明,土壤干层普遍存在于黄土高原的各个地区<sup>[26]</sup>。土壤干层是黄土高原半干旱和半湿润环境条件下形成的一种特殊的水文现象,是环境旱化和土壤干化的结果。林草植被过度耗水情况下,土壤含水量处于深层次亏缺状态,接近甚至达到凋萎湿度,这种水分亏缺经过雨季降水可得到部分补偿,得不到补偿的土层土壤湿度长期处于一种较稳定的低水平上,进而形成土壤干层。Liu 等通过两年的连续观测发现<sup>[27]</sup>,不同林龄的苜蓿地土壤干层出现的深度不同,表现出随着林龄的增长深度先增加后降低的趋势,,但干层均未在 300 cm 内出现。Yan 等通过对近 69 篇发表的文献(73 个观测点的 1 149 组观测数据)进行分析发现<sup>[28]</sup>,耕地的土壤干层厚度最小,平均含水量最高。Li 等通过长期的定位研究发现<sup>[29]</sup>,土壤干层的发生范围在 50—260 cm 左右。Zhang 等选取了由南到北 860 km 的样带<sup>[30]</sup>,结果表明,在所调查的 86 个地点中有 66 个地点出现土壤干层,没有出现土壤干层的点主要集中在农业灌溉用地中,干层的体积土壤含水量为 2.54%。李玉山认为<sup>[25]</sup>,在旱作农区也存在土壤干层,只是表现不如林草植被下的干层强烈。

对于黄土高原苹果园干层现象,也有一些相关研

究,在不同区域的苹果园中,土壤干层现象均普遍发生,干层发生深度存在差异<sup>[31-34]</sup>。程立平和刘文兆对陕西省长武黄土塬区 0~20 m 土壤剖面水分分布特征进行调查与分析发现<sup>[31]</sup>,18 年苹果园地在 10 m 以上土层发生了中度和轻度为主的土壤干燥化现象。曹裕等测定并分析了陕西洛川旱塬 11,15,20,25 和 43 龄苹果园地 0—15 cm 土层土壤湿度<sup>[32]</sup>,结果表明:随着树龄增加,果园土壤湿度总体呈降低趋势,有补灌果园土壤尚未发生干燥化,而旱作果园均发生了轻度或中度干燥化。李瑜琴研究发现<sup>[33]</sup>,2~4 m 土层土壤含水量介于 8%~10%之间,土壤干层会有较弱的发育。曹裕研究表明<sup>[34]</sup>,苹果树蒸腾耗水强烈,地面蒸发大于降水补给,在黄土丘陵区部分果园已经出现土壤干燥化现象。王延

平以安塞和米脂田间持水量的 50%作为果园土壤干化的标准<sup>[18]</sup>,发现两地果园 1.4 m 以下土层干化严重。根据我们的试验结果,在观测期内,50 cm,100 cm,150 cm,200 cm,250 cm,300 cm 深度的土壤体积含水量的平均值为 22.27%,21.38%,18.92%,17.94%,10.60%,9.55%,表现出自上而下依次降低的趋势。由本试验测定的田间持水量 23.8%可知,200 cm 以下土壤含水量已低于其 50%的数值。且 250 cm 深度的土壤含水量 10.60%与 300 cm 深度的土壤含水量 9.55%相差不大,表明其不仅处于水分亏缺状态,而且已稳定于一个相对较低的水平。因此,我们认为,对于晋西黄土高原丘陵区苹果果园土壤,200 cm 以下的土层深度处已经有土壤干化的现象发生。

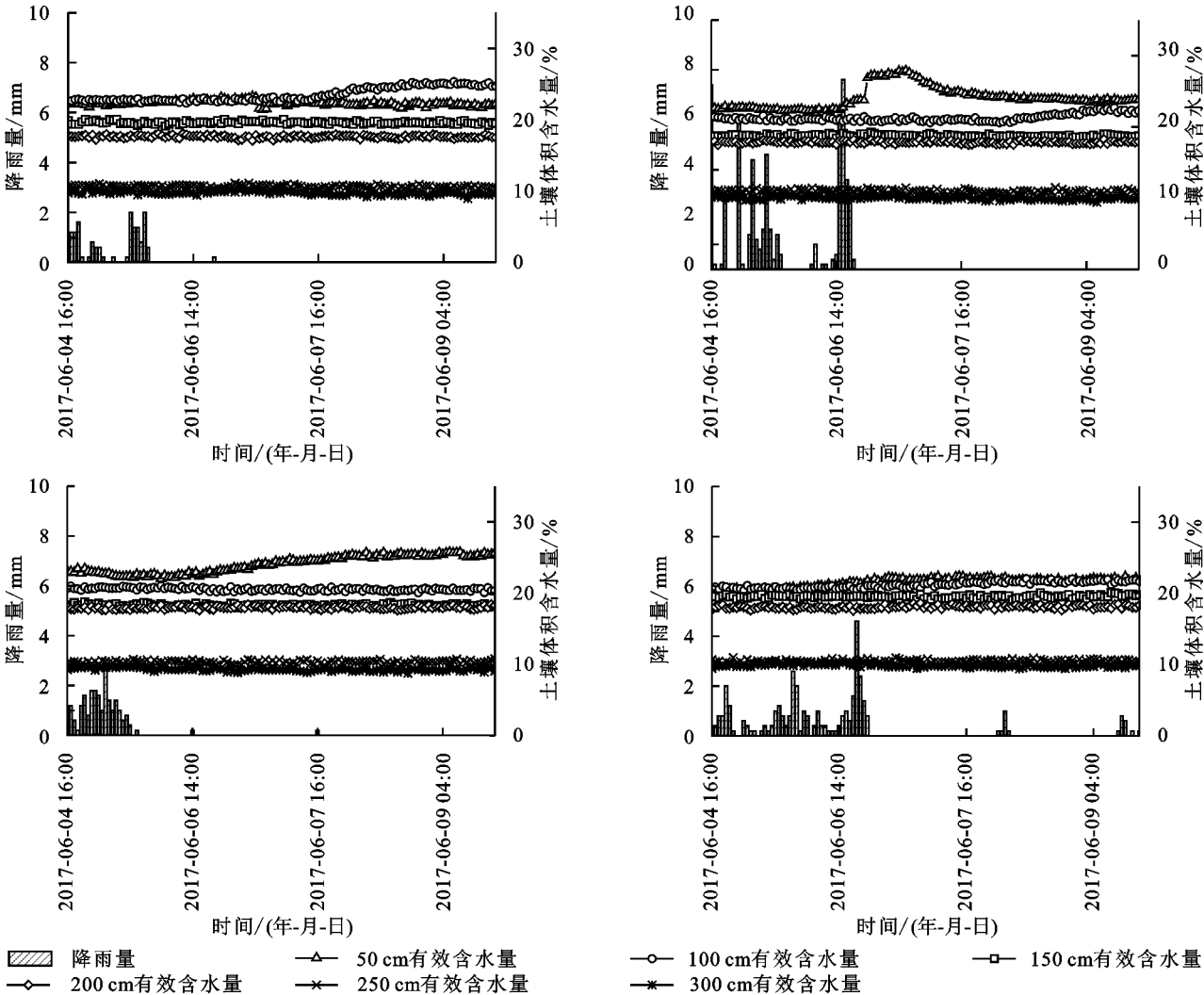


图 3 典型降雨事件对土壤水分的影响

## 4 结论

(1) 在此区域,降雨能影响到的土层深度仅为 100 cm,100 cm 深度以下土壤含水量对降雨无响应,100 cm 深度以内,随着深度的增加,土壤含水量对降

雨的响应时间越长,存在明显的滞后现象。

(2) 随着土层深度的增加,土壤体积含水量呈现出逐渐降低的趋势。在 300 cm 处,土壤体积含水量为 9.55%,与 250 cm 深度处的 10.60%相近,说明其已达到相对稳定状态;同时,此含水量也处于相对亏

缺的状态。因此,在晋西黄土丘陵沟壑区的雨养果园中,200 cm 以内的土层已经有土壤干化的现象产生。

#### 参考文献:

- [1] 杨文治.黄土高原土壤水资源与植树造林[J].自然资源学报,2001,16(5):433-438.
- [2] Shi H, Shao M. Soil and water loss from the Loess Plateau in China[J]. Journal of Arid Environments, 2000,45(1): 9-20.
- [3] Liu J, Li S, Ouyang Z, et al. Ecological and socioeconomic effects of China's policies for ecosystem services [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2008,105(28):9477-9482.
- [4] Shanguan Z P. Soil desiccation occurrence and its impact on forest vegetation in the Loess Plateau of China [J]. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2007,14(3):299-306.
- [5] LüY H, Zhang L W, Feng X M, et al. Recent ecological transitions in China: greening, browning, and influential factors [J]. Scientific Reports, 2015 (5): 8732, DOI:10.1038/srep08732.
- [6] 茹豪,张建军,张琦,等.晋西黄土区雨养果园土壤水分动态及对降雨的响应[J].水土保持学报,2014,28(1): 36-42.
- [7] 郑双科,司炳成,张志强,等.黄土塬区苹果园降雨入渗机制[J].应用生态学报,2017,28(9):2870-2878.
- [8] 郭小平.晋西黄土区集雨补灌果园耗水特征及补灌效应研究[D].北京:北京林业大学,2006.
- [9] Han X, Tsunekawa A, Tsubo M, et al. Effects of land-cover type and topography on soil organic carbon storage on Northern Loess Plateau, China[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Plant Soil Science, 2010,60(4):326-334.
- [10] 王志强,刘宝元,张岩,等.不同植被类型对厚层黄土剖面水分含量的影响[J].地理学报,2008,63(7):703-713.
- [11] Bakker J P, Berendse F. Constraints in the restoration of ecological diversity in grassland and heathland communities[J]. Trends in Ecology&Evolution, 1999,14 (2):63-68.
- [12] Zedler J B. Progress in wetland restoration ecology[J]. Trends in Ecology&Evolution, 2000,15(10):402-407.
- [13] Breshears D D, Cobb N S, Rich P M, et al. Regional vegetation die-off in response to global-change-type drought[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2005,102(42):15144-15148.
- [14] 吴胡强,邵永昌,庄义琳,等.南京城郊麻栎林坡面土壤体积含水率与侧向流对降雨响应[J].浙江农林大学学报,2014,31(5):683-689.
- [15] 包睿,邹养军,马锋旺,等.种植年限及密度对渭北旱塬苹果园深层土壤干燥化的影响[J].农业工程学报,2016,32(15):143-149.
- [16] 王栓全,岳宏昌,王伟.黄土丘陵沟壑区不同土地类型的土壤水分特性[J].干旱地区农业研究,2009,27(6): 93-96.
- [17] 王云强,邵明安,刘志鹏.黄土高原区域尺度土壤水分空间变异性[J].水科学进展,2012,23(3):310-316.
- [18] 徐巧.黄土高原丘陵区干旱山地苹果树需水规律研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [19] 王延平,韩明玉,张林森,等.洛川苹果园土壤水分变化特征[J].应用生态学报,2012,23(3):731-738.
- [20] Nielsen D R, Bouma J. Soil spatial variability:Proceedings of a workshop of the ISSS(Int. Society of Soil Science)and the SSSA(Soil Science Society of America) [R]. Las Vegas, USA,1985.
- [21] 毕华兴,李笑吟,刘鑫,等.晋西黄土区土壤水分空间异质性的地统计学分析[J].北京林业大学学报,2006,28 (5):59-66.
- [22] 孙蕾.渭北地区果园土壤质量演变趋势[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2010.
- [23] 李佳旻.黄土高原山地苹果园土壤水分动态及蒸散研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [24] 曹扬,赵忠,渠美,等.刺槐根系对深层土壤水分的影响[J].应用生态学报,2006,17(5):765-768.
- [25] 李玉山.黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响[J].生态学报,1983,3(2):91-101.
- [26] 王力,邵明安,侯庆春.黄土高原土壤干层初步研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2001,29(4):34-38.
- [27] 刘沛松,贾志宽,李军,等.宁南山区紫花苜蓿(Medicago sativa)土壤干层水分动态及草粮轮作恢复效应[J].生态学报,2007,28(1):183-191.
- [28] Weiming Y, Lei D, Yangquanwei Z, et al. The characters of dry soil layer on the Loess Plateau in China and their influencing factors[J]. Plos One, 2015,10(8):e0134902.
- [29] 李田湑,王俊,刘文兆,等.增施氮肥对黄土高原旱作冬小麦农田土壤干层动态的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(4):152-155,160.
- [30] Zhang C, Shao M, Jia X. Spatial continuity and local conditions determine spatial pattern of dried soil layers on the Chinese Loess Plateau[J]. Journal of Soils and Sediments, 2017,17(8):2030-2039.
- [31] 程立平,刘文兆.黄土塬区土壤水分分布特征及其对不同土地利用方式的响应[J].农业工程学报,2011,27 (9):203-207.
- [32] 曹裕.黄土高原中部旱作苹果园地深层土壤水肥特征与水分生产力模拟研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [33] 李瑜琴,赵景波,LIYu-qin,等.西安南郊曲江丰水年苹果林地土壤干层恢复[J].陕西师范大学学报:自然科学版,2005,33(4):99-102.
- [34] 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.