

## 黄土高原半干旱区降雨入渗试验研究

白盛元<sup>1</sup>, 汪有科<sup>1,2</sup>, 马建鹏<sup>3</sup>, 汪星<sup>1</sup>, 周玉红<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100;  
3. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 黄土高原地区地下水资源缺乏, 降雨是土壤水的唯一补给来源。为研究降雨补给地下水过程, 在黄土丘陵半干旱区的米脂试验站, 对野外 10 m 土柱土壤水进行了定位观测, 分析自然降雨下土壤水分入渗深度和补给量。结果表明: 自动监测显示单次降雨量为 5.2 mm(小雨)时, 11 h 后入渗达到最大深度 0.3 m, 此深度以下几乎没有变化; 单次降雨量为 15.8 mm(中雨)时, 4 d 内影响深度可达 0.6 m; 单次降雨量为 33.6 mm(大雨)时, 8 d 内 1.2 m 处土壤含水量增长明显, 1.4 m 以下没有变化。水分循环主要在 0.8 m 以内的蒸发带, 该层土壤水分易被蒸发, 0.8 m 以下随着深度增加, 土体含水率变化逐渐滞后, 增幅逐渐减小。受多种因素影响, 入渗过程持续时间不一。覆盖处理观测期土壤水分补给量显示: 覆膜 > 石子 > 树枝 > 裸地, 补给量与降雨量呈线性关系, 覆膜补给量上升最大。

**关键词:** 降雨; 土壤水; 入渗; 补给; 覆盖

**中图分类号:** S152.7 **文献标志码:** A

## Experimental study on rainfall infiltration in semiarid region of the Loess Plateau

BAI Sheng-yuan<sup>1</sup>, WANG You-ke<sup>1,2</sup>, MA Jian-peng<sup>3</sup>, WANG Xing<sup>1</sup>, ZHOU Yu-hong<sup>1</sup>

(1. College of Water Resources and Architecture Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;  
2. National Engineering Research Center for Water Saving Irrigation at Yangling, Yangling, Shaanxi 712100, China;  
3. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chines Academy of Sciences & Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The water resource has becoming limited in the Loess Plateau area, and rainfall is the only supply for soil water. In order to study the process of groundwater recharging, regional observation was conducted on soil water of a soil column at 10m depth in Mizhi experimental station. Infiltration depth and amount of groundwater feed were analyzed. The results showed that that by automatic monitoring, the moisture content of soil layers within 0.3 m changed obviously eleven hours after a single precipitation reached 5.2 mm (light rain), while that below 0.3 m exhibited almost no changes. When a single precipitation was 15.8 mm (moderate rain), within four days, the resulting depth could be up to 0.6 m. When a single precipitation was 33.6 mm (heavy rain), the moisture content at 1.2 m soil layer changed obviously and that at 1.4 m became slightly increased in eight days. Water cycle was mainly conducted over 0.8 m of the evaporation zone where soil moisture became evaporated easily. With the increase of soil depth below 0.8 m, variations of moisture content were small and the amplitude level gradually went decreased. Due to influences from multiple factors, the durations of infiltration varied. During the observation period, soil moisture recharging by cover treatment showed that the resulting effects were in the order of the follows: plastic mulching > gravel > branch > bareland. The recharging under each treatment had a linear correlation with rainfall amount. The recharging reached maximum with plastic mulching.

**Keywords:** rainfall; soil water; infiltration; recharge; mulch

黄土高原地区地下水埋藏深, 灌溉水源贫乏, 自然降雨补给是土壤水的主要来源。严重的土壤侵蚀和频繁干旱并存, 如何增加降雨入渗、合理利用土壤

水资源是该地区生态环境建设和农业可持续发展的关键<sup>[1-2]</sup>。目前, 学者们针对降雨土壤水的入渗进行了一系列研究, 并取得了丰富成果。李毅等<sup>[3]</sup>在人

收稿日期: 2015-05-13

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B04、2013BAD20B03); 林业公益性行业科研专项资助项目(20140470)

作者简介: 白盛元(1989—), 男, 河南泌阳人, 研究生, 硕士, 研究方向为水资源高效利用。E-mail: bai1989@126.com。

通信作者: 汪有科(1956—), 研究员, 博士生导师, 主要从事作物高效用水和水土保持研究。E-mail: gjzywk@vip.sina.com。

工模拟降雨条件下,进行了间歇降雨和多场次降雨黄土坡面土壤水分入渗研究,结果表明在外部条件(如雨强、土壤质地、间歇历时、容重等)一致时,土壤入渗率的大小主要受土表含水量的影响。蒋定生等<sup>[4]</sup>、杨文治等<sup>[1]</sup>报道了黄土高原土壤水分入渗速率的水平与垂直变化规律。刘战东等<sup>[5]</sup>在模拟降雨下,对麦田土壤剖面水分变化及入渗量进行了分析研究。郭忠升等<sup>[6]</sup>采用中子管研究了柠条林降雨入渗深度及入渗量。陈洪松等<sup>[7]</sup>利用室内人工降雨试验研究了土壤初始含水率对坡面降雨入渗、湿润锋运移及土壤水分再分布规律的影响。刘汗等<sup>[8]</sup>采用径流-入流-出流法和双环入渗法研究了初始含水率和降雨强度对土壤入渗性能的影响。宋亚新等<sup>[9]</sup>分析了灌溉条件下入渗补给过程的基本特征。徐学选<sup>[10]</sup>等对黄土土柱的优先流进行了分析,探讨了雨水补给地下水的主要机制。李贵玉<sup>[11]</sup>研究了黄土丘陵区不同地类土壤的入渗性能,认为表层土入渗能力的提高对整个土壤入渗能力的提高至关重要。张常亮等<sup>[12]</sup>、李萍等<sup>[13]</sup>使用自动监测系统对10 m深黄土水分迁移规律进行了研究,雷廷武等<sup>[14]</sup>探讨了坡地土壤入渗量的测定方法,王孟本等<sup>[15]</sup>、黄明斌<sup>[16]</sup>、李玉山等<sup>[17]</sup>研究了林地最大入渗深度。自然降雨下土壤水补给量主要受雨量、历时等因素影响<sup>[18]</sup>。

一直以来,土壤水分入渗都是学者们研究的热点问题,微观尺度的降雨入渗大都集中在室内模拟研究,而野外条件下微观尺度的降雨入渗研究较少。本研究所采用的野外大型土柱,通过防水薄膜对土柱边壁衬砌,避免周围根系消耗土壤水分,对土壤水分进行定位观测,并从降雨的时效性等方面分析土壤水入渗过程,以便了解黄土高原区土壤水分补给、存储规律,为提高降雨利用效率,改善生态环境提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验区选择在陕北米脂县银州镇(109.47°E, 37.18°N)远志山红枣栽培试验基地进行,该区域属于典型的黄土丘陵沟壑区,位于黄土高原水蚀风蚀交错带上,年平均温度为8.8℃,≥10℃积温3281℃,日照时数为2372.7h,无霜期160~170d。年平均降雨量451.6mm,最大年降雨量704.8mm,最小年降雨量186.1mm。试验地为一水平阶地,土壤为黄绵土,剖面发育不明显,土质均一,渗透性能良好,土壤容重为1.2~1.35g·cm<sup>-3</sup>,pH为8.6,海拔高度约900m。试验小区为8个直径0.8m、深10

m土柱,间距1.6m,土柱均为人工开挖后内壁用防水塑料膜与周围土层隔开,避免水分向土柱内扩散和周围植被根系对水分的影响,回填时每隔0.5m踩实一次,确保土壤的密实度,上边界为20cm高混凝土井圈,8个土柱分别设置为2个D1(石子)、2个D2(树枝)、2个P(薄膜)、一个T(裸地)和一个A(自动监测)处理,石子、树枝、薄膜、裸地等处理土壤水分数据由中子水分仪测得,自动监测处理由CS650型土壤水分探头测得。石子、树枝的覆盖层厚度均为30cm。

### 1.2 试验方法

气象资料来源于BLJW-4小型气象站,海拔890m。实验地在气象站西南,相距50m。野外测定项目包括降雨量、土壤水分。水分测定分中子仪和自动监测两种。中子水分仪测定法:在每个土柱中央安置长10m中子仪铝合金套管,采用CNC100型智能中子水分仪测定剖面土壤水分。测定前对中子仪进行了标定,标定方程为: $y = 73.533x + 103.33$ 。测定时,每20cm记录一次,测定深度为0~10m。使用中子水分仪对土壤水分进行定期观测,从5月中旬开始,每隔10d测定一次。自动监测法:在土柱内埋设cs650型土壤水分探头,其工作原理是通过测量土壤的介电常数得到土壤体积含水量。量程为:5%~50%,体积含水量精密度:<0.05%,传感体积:7800cm<sup>3</sup>,较大的传感体积可以提高测量结果的准确度。考虑到水分下渗后上部土层的含水率变化较下部明显,故按上密下疏的原则布置水分探头。从地表以下0.1m开始,1m内间距为0.1m,1~3m内间距为0.2m,3~6m内间距0.5m,6~10m内间距1m,共计30个水分探头,布置如图1,由CR1000数据采集器每隔30min记录一次数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 自动监测数据可靠性分析

为检验土壤水分计的精确度,在试验布设完一周后,按照水分探针埋设规则进行铝盒及装袋取土,用烘干法测定质量含水率和容重,换算出体积含水率,此时水分计读取的数据表示如图2。由结果可见,两种方法测定的含水率随深度变化趋势基本一致,其拟合方程为: $y = 1.039x - 1.901$ ( $R^2 = 0.988$ ),可见水分计测得数据与土壤水分分布具有相同规律,试验中自动监测的真实数据由该方程换算得出。水分计测量数值小于烘干法,可能是由于土壤的相对介电常数不仅与水分含量有关,亦与水分子的存在形态有关。从两条曲线总的趋势可以看出含水率随深度的变化特点,1.2m以内土层含水率高,平均

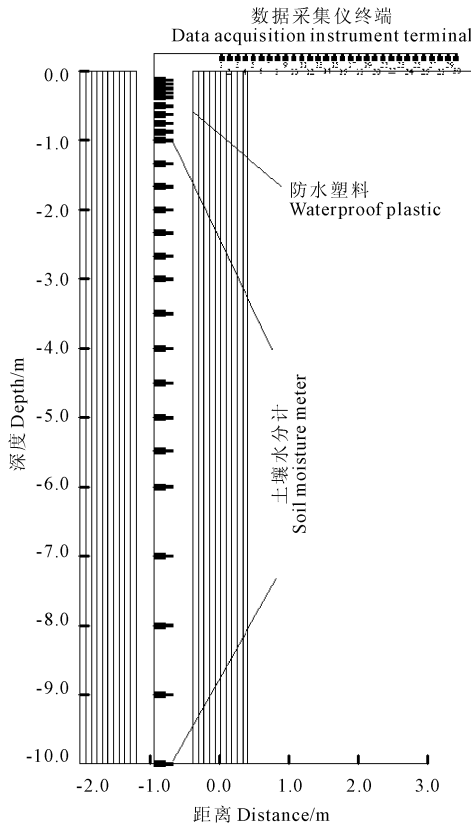


图 1 土壤水分计布置

Fig. 1 Arrangement of soil moisture sensors

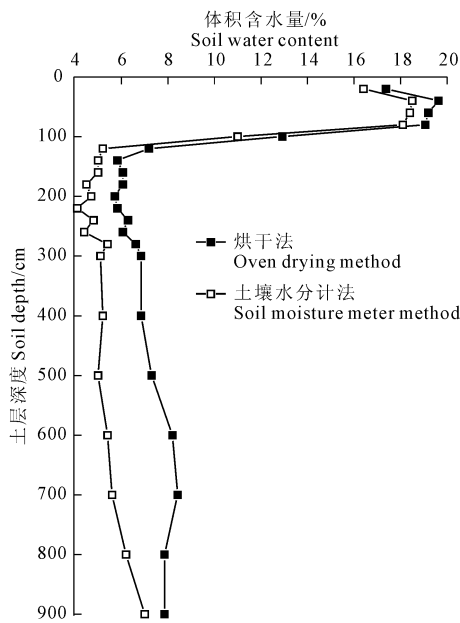


图 2 两种方法测得的土体含水率

Fig. 2 Soil moisture levels measured by two methods

体积含水率为 17.6%，该部分土壤中水分波动较大，这是间歇性降雨和蒸发的结果，试验布设完成后试验区即经历了一场较大强度降雨，土柱内土体初始含水率较低，从深层土壤含水率也可以看出，1.2 ~ 10 m 土层平均体积含水率仅为 6.8%，未受本次降

雨影响，而 1.2 m 以上土体由于此次降雨形成了一个浸润带，浸润带下移的同时，也有一部分水分通过蒸发外排，形成水分在垂向不均匀的特点。

### 2.2 典型降雨与入渗时效性

天然状态下土壤水分入渗深度与立地条件（土壤质地和结构等）、降雨强度以及降雨量有关。在易变的环境中（立地条件确定），天然状态下土壤水分入渗取决于降雨强度和降雨历时。通过对不同时间段剖面土壤水分状况的观测和分析，可以确定一定时期内土壤入渗深度。降雨过后，在土壤剖面的上层易形成“高含水”土层。这个“高含水”土层的土壤水分运动表现为两种相反方向的变化：一方面由于表土蒸发使该土层的土壤含水量逐步下降。与此同时，在高含水土层的下部分（湿润锋前沿），土壤含水量和水势较高，而下部相邻的较深土层土壤含水量和水势较低，水势差引起土壤水分的下移，使较深层次土壤含水量逐渐升高，湿润锋下移，入渗深度增加。依据中国气象局资料：日降雨量在 10.0 mm 以下称为小雨，10.0 ~ 24.9 mm 为中雨，25.0 ~ 49.9 mm 为大雨。试验选取了能代表三种不同强度的单次降雨进行了分析，且降雨前一定时期内无降雨发生，以保证初始土壤为干燥状态，数据来源于试验地小型气象站，分别为 8 月 17 日降雨量为 5.2 mm，8 月 27 日为 15.8 mm，9 月 16 - 17 日为 33.6 mm。土壤水分数据来源于自动监测系统，8 月 17 日的小雨持续了约 1 个小时，土壤水分数据表示如图 3(c)，表层 10 cm 土层处水分从 16.3% 上升到了最大 17.2%，之后开始降低，0.2 m 处水分波动幅度仅有 0.2%，0.3 m 处有微弱变化，以下未发生变化，说明小雨只能引起表层土壤水分的短暂上升，而在地表空气流动或日照下迅速散失。8 月 27 日的中雨从下午 17:30 开始持续了约 2 个半小时，自动监测装置记录的每天早上 10:00 数据表示如图 3(a)，降雨后第二天，0.2 m 内土层水分快速上升，0.3 ~ 0.4 m 在缓慢增长，0.5 m 以下保持平衡。48 小时后，表层水分由于蒸发作用，呈直线下降，而此时 0.6 m 水分才开始缓慢增加，并在 120 小时后达到最大值 17.7%，较降雨前增加了 0.3%，0.7 m 以下水分未发生变化，可见此次中雨影响深度达到了 0.6 m。9 月 16、17 日连续两天降了一场大雨，由于此次雨后第八天再次出现降雨天气，为避免受到影响，选取了 8 天的试验数据进行分析，表示如图 3(b)。此次降雨前读取的数据显示 0.4 m 处水分最高达到了 18.4%，这是由于本次降雨前的一段时间内无有效降雨，气温较高，表层土壤水通过蒸发排泄作用散失，可见此时蒸发作用层在 0.4 m 左右，而 0.4 m 以

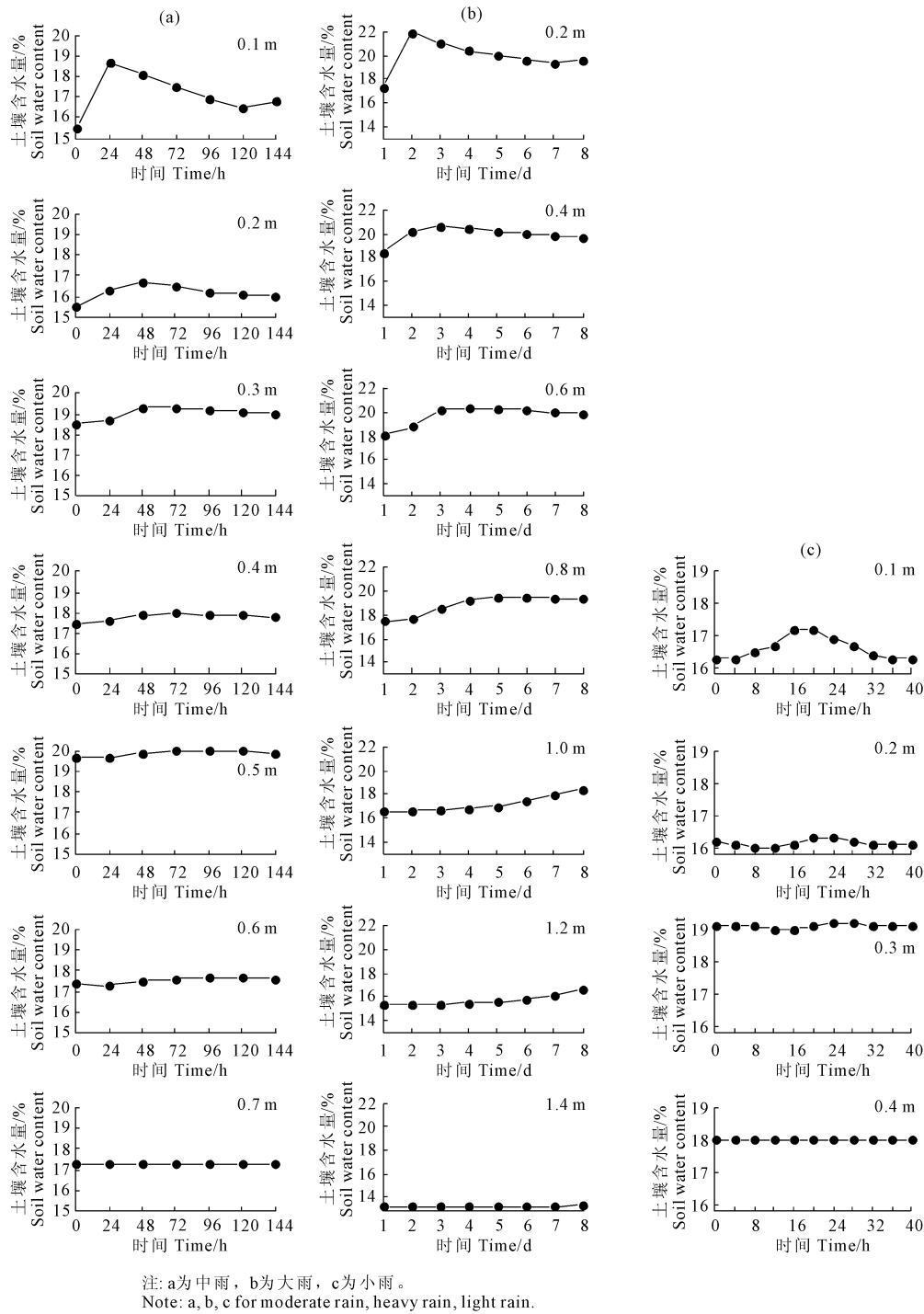


图 3 典型降雨土壤水分变化

Fig. 3 Variations in soil moisture under the typical rainfall

下水分按照深度呈递减趋势。图 3(b) 中降雨过后, 影响范围内土体含水率骤升, 越向深部越缓, 第二天 0.2 m 处含水率增加值达到了 4.6%, 0.4~0.6 m 范围有明显的上升趋势, 0.8 m 处有微弱上升, 而 0.8 m 以下几乎不变。随着时间的推移, 在蒸发及入渗的共同作用下发散型零通量面快速形成, 零通量面以上水分向上移动, 以下水分向下移动, 表现为雨后第三天 0.4 m 深度处水分减小, 而 0.6 m 处仍在缓慢

上升, 说明此时零通量面处于 0.4~0.6 m 间, 随着零通量面的下移, 入渗深度不断增加, 在雨后第五天 1.2 m 处水分开始微弱上升, 1.4 m 以下几乎没有变化, 而在雨后的第八天 1.2 m 处土壤水分较降雨前增加了 1.3%, 且还有可能继续下渗。

### 2.3 逐月降雨与入渗剖面特征

自动监测系统采集了 2014 年 6 月 22 日至 2014 年 10 月 22 日的的数据, 月尺度入渗表示如图 4。米脂

年降雨量分布不均匀,降雨主要集中在每年的7、8、9三个月,图中各时间段降雨总量为:6月22日—7月22日为153.2 mm,7月23日—8月22日为51 mm,8月23日—9月22日为104 mm,9月23日—10月22日为33 mm。

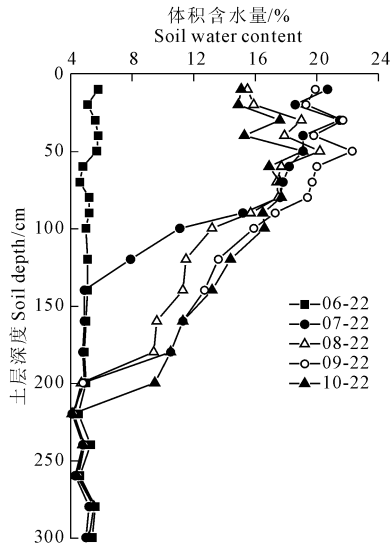


图4 月土壤水分变化

Fig.4 Monthly changes in soil moisture

从图4中可以看出,0.8 m内土层水分大小表现出了与降雨量多少的一致性,土壤含水量和降雨量呈现正相关关系,即降雨量越大含水量越高,而0.8 m以下土层水分含量持续增加,即使降雨量较小,仍然表现出入渗趋势,说明水分循环发生在0.8 m内土体,循环层以下土体不受蒸发作用影响,湿润峰越过该层后不断下移,湿润下层土壤,入渗深度不断增加。事实上,循环层的深度与前期次降雨量、降雨持续时间和降雨周期(降雨间隔)都有关系,这一深度具有特定性。本研究中0.8 m这一深度代表的是试验观测期内得出的初步结论,还需要有后续观测来确定其深度变化规律。6月22日数据为试验布设完成当天水分探针所采,由于土柱回填土经过了均匀掺混,其垂向水分分布表现出了均一的特点,含水率为5%左右。6月22日至7月22日期间试验区出现了连续多场次的强降雨,尤其7月中旬更是出现了一次暴雨,两天的降雨量达到了86.6 mm,较低的初始含水率使得这一时期湿润锋迅速下移到1.4 m的深度,1.4 m土体内土壤平均含水率从5.3%增加到了17.0%;7月23日至8月22日期间,虽然降雨量只有51 mm,但从图中可以看出这一阶段湿润峰仍然在快速下移,到达了2 m的深度,这可能是前一时期连续强降雨的结果,土壤水分的垂直输送具有滞后性,在湿润锋推进到土壤水循环层以下后,在较长的一段时

间内深度不断增加。之后的两个时段湿润锋推进速度明显减缓,虽然8月23日至9月22日期间降雨量达到了104 mm,但从图中可以看出入渗深度并没有明显增加,而在接下来的时段内降雨量仅有33 mm,最大入渗深度仍然增加了0.2 m,这与前一时期的强降雨有很大关系,说明当前时期的降雨不会很快补给到深层土壤,而是在较长的时间内持续补给深层土壤,随着深度的增加,补给作用也在减弱,至试验观测期结束入渗深度已达2.2 m。随着冬季的到来,气温不断下降,蒸发作用减弱,最大入渗深度可能还会继续增加。

#### 2.4 不同覆盖下降雨入渗补给

入渗与地表径流密切相联,在水文学中占有非常重要的位置,而本试验土柱地表混凝土井圈高出覆盖层上表面10 cm,可以认为没有产流,同时井壁衬一层防水塑料,消除周围植被根系对水分的影响,因此土柱内水分变化只通过蒸发和入渗完成。各处理覆盖层厚度均为30 cm,石子为直径2 cm的均匀砾石,树枝剪切为长10 cm的均匀段,薄膜为双层覆盖,上下层间距为30 cm,均开有小孔以便雨水进入。

试验地地下水埋藏较深(超过60 m),降水是土壤水分的唯一补给源。观测期降雨和各处理土壤水分补给见表1。各覆盖处理水分数据由中子水分仪测得,选择间隔20 d的数据计算补给量,由于6月下旬中子仪损坏,6月底数据缺失,因此该时间段跨度较大。在观测期内各处理均表现出降雨量越大,土壤水分补给量越大,如降雨量达156.8 mm的6月9日—7月23日补给量最大,而降雨量仅有11.8 mm的5月22日—6月9日补给量最小。从表中可见,5月22日—6月9日这一时期薄膜出现了负平衡,经过实地检查发现,是由于试验布设问题(已完善),下层薄膜表面部分水未进入土体,而薄膜处理的蒸发使得补给为负;树枝覆盖小于裸地,分析可能是在较小降雨下,水分主要被树枝覆盖层吸收而只有一小部分雨水进入土体。其他三个时间段补给量均表现为:为薄膜>石子>树枝>裸地,不同的覆盖模式使得降雨补给量出现了明显差异,薄膜的双层覆盖以及不透水性明显减小了蒸发作用,其补给量均远大于同期其他处理;与裸地相比,石子和树枝覆盖土壤水分补给量均有很大的提高,尤其在6月9日—7月23日这一时期,石子补给量甚至超过了裸地的2倍。整个观测期各处理土壤水均表现出正补偿,薄膜最大为187.5 mm,裸地最小为67.9 mm,同期降雨量为252.6 mm,薄膜的降雨利用率达到了74.2%,而裸地为26.9%。

土壤水分变化只受降雨和蒸发的影响,无植被根系吸水,推测降雨量和补给量之间具有稳定的关系,经过对不同时期降雨量( $P$ )与土壤水分补给量( $SWS$ )的统计分析,他们之间的关系可以拟合为:

$SWS = a \times P + b$ ,其数值关系见表2,可以看出均具有很强的相关性。从表中 $a$ 值大小可以看出,薄膜土壤水分补给量受降雨量影响最大,而裸地最小。

表1 各处理土壤水分补给量/mm

Table 1 Soil moisture recharging under each treatment

日期(M-d) Date	降雨量 Rainfall	裸地 Bare land	石子 Pebble	树枝 Branch	薄膜 Membrane
05-22-06-09	11.8	5.4	6.0	3.1	-1.3
06-09-07-23	156.8	33.0	68.7	57.7	116.2
07-23-08-13	41.4	15.6	28.7	16.8	35.2
08-13-09-03	42.6	13.9	20.6	19.8	37.4

表2 不同处理拟合关系

Table 2 Fitting relationships of different treatments

参数 Index	裸地 Bare land	石子 Pebble	树枝 Branch	薄膜 Membrane
$a$	0.177	0.412	0.363	0.696
$b$	5.742	4.933	1.394	7.060
$R^2$	0.967	0.970	0.990	0.999

### 3 结论

1) 次降雨下,不同降雨量其入渗规律不同。前期无降雨条件下,降雨量为5.2 mm(小雨)时,只能引起表层0.2 m土层内水分的变动,以下未受影响;降雨量为15.8 mm(中雨)时,降雨后一段时间内入渗深度达到了0.6 m;降雨量为33.6 mm(大雨)时,影响深度可达1.2 m;随着深度的增加,土体水分变化减小。

2) 80 cm内土层土壤含水量与降雨量呈正相关关系,受环境影响较大。土壤水分的垂直输送具有滞后性,其向下再分配可持续较长的时间,随着深度的增加,补给作用减弱,至试验观测期结束入渗深度达到了2.2 m。

3) 各处理降雨量与补给量呈线性关系,覆膜和石子水分补给受降雨量影响最大,观测期薄膜覆盖补给量为187.5 mm,降雨利用率达到了74.2%,各处理土壤水分补给量表现出:薄膜>石子>树枝>裸地这一规律。

### 4 讨论

本研究是在野外设置大规格土柱定位试验观测所得初步结果,该试验的优点是在野外自然环境之下完成,土柱规格较以往室内土柱大了数倍,更能反映降雨与当地环境土壤的入渗规律。本研究对探索半干旱黄土区土壤干层恢复机理与技术有

积极意义,但要更长时间和更多类型类似试验才能实现,本论文只是一个起步。逐次降雨量与最大入渗及所需时间受多种因素的影响,本次试验报道了相对独立的降雨(单次降雨间隔时间较长)土壤入渗和所需时间,也就是说典型单次降雨量与入渗深度和所需时间,实际在自然条件下降雨类型较复杂都会影响入渗,这些需要更持久的观测后分析才得出更加全面的论断。降雨后,在土体上部土层土壤含水量较高,形成高含水土层。一方面受表土蒸发的影响,高含水土层的土壤含水量逐渐下降,另一方面由于上层含水量和土水势较高,而下层含水量和土水势较小,水势差引起高含水土层水分的下移,入渗深度随之逐渐加深。土体内湿润锋所到之处,都会出现土壤含水量的突然升高,据此,我们可以通过对不同土层土壤水分动态分析,来确定土壤水分入渗深度。入渗是一个受多种因素影响的持续过程,该过程时间长短不仅受降雨量的影响,而且还会受环境温度、有无后续降雨等因素的影响。较小的降雨在雨后的几小时内即蒸发散失,尤其当雨后温度立即回升下表现得更为明显。而当出现连续小雨天气时,此时气温持续偏低,蒸发量较小,又有降雨不断补给,土壤水分则会出现明显补给。当出现强降雨天气时,一旦湿润锋越过水分循环层则会在一段时间内表现出持续下渗,不断补给深层土壤。土壤水分的垂直输送具有滞后性,其向下再分配可持续较长的时间。尤其是出现连续阴雨天气时,前一次降雨所产生的湿润锋还未消失而又出现一次新的降雨,新的湿润锋引起上层土壤水势的升高,随着时间的推移,新的湿润锋越过前一湿润锋继续下移,如此持续补给深层土壤水。而随着深度的增加,水势逐渐减小,湿润锋推进能力减弱,直至消失。

(下转第231页)

4) 三种滴头流量条件下,土壤水分再分布后水平扩散半径增加值较小,相反垂直方向再分布距离较大,并且随着滴头流量的增大逐渐增加,垂直方向再分布过程较明显,水分再分布后湿润区域内含水量均不同程度的减小,且同一位置处土壤含水量增加值降低了4%~7%,距离滴头越近则土壤含水量下降幅度越大,反之下降幅度越小。停灌时湿润锋外缘处土壤含水量在再分布后均增大,且湿润体增大,再分布后含水量等值线变为稀疏。

#### 参考文献:

- [1] 刘雪芹,范兴科.滴灌条件下土壤水分再分布过程研究[J].干旱地区农业研究,2006,24(4):42-45.
- [2] 赵颖娜,汪有科,马理辉,等.不同流量对滴灌土壤湿润体特征值的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(4):30-34.
- [3] 杨直毅,汪有科,汪星,等.山地红枣林地滴灌水分运移规律试验研究[J].水土保持学报,2009,23(3):213-216.
- [4] 刘晓英,杨振刚,王天俊.滴灌条件下土壤水分运动规律的研究[J].水利学报,1990,21(1):11-21.
- [5] Brant A, Bresler E, Diner N, et al. Infiltration from a trickle source: I. mathematical models[J]. Soil Sci Soc Am Proc, 1971, 35: 675-683.
- [6] 李明思,康绍忠,孙海燕.点源滴灌滴头流量与湿润体关系研究[J].农业工程学报,2006,22(4):32-35.
- [7] 岳海英.滴灌条件下土壤水分运移规律试验研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2010.
- [8] 郑园萍.滴灌条件下土壤水分入渗过程模拟试验研究[D].杨

- 凌:西北农林科技大学,2008:15-17.
- [9] 汪志荣,王文焰,王全九,等.点源入渗土壤水分运动规律实验研究[J].水利学报,2000,31(6):39-44.
- [10] Nakayama F S, Bucks D. Trickle irrigation for crop production—design, operation and management [M]. Elsevier Science Publishers. B. V., 1986: 19, 68, 108.
- [11] Meshkat M, Warner R C, Workman S R. Evaporation reduction potential in an undisturbed soil irrigated with surface drip and sand tube irrigation [J]. Trans of the ASAE, 2000, 43(1): 79-86.
- [12] Michael A B, Bruce G S, David G B. Soil pits as a simple design aid for subsurface drip irrigation systems [J]. Irrig Sci, 2003, 22: 135-141.
- [13] Gardner W R, Mayhugh M S. Solution and tests of the diffusion equation for the more moist of water in soil [J]. Soil Sci Soc Amer-proc, 1958, 22: 197-201.
- [14] 杨婵婵,李宏,郭光华,等.幼龄期红枣吸收根系空间分布特征[J].南方农业学报,2013,44(2):270-274.
- [15] 李宏,张志刚,郑朝辉,等.新疆红枣林地不同流量对滴灌土壤水分运移特征的影响[J].江苏农业科学,2013,41(8):171-174.
- [16] 张志刚,李宏,李疆,等.地表滴灌条件下滴头流量对土壤水分入渗过程的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(4):53-58.
- [17] 张志刚.滴灌条件下土壤水分运移规律研究[D].乌鲁木齐:新疆师范大学,2013:11-44.
- [18] 张志刚,李宏, Denny Walther, 等.塔里木河中游胡杨与灰叶胡杨气体交换特性对比研究[J].西北植物学报,2012,32(12):2506-2511.

(上接第223页)

**致谢:**对西北农林科技大学米脂试验站的工作人员和杨凌职业技术学院的高志永老师在野外工作中的帮助表示衷心的感谢。

#### 参考文献:

- [1] 杨文治,邵明安.黄土高原土壤水分研究[M].北京:科学出版社,2000:266-287.
- [2] 陈洪松,邵明安,王克林.黄土区坡地土壤水分运动与转化机理研究进展[J].水科学进展,2003,14(4):413-420.
- [3] 李毅,邵明安.间歇降雨和多场次降雨条件下黄土坡面土壤水分入渗特性[J].应用生态学报,2008,19(7):1511-1516.
- [4] 蒋定生,黄国俊.黄土高原土壤入渗速率的研究[J].土壤学报,1986,23(4):299-305.
- [5] 刘战东,高阳,刘祖贵,等.降雨特性和覆盖方式对麦田土壤水分的影响[J].农业工程学报,2012,28(13):113-120.
- [6] 郭忠升,邵明安.半干旱区人工林地土壤入渗过程分析[J].土壤学报,2009,46(5):953-958.
- [7] 陈洪松,邵明安,王克林.土壤初始含水率对坡面降雨入渗及土壤水分再分布的影响[J].农业工程学报,2006,22(1):44-47.
- [8] 刘汗,雷廷武,赵军.土壤初始含水率和降雨强度对黏黄土

- 入渗性能的影响[J].中国水土保持科学,2009,7(2):1-6.
- [9] 宋亚新,张发旺,荆恩春.种植条件下降雨灌溉入渗试验研究[J].地球学报,2008,29(4):510-516.
- [10] 徐学选,陈天林.黄土土柱入渗的优先流试验研究[J].水土保持学报,2010,24(4):82-85.
- [11] 李贵玉,胡慧方,廖建文,等.黄土丘陵区不同地类土壤入渗性能研究[J].中国水土保持,2010,(12):36-40,73.
- [12] 张常亮,李萍,李同录.黄土中降雨入渗规律的现场监测研究[J].水利学报,2014,45(6):728-734.
- [13] 李萍,李同录,王阿丹,等.黄土中水分迁移规律现场试验研究[J].岩土力学,2013,34(5):1331-1339.
- [14] 雷廷武,毛丽丽,李鑫,等.土壤入渗性能的线源入流测量方法研究[J].农业工程学报,2007,23(1):1-5.
- [15] 王孟本,李洪建.晋西北黄土区人工林土壤水分动态的定量研究[J].生态学报,1995,15(2):178-184.
- [16] 黄明斌,杨新民,李玉山.黄土区渭北旱原苹果基地对区域水循环的影响[J].地理学报,2001,56(1):7-12.
- [17] 李玉山.黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J].自然资源学报,2001,16(5):427-432.
- [18] 赵娇娜,徐学选,李星,等.长武塬区降雨入渗特征[J].中国水土保持科学,2012,10(4):37-44.