

黄土丘陵区降雨后鱼鳞坑土壤水分动态模拟研究

李高亮^{1,3}, 王科^{2,4}, 段翠花^{2,4}, 郑纪勇^{1,2}

(1.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;

2.西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为了明确鱼鳞坑措施下降雨后土壤水分再分布过程及范围的变化,以汇流面积 2 m^2 ,径流系数0.3为试验条件,选取规格为 $60\text{ cm}\times 40\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ (长 \times 宽 \times 深)的鱼鳞坑,通过灌水试验研究了降雨强度分别为60,30 mm/h,历时1 h后连续7 d的土壤水分动态。结果表明:(1)降雨强度60,30 mm/h时灌水后第1天水分入渗深度为60,50 cm,第2天达到最大值,分别为80,60 cm,水分最大入渗深度随降雨强度增加而增大;灌水后第1天水分水平入渗距离达到最大值40 cm,水分水平入渗距离随土层深度增加而降低。(2)灌水后7 d内,降雨强度60 mm/h时水分主要储存在深度10—80 cm距离鱼鳞坑中心0—40 cm的区域内;降雨强度30 mm/h时,水分主要储存在深度10—50 cm距离鱼鳞坑中心0—40 cm的区域内。(3)深度10—30 cm处土壤水分在灌水后第1天达到最大值,30—50 cm处土壤水分在灌水后第3天达到最大值;距离鱼鳞坑中心0—20 cm处土壤水分在灌水后第1天达到最大值,距离20—40 cm处在灌水后2~3 d水分达到最大值;达到最大值后土壤水分逐渐降低至稳定。鱼鳞坑措施下降雨水分入渗深度可达80 cm,且随降雨强度增加而增大,水分水平入渗距离与降雨强度无明显关系。

关键词:鱼鳞坑; 土壤水分再分布; 灌水试验; 黄土丘陵区

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)02-0076-09

Study on Simulation of Soil Water Dynamics in Fish-Scale Pit After Rainfall in Loess Hilly Region

LI Gaoliang^{1,3}, WANG Ke^{2,4}, DUAN Cuihua^{2,4}, ZHENG Jiyong^{1,2}

(1. *Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese*

Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University,*

Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*;

4. *College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: In order to understand the effects of fish-scale pit on soil water dynamics after rainfall, the irrigation experiment was carried out. The size of fish-scale pit was $60\text{ cm}\times 40\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ (length \times wide \times depth), the rainfall intensity was 60 mm/h and 30 mm/h and it lasted for 1 h. The runoff collection area was 2 m^2 , and the runoff coefficient was 0.3. The results showed that: (1) the vertical infiltration depth was 60 cm and 50 cm, respectively, on the first day after irrigation that the rainfall intensity was 60, 30 mm/h, the maximum vertical infiltration depth was 80 cm and 60 cm on the second day after irrigation; the maximum vertical infiltration depth increased with the increase of rainfall intensity; the maximum horizontal infiltration distance was 40 cm on the first day after irrigation; the horizontal infiltration distance decreased with the increases of soil depth; (2) the water was mainly stored at the depth of 10—80 cm and 0—40 cm from the center of the fish-scale pit within 7 days after irrigation that the rainfall intensity was 60 mm/h; the water was mainly stored at the depth of 10—50 cm and 0—40 cm from the center of the fish-scale pit within 7 days after irrigation that the rainfall intensity was 30 mm/h; (3) the soil moisture reached the maximum at depths of

收稿日期: 2021-05-12

修回日期: 2021-06-06

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0504504, 2016YFC0501702); 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2020BCF01001); 国家自然科学基金项目(41571225)

第一作者: 李高亮(1995—), 男, 河南三门峡人, 硕士研究生, 主要从事水土资源高效利用研究。E-mail: ligaoiliang18@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 郑纪勇(1974—), 男, 山东聊城人, 副研究员, 主要从事水土资源与环境研究。E-mail: zhjy@ms.iswc.ac.cn

10—30 cm and 30—50 cm on the first and the third day after irrigation, respectively; the soil moisture at a distance of 0—20 cm from the center of fish-scale pit reached the maximum on the first day after irrigation; the soil moisture at a distance of 20—40 cm reached the maximum on the second day or the third day after irrigation. The soil water content gradually decreased and reached to the stable level after reaching the maximum. The water infiltration depth in the fish-scale pit could be 80 cm, and increases with the increase of rainfall intensity. There is no obvious relationship between the horizontal infiltration range and rainfall intensity.

Keywords: fish-scale pit; soil moisture redistribution; irrigation experiment; loess hilly region

半干旱黄土丘陵区是我国的生态环境脆弱区,区域内水资源严重不足导致了植被分布不合理,生态系统服务功能低下^[1-4]。该区域地下水埋藏较深,自然降雨是该区域唯一的水分补给源^[5-6]。但区域内自然降雨年内分布不均,6—9 月份降雨量可占全年降雨量的 73.7%,且多暴雨,大量降雨资源以径流形式损失^[7-8]。降雨径流的大量损失降低了降雨的有效性,制约了植被恢复和生态重建工作的进行。为了控制水土流失,提高降雨资源化程度,当地开展了大量的工作,主要包括退耕还林还草、水土保持工程建设和植被人工恢复^[9-11]。通过在坡面上建设集水措施进行下垫面改造,可以拦截降雨径流并积蓄水分,提高降雨资源化程度。大量研究表明,这些工程措施的实施有效地减少了水土流失,增加了土壤水分和养分,提升了人工种植植被的成活率^[12-14]。鱼鳞坑整地措施是地形破碎条件下造林整地的重要方式,目前在黄土丘陵沟壑区已经被广泛使用。过往的研究大多集中于鱼鳞坑措施的减流减沙效益和提升造林成活率作用,对于鱼鳞坑措施下降雨后土壤水分的再分布特征少有研究。因此,本文通过灌水试验模拟不同的降雨径流量,研究鱼鳞坑措施下降雨后土壤水分的入渗范围和土壤储水量随时间的变化,以期为黄土丘陵区鱼鳞坑的营造和植被恢复与重建提供一定的技术与理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究在宁夏回族自治区固原市河川乡火岔湾流域(35°59′—36°02′ N, 106°26′—106°30′ E, 1 530—1 822 m)开展,该地区位于黄土高原西南部,属于半干旱区,气候类型为温带季风气候。该区域年降雨总量最大 634.7 mm,最小 259.9 mm,平均 412.9 mm,多年平均蒸发量为 1 558.3 mm,总体上土壤水分亏缺严重。土壤稳定入渗率范围为 0.92~1.08 mm/min,表层(0—20 cm)土壤容重为 1.07~1.14 g/cm³^[15-16]。土壤类型为黄土母质发育的黄绵土,土壤颗粒组成为砂粒(0.02~2 mm)含量 45.85%,粉粒(0.002~0.02 mm)

含量 34.47%,黏粒(<0.002 mm)含量 19.68%,属于沙质壤土(表 1)。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 试验选取的鱼鳞坑规格为 60 cm×40 cm×10 cm(长×宽×深),在研究区内选择弃耕 15 a 的梯田作为试验点,按设计的规格建造鱼鳞坑。结合国家气象中心发布的固原地区 1956—2016 年的气象数据,本试验选择 60, 30 mm/h 作为模拟降雨强度,根据当地径流小区观测资料,选取 0.3 作为径流系数,2 m² 作为汇流面积,则径流流量分别为 36, 18 L/h。本试验设计降雨时长为 1 h,因此两个处理灌水量为 36, 18 L,每个处理重复 3 次。

1.2.2 指标测量及计算 试验采用自制的供水装置来供水,为试验提供流速稳定的水源。供水结束 24 h 以后鱼鳞坑中心为原点,沿 3 个相互之间夹角为 120°的方向分别在距中心 0, 20, 40, 60, 80 cm 位置使用土钻采集 0—300 cm 深度土层的土壤样品,采样间隔 10 cm。将采集的土壤样品带回实验室采用烘干法(105℃, 24 h)测定其质量含水量。在采集完土壤样品后,立即在措施中心及选定方向布设 5 根中子管(PVC, 300 cm)。在灌水后的第 2, 3, 5, 7 天采用中子仪(Neutron probe, CNC503B, 中国)测定 0—300 cm 土层的土壤体积含水量,测量间隔为 10 cm。

在使用中子仪进行土壤水分测量之前,采用灌水法对中子仪标准曲线进行标定,考虑到表层土壤性质与深层差异较大,本次标定采用分层标定的方法^[17],标定深度分为 0—10 cm 和 >10 cm, 0—10 cm 标定结果如公式(1)所示, >10 cm 标定结果如公式(2)所示:

$$y = 0.3979x + 0.1921 \quad (1)$$

$$y = 0.7998x + 0.0496 \quad (2)$$

式中: y 为土壤体积含水量(cm³/cm³); x 为中子计数比。

在标定中子仪过程中挖取 3 个深度为 150 cm 的土壤剖面,每隔 10 cm 深度用环刀采集土壤样品,将采集的环刀样品带回实验室,用烘干法测量土壤容重和体积含水量并计算土壤总孔隙度。土壤质量含水量与体积含水量的转换过程如公式(3)^[18]所示;土壤

总孔隙度 (Total porosity, TP) 计算公式如公式 (4)^[19] 所示; 土壤储水量 (Soil water storage, SWS) 的计算公式如公式 (5)^[18] 所示:

$$\theta_v = \theta_m \times \text{BD} \quad (3)$$

$$\text{TP} = \left(1 - \frac{\text{BD}}{d_s}\right) \times 100 \quad (4)$$

$$\text{SWS} = \sum_{i=1}^n \theta_{vi} \times D_i \times 10^{-1} \quad (5)$$

式中: θ_v 为土壤体积含水量 (cm^3/cm^3); θ_m 土壤质量含水量 (%); BD 为土壤容重 (g/cm^3), 150—300 cm 深度土壤的容重采用 100—150 cm 深度土壤容重的平均值; TP 为土壤总孔隙度 (%); d_s 为土壤密度 (g/cm^3), 取值 2.65; SWS 为土壤储水量 (mm); θ_{vi} 第 i 层土壤的体积含水量 (cm^3/cm^3); D_i 为 i 层土壤的厚度 (cm); 100, 10^{-1} 为单位转换系数。

表1 试验区土壤物理性质

土层 深度/cm	体积含水量/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	总孔隙度/%
0—10	0.26±0.007ab	1.50±0.05a	43.42±1.93c
10—20	0.27±0.011a	1.44±0.02a	45.68±0.93c
20—30	0.27±0.013a	1.34±0.09ab	49.25±3.41bc
30—40	0.27±0.012a	1.24±0.02bc	53.15±0.59ab
40—50	0.26±0.009ab	1.15±0.04c	56.58±1.65a
50—60	0.27±0.009a	1.15±0.03c	56.65±1.03a
60—70	0.27±0.013ab	1.18±0.02c	55.29±0.88a
70—80	0.26±0.004ab	1.15±0.06c	56.42±2.31a
80—90	0.24±0.004bc	1.15±0.05c	56.70±1.88a
90—100	0.23±0.007c	1.18±0.01c	55.43±0.49a
100—110	0.22±0.010cd	1.20±0.02bc	54.80±0.66ab
110—120	0.22±0.008d	1.18±0.02c	55.30±0.82a
120—130	0.21±0.006de	1.21±0.02bc	54.51±0.92ab
130—140	0.20±0.003e	1.20±0.03bc	54.61±1.17ab
140—150	0.20±0.006e	1.22±0.03bc	53.87±1.26ab

注: 表中数据为平均值±标准差; 同列不同小写字母表示数值差异达到显著水平 ($p < 0.05$)。

1.2.3 数据处理 使用 R 4.0.4 对数据进行处理, 对各项指标进行差异显著性检验和多重比较, 用 Origin 2021 进行图形绘制。

2 结果与分析

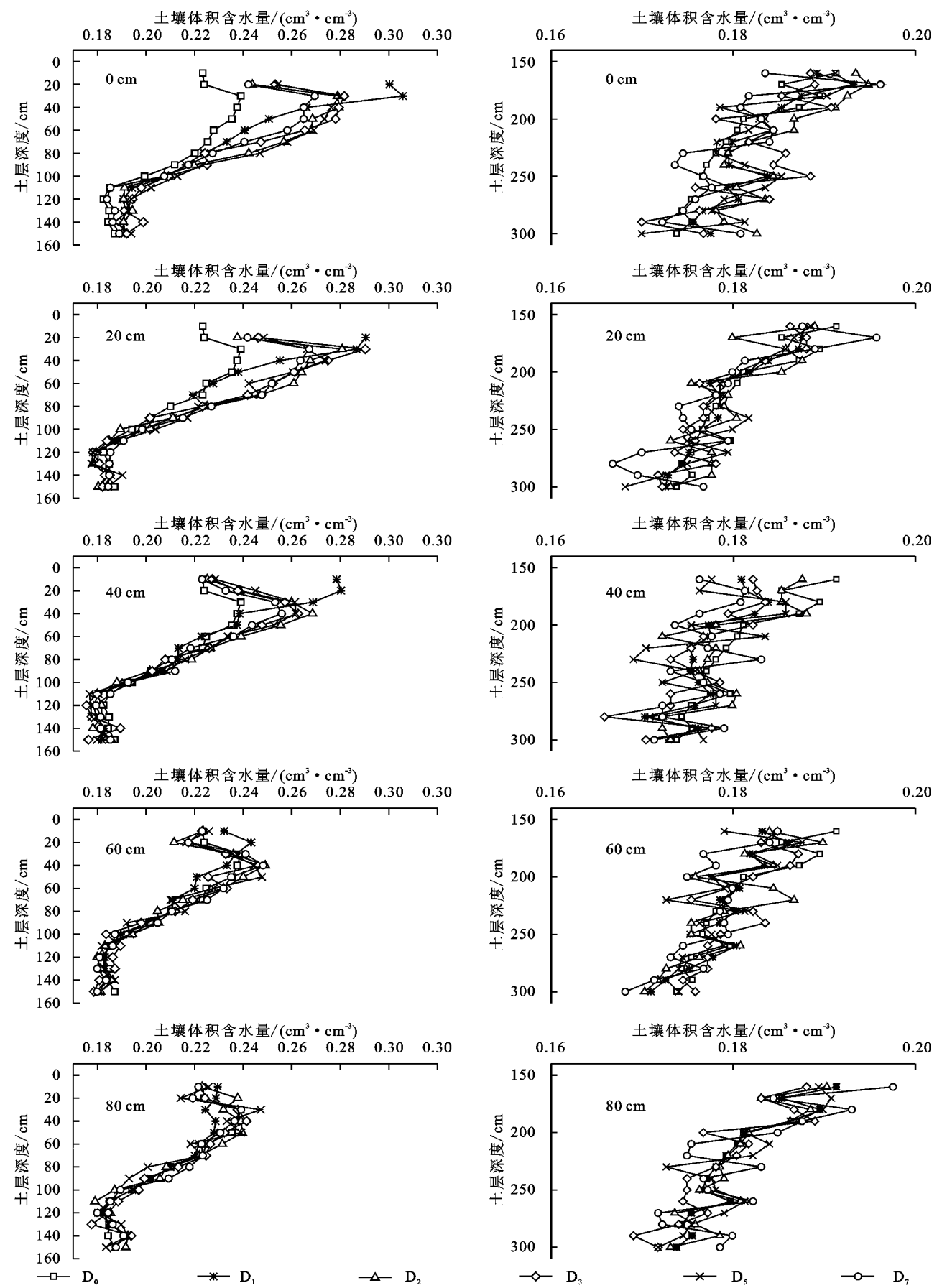
2.1 土壤水分垂直方向变化特征

深度 0—300 cm 土层在距离鱼鳞坑中心 0, 20, 40, 60, 80 cm 处的土壤体积含水量随时间的变化见图 1, 2。由图 1 可知, 降雨强度为 60 mm/h 时, 与试验前相比, 在鱼鳞坑中心处 (0 cm), 灌水后第 1 天 10—30 cm 深度土层的含水量显著增加, 30—60 cm 深度土层含水量增加但不显著 ($p > 0.05$); 灌水后第 2 天, 10—30 cm 深度土层的含水量相比前一天降低, 但仍高于灌水前,

30—80 cm 深度土壤含水量相比前一天升高; 在灌水后第 3, 5, 7 天 10—40 cm 深度土壤含水量逐渐降低, 40—80 cm 深度土壤含水量逐渐增大。在距离中心 20, 40 cm 处, 土壤水分在垂直方向的变化趋势与中心处基本一致, 但变化幅度逐渐减小。灌水后第 1 天与灌水前相比, 距离鱼鳞坑中心 0, 20, 40 cm 处 0—30 cm 和 30—60 cm 深度土壤平均含水量增加率分别为 32%, 26%, 21% 和 9.0%, 1.9%, 0.021%; 灌水后第 2 天与灌水前相比水分增加率分别为 14%, 13%, 5.0% 和 17%, 14%, 9.4%; 灌水后第 7 天与灌水前相比水分增加率分别为 12%, 11%, 3.3% 和 13%, 11%, 5.4%。灌水后 0~7 d 内, 深度 80 cm 以下的土层含水量在试验过程中无显著变化 ($p > 0.05$)。

由图 2 可知, 在降雨强度为 30 mm/h 时, 与试验前相比, 在鱼鳞坑中心处 (0 cm), 灌水后第 1 天时 10—30 cm 深度土层的含水量显著增加, 30—50 cm 深度土层含水量增加但不显著 ($p > 0.05$); 灌水后第 2 天, 10—20 cm 深度土层的含水量相比前一天降低, 20—50 cm 深度土壤含水量相比前一天升高。在距离鱼鳞坑中心 20, 40 cm 处, 土壤水分垂直方向变化规律一致; 灌水后第 1 天时 10—30 cm 深度土层的含水量显著增加 ($p < 0.05$); 灌水后第 2 天, 10—30 cm 深度土层的含水量相比前一天降低, 30—40 cm 深度土壤含水量相比前一天升高; 在灌水后第 3, 5, 7 天, 土壤含水量几乎无变化。灌水后第 1 天与灌水前相比, 鱼鳞坑中心及水平距离 20, 40 cm 处在 0—30 cm 和 30—50 cm 深度土壤平均含水量增加率分别为 25%, 25%, 11% 和 2.2%, 1.7%, 0.013%; 灌水后第 2 天与灌水前相比水分增加率分别为 19%, 12%, 8.9% 和 16%, 5.9%, 4.1%; 灌水后第 7 天与灌水前相比水分增加率分别为 12%, 6.2%, 4.2% 和 7.1%, 1.3%, 1.4%。灌水后 0~7 d 内, 距离鱼鳞坑中心 60, 80 cm 处及所有深度 50 cm 以下的土层含水量无显著变化 ($p > 0.05$)。

在垂直方向上, 土壤水分的变化主要受土壤性质、植被生长和气候因素 (降水、风速、太阳辐射等) 的影响^[20-21]。本试验研究结果表明, 降雨强度分别为 60, 30 mm/h 时, 在垂直方向上灌水后第 1 天土壤含水量最高值分别出现在 30 cm 和 20 cm 深度处, 水分最大入渗深度分别为 60, 40 cm; 灌水后第 2 天, 土壤含水量最高值分别出现在 40, 30 cm 深度, 最大入渗深度分别为 80, 60 cm, 并持续至灌水后第 7 天。这表明降雨强度大的时候, 灌水后土壤水分最大值出现的深度和水分最大入渗深度大于降雨量小的时候; 灌水后土壤水分的最大入渗深度随时间推移而增大, 在灌水后第 2 天达到最大值, 2~7 d 内保持不变。



注: D₀, D₁, D₂, D₃, D₅, D₇ 分别为灌水前、灌水后第 1, 2, 3, 5, 7 d; 0, 20, 40, 60, 80 表示距离鱼鳞坑中心的距离, 下同。

图 1 降雨强度 60 mm/h 不同水平距离处土壤含水量垂直变化

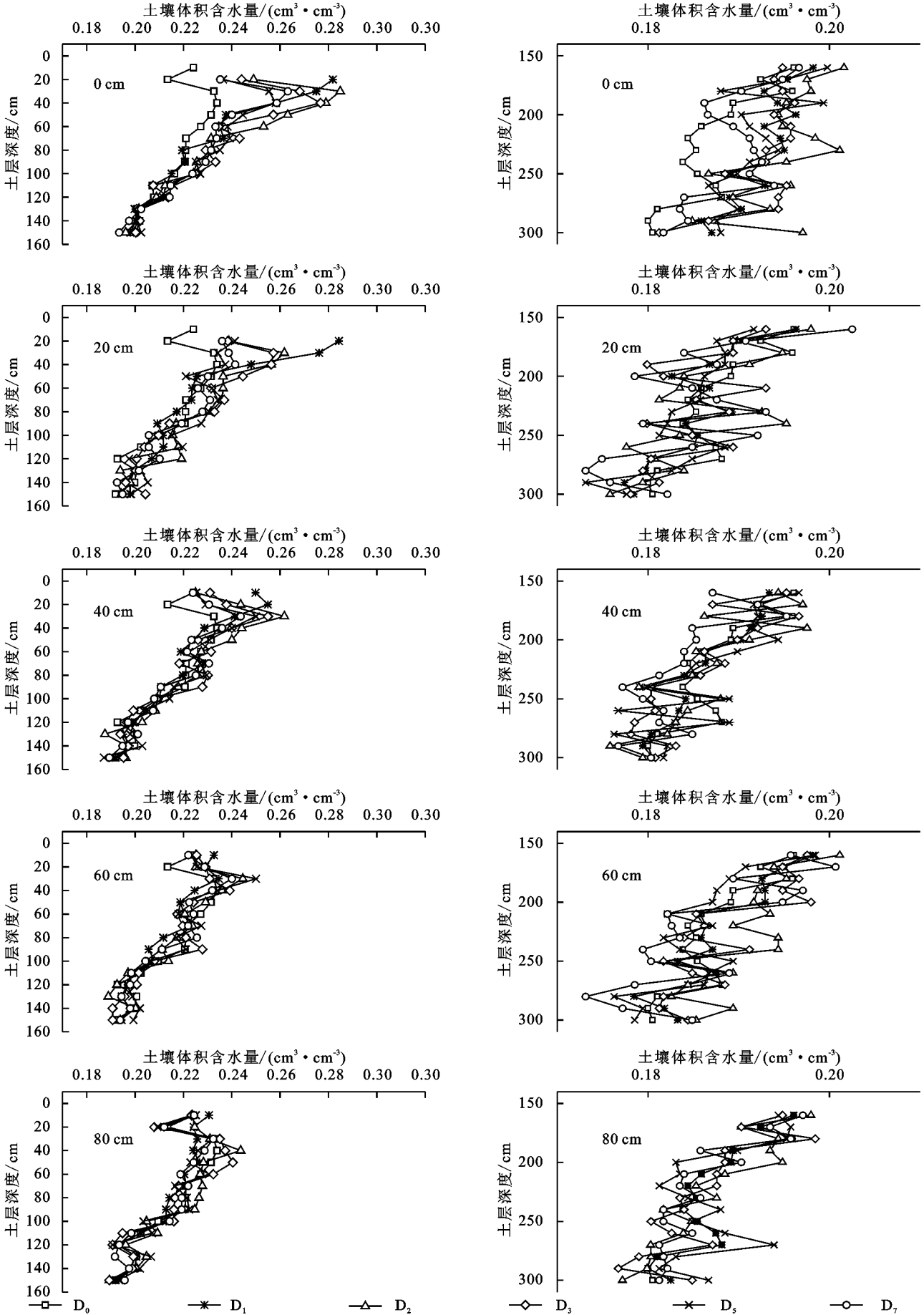


图 2 降雨强度 30 mm/h 不同水平距离处土壤含水量垂直变化

2.2 土壤水分水平方向变化特征

距离鱼鳞坑中心 0, 20, 40, 60, 80 cm 处含水量在 0—100 cm 深度各土层随时间的变化见图 3, 4。由图 3 可知, 在降雨强度为 60 mm/h 时, 深度 0—10 cm 土层处距鱼鳞坑中心 40 cm 处土壤含水量在灌水后第 1 天显著增加($p < 0.05$), 增加率为 25.09%, 随后恢复至灌水前水平, 同一深度其他位置土壤含水量无显著变化($p > 0.05$)。深度 10—30 cm 土层含水量在灌水后第 1 天在距离鱼鳞坑中心 0—40 cm 处显著增加, 而后随着时间的推移而减小。深度 30—60 cm 土层处距鱼鳞坑中心 0—40 cm 处在灌水后第 1 天增加, 而后随时间推移而增加。深度 60—80 cm 处距鱼鳞坑中心 0—20 cm 处土壤含水量随时间推移逐渐增加。深度 80 cm 以下土层的含水量在水平方向无显著变化($p > 0.05$)。

由图 4 可知, 在降雨强度为 30 mm/h 时, 深度 0—10 cm 土层处距鱼鳞坑中心 40 cm 处土壤含水量在灌水后第 1 天增加了 11%, 同一深度其他位置土壤含水量无显著变化($p > 0.05$)。深度 10—30 cm 土层含水量在灌水后第 1 天在距离鱼鳞坑中心 0—40 cm 处显著增加, 而后随着时间的推移而减小; 深度 30—50 cm 土层在灌水后第 1 天在距离鱼鳞坑中心 0 cm 处含水量显著增加, 距离中心 20—40 cm 处增加但不显著, 在灌水后第 2, 3 天继续增加, 灌水后 5~7 d 降低直至稳定。深度 50 cm 以下土层的含水量在水平方向无显著变化($p > 0.05$)。

在水平方向上, 土壤水分的空间分布结构受海拔高度、坡向、下垫面、降雨动态、植被形态、土壤剖面性质等多种因素影响^[20, 22-23]。本文研究表明, 在水平方向上土壤含水量随距离鱼鳞坑中心距离增大而降低。在不同土层深度下水分的水平入渗范围不同, 降雨强度为 60 mm/h 时, 深度 10—50 cm 土层水分水平入渗距离可达 40 cm, 深度 60—80 cm 土层水分水平入渗距离为 20 cm。降雨强度为 30 mm/h 时, 深度 10—20 cm 土层水分水平入渗距离为 40 cm, 20—40 cm 深度水分水平入渗距离为 20 cm。由此可知水分的水平入渗距离随土层深度的增加而减小, 这是因为土壤水分水平运移的动力之一是基质对水分的吸持作用, 这一作用随土壤含水量的增加而减小^[18]。灌水后浅层土壤含水量迅速上升, 与周围土壤形成水势差, 水分迅速向周围扩散, 在重力作用下水分向垂直方向上扩散更快, 但土层深度越大水分增加量越少, 形成的水势差越小, 因此水平方向上水分入渗范围更小。

2.3 土壤储水量变化范围

灌水后鱼鳞坑不同距离处 10—100 cm 深度土壤的总储水量变化见图 5。由图可知, 灌水后距鱼鳞坑 0, 20 cm 处土壤储水量显著增加, 相比于灌水前, 灌水后第 1

天降雨强度 60 mm/h 时增加率分别为 12%, 6.2%, 降雨强度 30 mm/h 时增加率分别为 7.7%, 4.7%; 在灌水后第 2~7 d 0 cm 处土壤储水量逐渐降低, 20 cm 处土壤储水量在灌水后 2~3 d 逐渐升高, 3~7 d 逐渐降低; 相比于灌水前, 灌水后第 7 天, 降雨强度 60, 30 mm/h 下, 距离 0, 20 cm 处土壤储水量增加率分别为 8.9%, 7.6% 和 6.1%, 1.2%。降雨强度 60, 30 cm/h 下, 距离鱼鳞坑 40 cm 处土壤储水量在灌水后逐渐增加, 在第 2 天达到最大值, 相比灌水前增加率分别为 7.7%, 4.9%; 在灌水后 2~7 d 波动变化, 第 7 天时相比于灌水前的储水量增加率分别为 2.0%, -0.53%。在试验过程中距离鱼鳞坑 60, 80 cm 处土壤储水量无明显变化。

大量研究已经证明鱼鳞坑措施具有优异的拦截及入渗降雨径流的能力, 本研究也得到了相同的结果。本试验研究结果表明, 当鱼鳞坑规格为 60 cm×40 cm×10 cm(长×宽×深)时, 降雨强度为 60, 30 mm/h 时, 降雨水分主要储存距离鱼鳞坑中心 0—40 cm 处, 距离鱼鳞坑 40—80 cm 处的土壤储水量基本没有变化。相比于距离鱼鳞坑 0 cm 处, 距离 20 cm 处土壤储水量的最高值达到的时间更晚, 这是因为在黄土丘陵区土壤水分的垂直和水平入渗速率不同, 水分在垂直方向入渗的更快, 但最终距离鱼鳞坑不同距离处土壤储水量有趋于相同的趋势, 这与前人的研究结果相一致^[24-25]。

3 讨论

鱼鳞坑措施通过改变坡面微地形, 拦截并切断坡面径流, 增加降雨水分的就地入渗, 提高降雨资源的利用率^[26-27]。大量研究表明鱼鳞坑措施在降雨期间具有良好的集水效果, 本研究中也证明了规格为 60 cm×40 cm×10 cm(长×宽×深)的鱼鳞坑可以在 1 h 内拦截及入渗强度为 60, 30 mm/h 的降雨所产生的径流。有研究显示鱼鳞坑措施主要增加了深度 40—60 cm 土层的含水量^[26, 28], 本研究的结果则表明在降雨强度为 60, 30 mm/h 时, 鱼鳞坑措施下水分的最大入渗深度分别为 80, 60 cm, 这一深度大于前人的研究结果, 可能是因为本试验位于梯田内, 且处于雨季, 土壤初始含水量较大, 0—100 cm 的土壤平均含水量达到了 0.22 cm³/cm³。较高的初始含水量会降低水分入渗的初始速率和稳定速率, 但在入渗水量不变时可以增加水分的最大入渗深度^[29-30]。在降雨强度为 60, 30 mm/h 的时候, 鱼鳞坑措施下水分的水平入渗距离均为 40 cm, 不受降雨强度的影响, 且几乎不随时间变化, 可能是因为土壤水分在重力和水势梯度差的作用下优先向垂直方向入渗, 在总水量有限的情况下水分在垂直方向的入渗距离也是有限的。

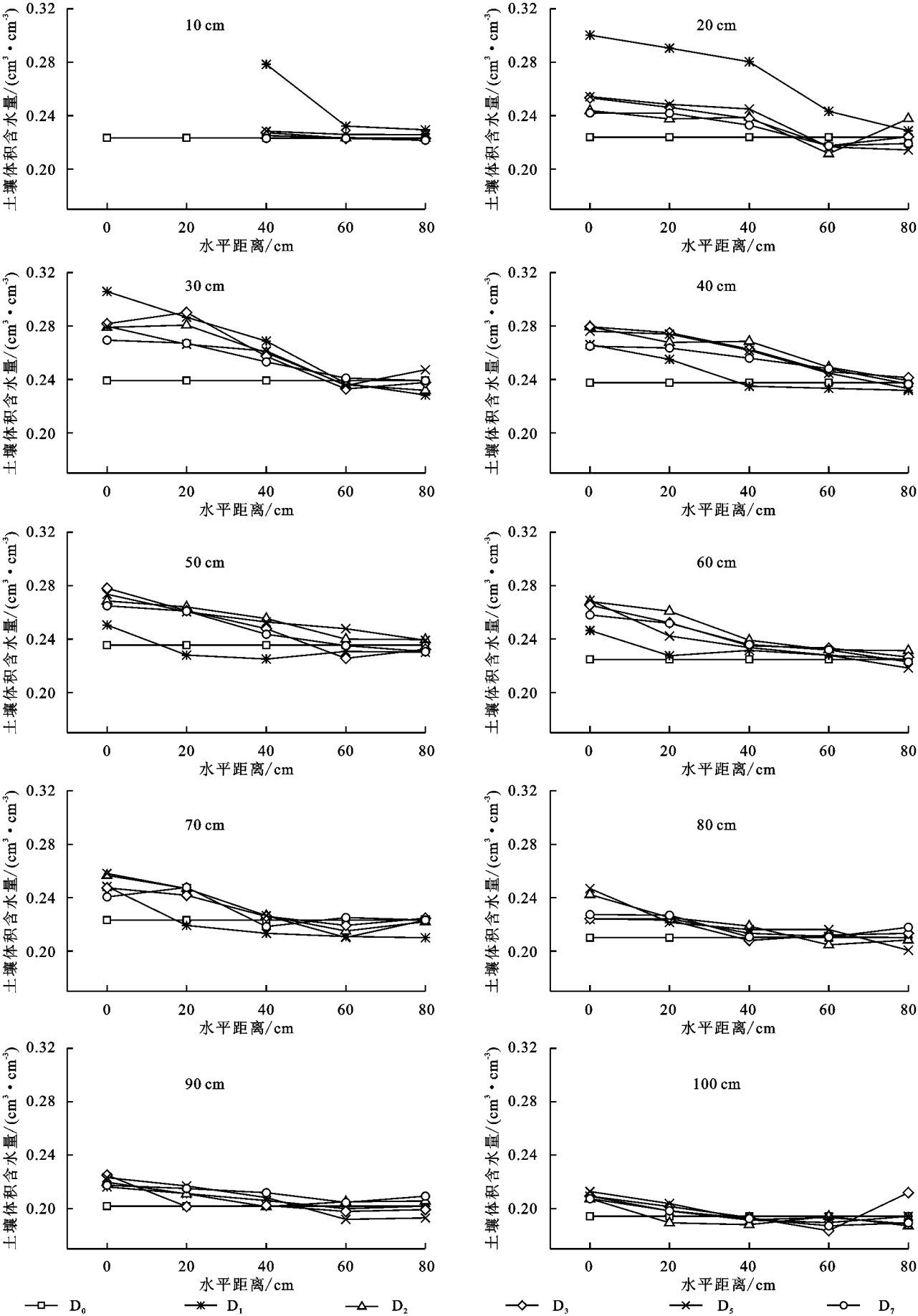


图 3 降雨强度 60 mm/h 不同深度处土壤含水量水平变化

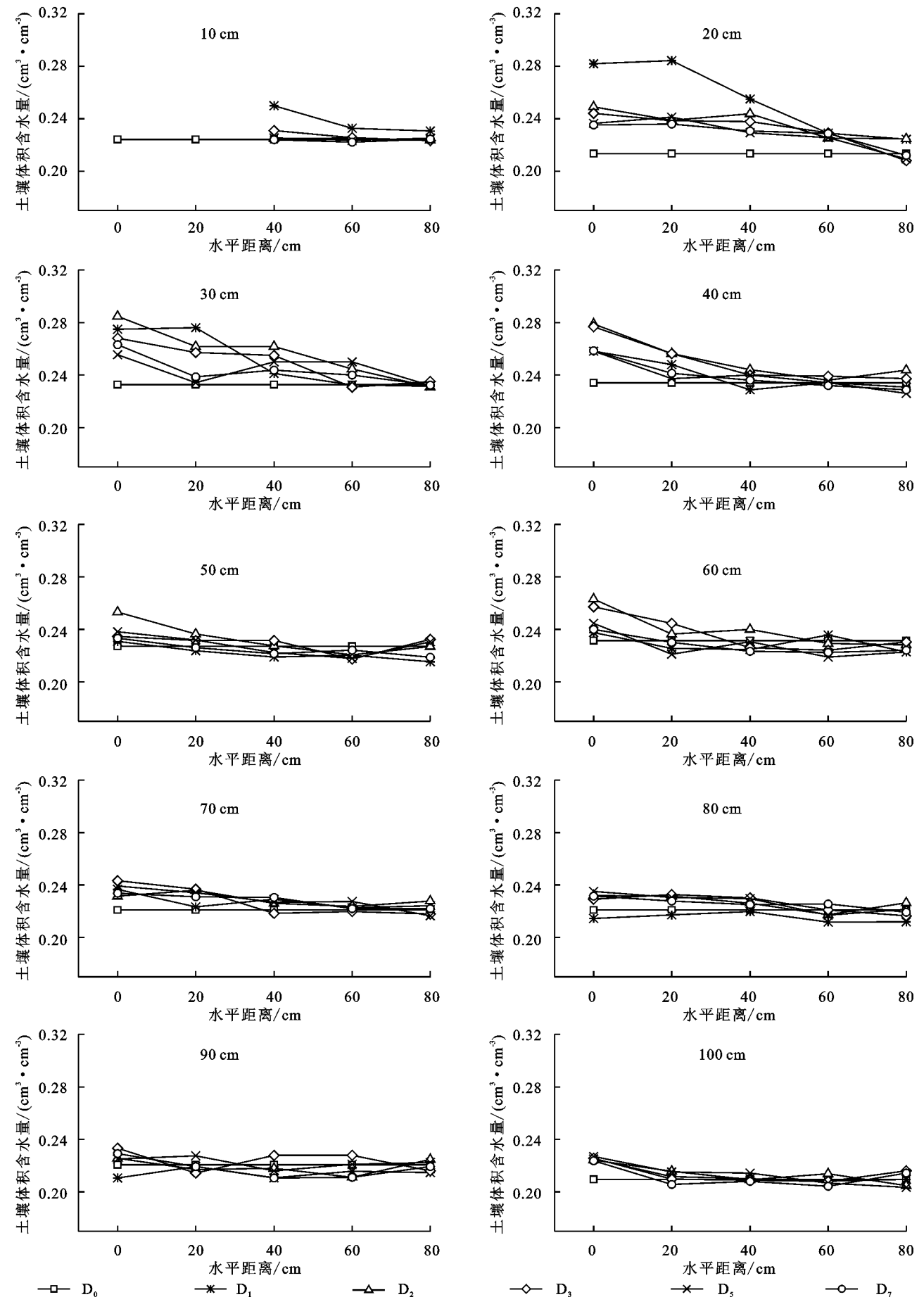


图 4 降雨强度 30 mm/h 不同深度处土壤含水量水平变化

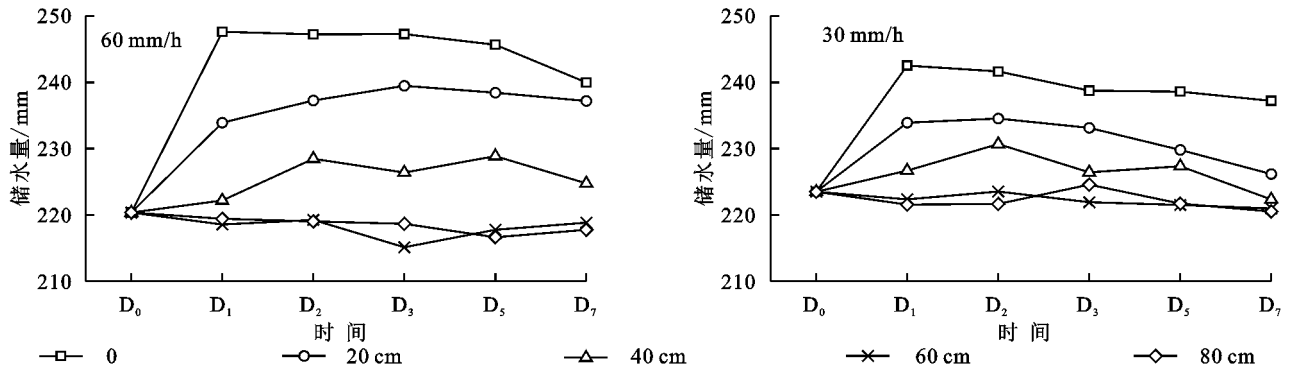


图5 灌水后鱼鳞坑不同距离处土壤储水量变化

4 结论

(1) 降雨强度为 60, 30 mm/h 时灌水后第 1 天水分入渗深度为 60, 50 cm, 第 2 天入渗深度达到最大值, 分别为 80, 60 cm, 水分最大入渗深度随降雨强度的增加而增大, 在达到最大入渗深度前随灌水后时间推移而增大。灌水后第 1 天水分水平入渗距离达到最大值 40 cm, 水平入渗范围随着土层深度的增加而减小。

(2) 灌水后 7 d 内, 降雨强度 60 mm/h 时水分主要储存在深度 10—80 cm 距离鱼鳞坑中心 0—40 cm 的区域; 降雨强度 30 mm/h 时, 水分主要储存在深度 10—50 cm 距离鱼鳞坑中心 0—40 cm 的区域。

(3) 深度 10—30 cm 处土壤水分在灌水后第 1 天达到最大值, 深度 30—50 cm 处土壤水分在灌水后第 3 天达到最大值; 距离鱼鳞坑 0—20 cm 处土壤水分在灌水后第 1 天达到最大值, 距离 20—40 cm 处在灌水后 2~3 d 水分达到最大值; 达到最大值后土壤水分逐渐降低。

参考文献:

- [1] 朱显谟. 重建土壤水库是黄土高原治本之道[J]. 中国科学院院刊, 2006, 21(4): 320-324.
- [2] Fu B J, Wang S, Liu Y, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China[M]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2017, 45: 223-243.
- [3] 蒋定生. 黄土高原水土流失严重地区综合治理的新进展[J]. 水土保持研究, 1994, 1(1): 23-28.
- [4] Wang F, Liu W. A Preliminary study of climate vulnerability of agro-production in the Loess Plateau[J]. Climatic and Environmental Research, 2003, 8(1): 91-100.
- [5] 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.
- [6] Jia X X, Shao M A, Zhu Y J, et al. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2017, 546: 113-122.
- [7] Feng J, Wei W, Pan D L. Effects of rainfall and terracing-vegetation combinations on water erosion in a loess hilly area, China[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 261: DOI:10.1016/j.jenvman.2020.110247.
- [8] Guo M M, Yang B, Wang W L, et al. Distribution, morphology and influencing factors of rills under extreme rainfall conditions in main land uses on the Loess Plateau of China[J]. Geomorphology, 2019, 345: DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.106847.
- [9] Su B Q, Shangguan Z P. Decline in soil moisture due to vegetation restoration on the Loess Plateau of China[J]. Land Degradation & Development, 2019, 30(3): 290-299.
- [10] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J, et al. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(4): 437-448.
- [11] Chen H, Zhang X P, Abila M, et al. Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2018, 170: 141-149.
- [12] Feng T J, Wei W, Chen L D, et al. Effects of land preparation and plantings of vegetation on soil moisture in a hilly loess catchment in China[J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(5): 1427-1441.
- [13] Wei W, Feng X R, Yang L, et al. The effects of terracing and vegetation on soil moisture retention in a dry hilly catchment in China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 647: 1323-1332.
- [14] Zhao G J, Mu X M, Jiao J Y, et al. Evidence and causes of spatiotemporal changes in runoff and sediment yield on the Chinese Loess Plateau[J]. Land Degradation & Development, 2017, 28(2): 579-590.
- [15] 白盛元, 汪有科, 马建鹏, 等. 黄土高原半干旱区降雨入渗试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(2): 218-223.
- [16] 蒋定生, 黄国俊, 谢永生. 黄土高原土壤入渗能力野外测试[J]. 水土保持通报, 1984, 4(4): 7-9.
- [17] 陈洪松, 邵明安. 中子仪的标定及其在坡地土壤水分测量中的应用[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(2): 68-71.
- [18] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[17] 姜琳,边金虎,李爱农,等.岷江上游 2000—2010 年土壤侵蚀时空格局动态变化[J].水土保持学报,2014,28(1):18-25.

[18] 龚雪梅,冯文兰,郑杰,等.岷江上游土壤侵蚀敏感性评价[J].干旱区资源与环境,2017,31(9):68-74.

[19] 彭文甫,张冬梅,罗艳玫,等.自然因子对四川植被 NDVI 变化的地理探测[J].地理学报,2019,74(9):1758-1776.

[20] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.

[21] 章文波,谢云,刘宝元.中国降雨侵蚀力空间变化特征[J].山地学报,2003,21(1):33-40.

[22] 张恩伟,彭双云,冯华梅.基于 GIS 和 RUSLE 的滇池流域土壤侵蚀敏感性评价及其空间格局演变[J].水土保持学报,2020,34(2):115-122.

[23] 张科利,彭文英,杨红丽.中国土壤可蚀性值及其估算[J].土壤学报,2007,44(1):7-13.

[24] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope length effects on soil loss for steep slopes[J].Soil Science Society of America Journal,2000,64(5):1759-1763.

[25] 刘斌涛,宋春风,史展,等.西南土石山区土壤流失方程坡度因子修正算法研究[J].中国水土保持,2015(8):49-51.

[26] 蔡崇法,丁树文,史志华,等.应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J].水土保持学报,2000,14(2):19-24.

[27] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,等.密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J].资源科学,2004,26(4):153-159.

[28] 黄凤琴,第宝锋,黄成敏,等.基于日降雨量的年均降雨侵蚀力估算模型及其应用:以四川省凉山州为例[J].山地学报,2013,31(1):55-64.

[29] 王潇,刘汉湖,吴冰.四川境内赤水河流域上中游水土流失时空变化研究[J].河南理工大学学报:自然科学版,2019,38(3):70-80.

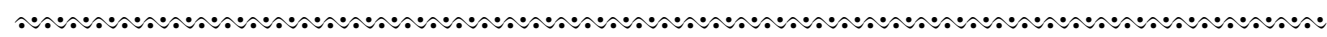
[30] 祝聪,彭文甫,张丽芳,等.2006—2016 年岷江上游植被覆盖度时空变化及驱动力[J].生态学报,2019,39(5):1583-1594.

[31] 黄木易,岳文泽,方斌,等.1970—2015 年大别山区生态服务价值尺度响应特征及地理探测机制[J].地理学报,2019,74(9):1904-1920.

[32] 王晓峰,张明明,尹礼唱,等.2000—2015 年中国干旱半干旱地区沙漠化进程驱动力研究[J].生态环境学报,2019,28(5):948-957.

[33] 贺倩,杨雪琴,戴晓爱.2010—2015 年三江源地区植被净初级生产力变化特征及影响因素分析[J].长江科学院院报,2020,37(5):59-66.

[34] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准 SL190—2007[S].北京:中国水利水电出版社,2008.



(上接第 84 页)

[19] Guo H L, Sun L Q, Wu S F, et al. Erosion evolution processes and hydraulic characteristics analysis of fish-scale pit slop on Loess Plateau region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017,54(5):1125-1135.

[20] McColl K A, Alemohammad S H, Akbar R, et al. The global distribution and dynamics of surface soil moisture[J]. Nature Geoscience, 2017,10(2):100-104.

[21] Vereecken H, Huisman J A, Pachepsky Y, et al. On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale [J]. Journal of Hydrology, 2014,516:76-96.

[22] Di Prima S, Concialdi P, Lassabatere L, et al. Laboratory testing of Beerkan infiltration experiments for assessing the role of soil sealing on water infiltration[J]. Catena, 2018,167:373-384.

[23] Hou X K, Li T L, Vanapalli S K, et al. Water percolation in a thick unsaturated loess layer considering the ground-atmosphere interaction [J]. Hydrological Processes, 2019,33(5):794-802.

[24] 宋小林,吴普特,赵西宁,等.黄土高原肥水坑施技术下苹果树根系及土壤水分布[J].农业工程学报,2016,32(7):121-128.

[25] 李虹辰,赵西宁,高晓东,等.鱼鳞坑与覆盖组合措施对陕北旱作枣园土壤水分的影响[J].应用生态学报,2014,25(8):2297-2303.

[26] 李萍,朱清科,赵磊磊,等.黄土丘陵沟壑区鱼鳞坑雨季土壤水分状况[J].农业工程学报,2011,27(7):76-81.

[27] Guo H L, Zhang B L, Hill R L, et al. Fish-scale pit effects on erosion and water runoff dynamics when positioned on a soil slope in the Loess Plateau region, China[J]. Land Degradation & Development, 2019,30(15):1813-1827.

[28] 宋小林,赵西宁,高晓东,等.黄土高原雨水集聚深层入渗(RWCI)系统下山地果园土壤水分时空变异特征[J].应用生态学报,2017,28(11):3544-3552.

[29] 吴发启,赵西宁,余雕.坡耕地土壤水分入渗影响因素分析[J].水土保持通报,2003,23(1):16-18.

[30] 马蒙蒙,林青,徐绍辉.不同因素影响下层状土壤水分入渗特征及水力学参数估计[J].土壤学报,2019,57(2):347-358.