

DOI: 10.5846/stxb202011303064

陈伟, 李亚新, 王红阳, 王佳, 孙从建. 黄土丘陵区坡耕地与撂荒地土壤水分对降雨的响应特征. 生态学报, 2022, 42(1): 332-339.

Chen W, Li Y X, Wang H Y, Wang J, Sun C J. Dynamic response characteristics of soil moisture on slope cultivated land and abandoned land to different rainfall intensities in Loess hilly region. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 332-339.

# 黄土丘陵区坡耕地与撂荒地土壤水分对降雨的响应特征

陈 伟<sup>1,2</sup>, 李亚新<sup>1,2</sup>, 王红阳<sup>1,2</sup>, 王 佳<sup>1,2</sup>, 孙从建<sup>1,2,\*</sup>

1 山西师范大学地理科学学院, 临汾 041000

2 山西省资源环境信息化管理院士工作站, 临汾 041000

**摘要:**为了揭示黄土丘陵区不同土地覆被方式下土壤含水量对不同强度降雨的响应过程,选取山西省冯家沟小流域农耕地和撂荒地作为研究对象,基于 2019 年 4—10 月降雨和土壤含水量以小时为单位的观测数据,分析了土壤含水量对不同强度降雨的响应规律。结果表明:(1)小雨、中雨、大雨和暴雨对土层的影响深度分别为 20、20、60 cm 和 60 cm,研究区降雨最主要的形式—小雨对土壤水分的补给作用较小。(2)各强度降雨过程中,除 0—10 cm 土层外,农耕地土壤含水量均大于撂荒地,且大雨条件下农耕地各土层土壤含水量变化较显著,而撂荒地仅 0—10 cm 和 10—20 cm 土层土壤含水量有所增加。(3)不同土层土壤含水量对降雨的响应不同,表层响应相对明显而深层相对减弱;农耕地土壤平均含水量最大值出现在 50—60 cm 土层,而撂荒地出现在 30—40 cm 土层。(4)本地区农耕地土壤含水量高于撂荒地,表明在该地区适当的作物种植有较好的储存土壤水分的作用。本研究的结果对地区水资源的高效利用和水土流失防控提供了一定的科学依据。

**关键词:**黄土丘陵区;农耕地;撂荒地;土壤水分;降雨

## Dynamic response characteristics of soil moisture on slope cultivated land and abandoned land to different rainfall intensities in Loess hilly region

CHEN Wei<sup>1,2</sup>, LI Yaxin<sup>1,2</sup>, WANG Hongyang<sup>1,2</sup>, WANG Jia<sup>1,2</sup>, SUN Congjian<sup>1,2,\*</sup>

1 School of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Linfen 041000, China

2 Shanxi Provincial Resources and Environment Information Management Academician Workstation, Linfen 041000, China

**Abstract:** In order to reveal the response process of soil water content to different rainfall intensities under different land cover modes in Loess hilly region. This study selected the cultivated land and abandoned land in Fengjiagou small watershed of Shanxi Province as the research objects. Based on the observation data of rainfall and soil water content in hours from April to October 2019, the response of soil water content to different rainfall intensities was analyzed. The results showed that: (1) The influence depths of light rainfall, moderate rainfall, heavy rainfall and torrential rainfall on soil layer were 20, 20, 60 cm and 60 cm, respectively. The main form of rainfall—light rainfall had little effect on soil moisture in the study area. (2) During each rainfall intensity, except 0—10 cm soil layer, the soil water content of the cultivated land was higher than that of abandoned land, and the soil water content of each soil layer in the cultivated land changed significantly under heavy rainfall conditions, while the soil water content of abandoned land was only increased in 0—10 cm and 10—20 cm soil layers. (3) The content of soil water among soil layers had different response to rainfall, and the response of surface

**基金项目:**山西省回国留学人员科研资助项目(2020-092);山西省留学回国人员科技活动择优资助项目(2020020);山西省高校科技创新项目(2020L0240);山西师范大学研究生双语课程建设计划项目(YJSSY201904)

收稿日期:2020-11-30; 网络出版日期:2021-08-17

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: suncongjian@sina.com

soil moisture was more responsive than that of the deep soil water content. The maximum average soil water content appeared in 50—60 cm soil layer in the cultivated land, while the abandoned land appeared in the 30—40 cm soil layer. (4) The soil water content of the cultivated land was higher than that of the abandoned land, indicating that appropriate crop planting in this region had a better role in storing soil moisture. The results of this study provide a scientific basis for the efficient utilization of regional water resources and the prevention and control of soil erosion.

**Key Words:** Loess hilly region; cultivated land; abandoned land; soil moisture; rainfall

土壤水分是干旱半干旱地区植物稳定生长的主要限制因子,是维持农业可持续发展的关键,同时也是影响土壤—植被—大气水循环的重要环节<sup>[1]</sup>。土壤水分受地形、降雨、土壤物理性质和植被等因素的影响往往呈现出显著的地域差异<sup>[2]</sup>。其中,降雨作为土壤水分的重要补给来源,其变化会对区域土壤水分特征产生显著的影响<sup>[3]</sup>。黄土丘陵沟壑区是我国旱作农业的主要分布区之一,其农业的发展对大气降水具有较强的依赖性<sup>[4]</sup>。近年来,随着气候变化及人类活动的双重影响,土壤水分的分布、运移及降雨对其产生的影响日趋复杂化<sup>[5]</sup>。认识并系统分析不同强度降雨对土壤水分的影响已成为区域生态环境治理、农业高质量发展的迫切需要。

土壤水分的补给和运移对降雨的响应与土壤水文特性和降雨特性紧密相关,并直接影响流域水文过程和植被的生长、稳定与生态功能<sup>[6]</sup>。目前国内外研究者关于不同土地覆被方式下土壤水分动态变化和不同强度降雨对土壤水分渗透深度的研究在西南喀斯特地区<sup>[7-8]</sup>、西北荒漠区<sup>[9]</sup>、华东丘陵区<sup>[10]</sup>等地区开展了部分工作。在喀斯特地区的研究表明植被类型差异对土壤含水量的影响不同,例如贵州省西南部花江小流域的研究发现小雨事件中浅层土壤含水率火龙果地最高,其在大雨事件中土壤含水率增长最少,而花椒地、金银花地和荒地则刚好呈现相反趋势<sup>[7]</sup>;在贵州省西南部关岭县的研究发现降雨时耕地至草地恢复阶段土壤水分上升幅度增大,而草地至灌丛阶段土壤水分上升幅度减小<sup>[8]</sup>。在西北荒漠区的研究发现不同强度降雨土壤水分变化存在显著差异,乌兰布和沙区的研究表明随着降雨量的增加对土层的影响深度也呈增加的趋势<sup>[9]</sup>。在华东丘陵区的研究发现土壤含水率变化和降雨量有较好的线性关系且相关性较强,随着降雨量的增加其相关性减弱<sup>[10]</sup>。在黄土高原地区,尽管相关的研究开展较少,但亦有研究者针对于陕北地区开展了部分工作,如在陕北羊圈沟小流域的研究表明土壤水分对不同强度降雨的响应存在显著差异,小降雨几乎不会引起深层土壤水分的波动,而大降雨后土壤水分会出现明显的阶梯式抬升<sup>[11]</sup>;在陕北纸坊沟小流域的研究显示降雨量对土壤水分的影响较明显,土壤含水量在雨季升高,非雨季降低<sup>[12]</sup>。上述研究丰富了对土壤水分动态变化规律的认识,也为区域水土资源的合理利用提供了重要理论支持,然而现有的研究对于黄土高原东部丘陵沟壑区土壤水分的动态变化涉及甚少。该区域地处季风区边缘,近年来气候变化致使降水的波动性日益显著。在此背景下,该区域不同土地利用下土壤水分空间变化规律以及其对降水波动响应机制已经成为区域农业管理、生态保护部门密切关注的焦点问题<sup>[13]</sup>,迫切需要开展相关的研究工作。

基于此,本文选取黄土高原东部的山西省冯家沟小流域作为典型研究区,以农耕地和撂荒地作为研究对象,系统分析了不同强度降雨下 0—60 cm 土壤水分的动态变化规律,以期为黄土丘陵区水土资源利用提供科学依据。

## 1 研究区概况

本研究选取黄土丘陵区的山西省冯家沟水土保持站(农耕地和撂荒地)作为典型研究区,其基本情况见表 1。该研究区地理位置为北纬 35°57',东经 110°48',海拔 1038.7 m,地势西北高东南低,冲沟发育,流域内地貌以剥蚀中低山区和中间冲刷沟谷为主。气候属于暖温带半干旱大陆性季风气候,年平均气温 9.9℃,最低气温为-19.8℃,最高气温为 38℃,无霜期 150 d,年降雨量 631.8 mm,年蒸发量高达 1749.4 mm。本研究区土壤

类型以褐土为主,植被主要分布有芦草(*Agropyron mongolicum*)、苍耳(*Xanthium sibiricum Patrín ex Widde*)、狗尾草(*Setaria Beauv*)等天然植被和刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)等人工植被<sup>[14–15]</sup>。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic information of experimental sample plots

样地类型 Sample plots	坡度 Gradient/(°)	坡向 Aspect/(°)	盖度 Coverage/%	容重 Bulk density/ (g/cm <sup>3</sup> )	孔隙度 Porosity/%
农耕地(谷子) Cultivated land	15	180	25	1.30	51.42
撂荒地 Abandoned land	15	180	17	1.34	49.08

## 2 数据来源及方法

本研究开展于 2019 年 4 月—10 月,在研究区内同一地形条件下分别设有面积为 20 m×20 m 的农耕地(谷子)和撂荒地,为保证其土壤水分互不干扰之间建 50 cm 水泥围埂,同步比较不同层次土壤含水量。在空旷地设置虹吸式自记雨量计观测每次降雨过程,记录降雨量(mm)、降雨历时(min)和降雨强度(mm/h)等指标。参考国家气象局规定,凡日雨量在 10 mm 以下称为小雨,10—25 mm 为中雨,25—50 mm 为大雨,50—100 mm 为暴雨<sup>[16]</sup>。利用 ECH<sub>2</sub>O 土壤含水量监测系统(美国 METER 公司)对土壤水分进行连续监测<sup>[17]</sup>,该监测系统通过测量土壤的电介常数来计算土壤体积含水量,测量范围 0—100%,测量精度在±3%以内<sup>[18]</sup>。在农耕地和撂荒地中部分别挖取深度为 60 cm 和 100 cm 的土壤剖面,从上到下按照每 10 cm 一个深度,分别安装 5TM 土壤水分传感器。利用 EM50 数据采集器每隔 1 小时连续记录监测土壤体积含水量,为了与农耕地进行对比本文只选用撂荒地 0—60 cm 数据。

采用 Excel 和 SPSS 对数据进行统计和分析,利用 Origin 2017 软件作图,采用单因素方差分析分别对农耕地和撂荒地不同土层下土壤含水量进行差异性比较( $P<0.05$ )。

## 3 结果与分析

### 3.1 降雨特征

研究区 2019 年 4 月—10 月共发生 65 次降雨事件,总降雨量 586 mm,单次最小降雨量为 0.1 mm,最大为 71.1 mm。单次降雨量<10 mm 降雨次数最多,共发生 49 次,占总降雨次数的 75.38%,总降雨量 145.6 mm,占总降雨量的 24.85%;50—100 mm 的降雨事件次数最少,仅有 2 次,占总降雨次数的 3.08%,降雨量为 127.1 mm,占总降雨量的 21.69%(表 2)。

表 2 各量级降雨特征

Table 2 Rainfall characteristics of various magnitudes

降雨类型 Rain type	降雨次数 Rainfall frequency	占总降雨 次数的比例 Percentage of total rainfall/%	总降雨量 Total rainfall/mm	平均降雨量 Average rainfall/mm	占总降雨量的比例 Percentage of total rainfall/%
小雨 Light rain	49	75.38	145.6	2.97	24.85
中雨 Moderate rain	8	12.31	120.9	15.11	20.63
大雨 Heavy rain	6	9.23	192.4	32.07	32.83
暴雨 Rainstorm	2	3.08	127.1	63.55	21.69
总计 Total	65	1	586	—	1

### 3.2 不同强度降雨后土壤含水量的动态变化

我们选择了 4 场典型无干扰的独立降雨事件,即每场降雨在 24 小时内结束,且降雨前后 2 天内均无降雨发生,以时间为横轴,土壤含水量为纵轴,得到各土层土壤含水量对降雨响应的变化曲线(图 1)。

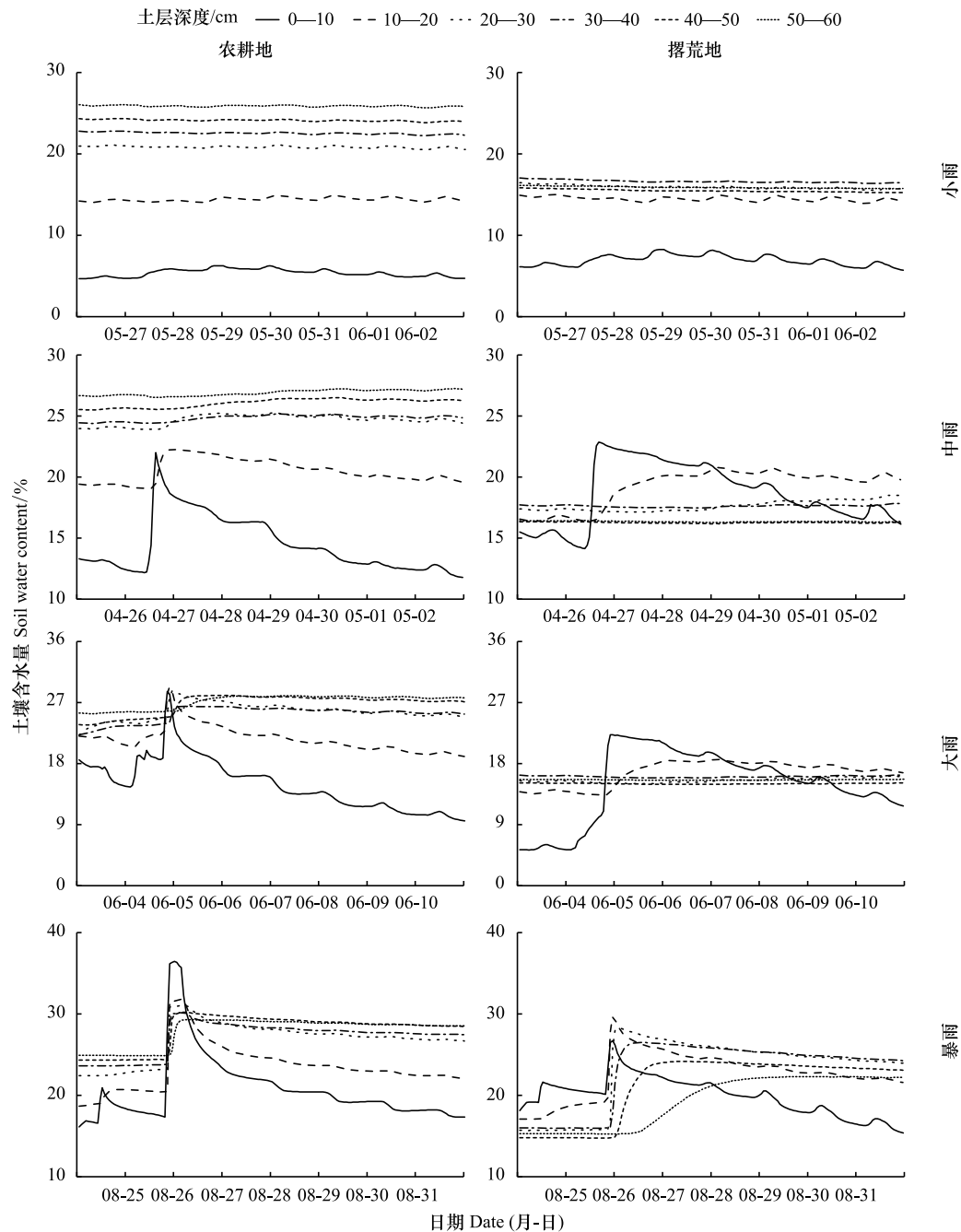


图1 不同强度降雨土壤含水量动态曲线

Fig.1 Dynamic curve of soil water content in different rainfall intensity

5月28日此次降雨累计雨量为4.4 mm,小雨条件下农耕地和撂荒地各土层土壤含水量变化趋势相似,均表现为0—10 cm和10—20 cm土层呈波动变化,而其余土层几乎看不到变化。该场降雨仅对表层土壤水分产生了影响,基本没有发生对深层土壤水分的补充。

4月27日此次降雨累计雨量为16.6 mm,中雨条件下农耕地0—10、10—20 cm和20—30 cm土层土壤含水量分别增加了9.78%、3.15%和1.21%,对降雨响应明显,而其余土层土壤含水量的增加不足1%,对降雨的响应较弱;撂荒地0—10、10—20 cm和20—30 cm土层土壤含水量分别增加了8.4%、3.73%和1.25%。农耕地和撂荒地均表现为0—10 cm土层土壤含水量率先达到峰值,而10—20 cm和20—30 cm土层有滞后现象。

6月5日此次降雨累计雨量为32.2 mm,大雨条件下农耕地各土层土壤含水量均发生了明显的变化,0—10、10—20、20—30、30—40、40—50 cm和50—60 cm土层土壤含水量分别增加了10.05%、4.03%、3.96%、2.43%、3%和2.15%;撂荒地0—10 cm土层土壤含水量急剧上升,增加了16.98%,10—20 cm土层土壤含水量上升相对缓慢,增加了5.09%,其余土层土壤含水量的增加不是很明显。值得注意的是,大雨条件下降雨前0—10 cm土层土壤含水量农耕地远大于撂荒地,降雨过程中农耕地各土层土壤含水量均产生明显变化,而撂荒地仅0—10 cm和10—20 cm土层产生波动。

8月26日此次降雨累计雨量为71.1 mm,暴雨条件下农耕地各土层土壤含水量对降雨均出现了明显的响应,分别使0—10、10—20、20—30、30—40、40—50 cm和50—60 cm土层土壤含水量增加了19.11%、11.21%、7.87%、6.34%、5.81%和4.34%,且0—10 cm土层土壤含水量率先达到峰值,随着土层深度的增加土壤含水量峰值依次减小;撂荒地各土层土壤含水量对降雨也均出现了明显的响应,分别使0—10、10—20、20—30、30—40、40—50 cm和50—60 cm土层土壤含水量增加了6.56%、10.2%、12.3%、10.41%、9.18%和6.9%。

### 3.3 不同土地覆被方式下土壤含水量差异性分析

土地覆被方式通过改变下垫面性质及降雨的再分配过程而影响土壤水分的运移<sup>[19]</sup>,为进一步揭示不同土地覆被方式下土壤含水量的差异,本文选取4场典型降雨事件,采用独立样本T检验,对比分析不同强度降雨下农耕地和撂荒地土壤含水量,结果发现:除小雨条件下10—20 cm土层、大雨条件下0—10 cm土层和暴雨条件下0—20 cm土层外,农耕地和撂荒地各土层土壤含水量差异显著( $P<0.05$ ),具体表现为0—10 cm土层农耕地小于撂荒地,而其余土层均为农耕地大于撂荒地(图2)。

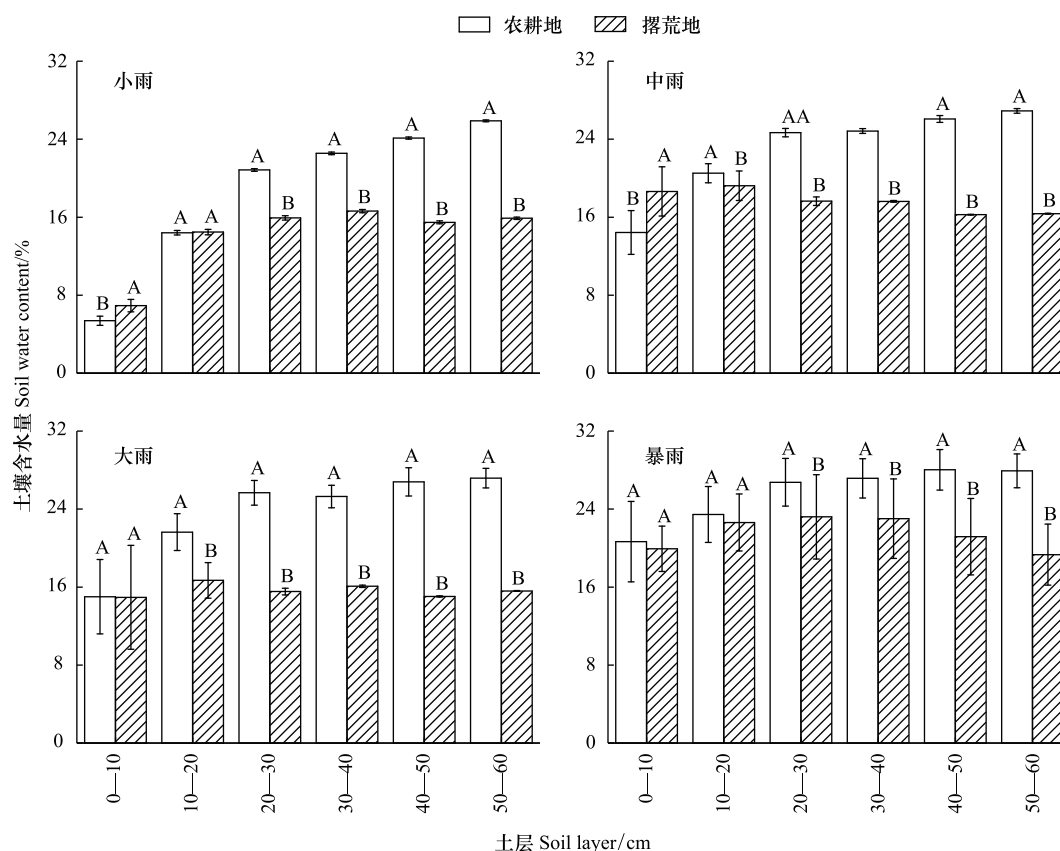


图2 不同土地覆被土壤含水量差异

Fig.2 Differences in soil water content of different land covers

不同大写字母表示同一土层不同土地覆被方式下土壤含水量差异显著( $P<0.05$ )



3.4 不同土层土壤含水量变化特征

表 3 为 4 场典型降雨事件下农耕地和撂荒地不同土层土壤含水量变化特征,农耕地土壤含水量变化范围为 4.65%—36.46%,土壤平均含水量在 50—60 cm 土层最大,0—10 cm 土层最小;随着土层深度的增加土壤含水量有增大的趋势而变异系数呈减小的趋势。撂荒地土壤含水量变化范围为 5.27%—29.7%,土壤平均含水量最大值出现在 30—40 cm 土层(18.34%),最小值出现在 0—10 cm 土层,为 15.1%;随土层深度的增加变异系数有减小的趋势。不同土地覆被方式下,土壤含水量变异系数均随土层深度的增加而减小,表明表层土壤水分对降雨的响应显著,而深层土壤水分对降雨的响应明显减弱。

表 3 不同土层土壤含水量变化特征  
Table 3 Variation characteristics of soil water content in different soil layers

样地类型 Sample plots	土层 Soil layer/cm	最大值 Max/%	最小值 Min/%	平均值 Average/%	标准差 Standard deviation/%	变异系数 Coefficient of variation/%
农耕地 Cultivated land	0—10	36.46	4.65	13.88	6.26	45.11
	10—20	31.78	14.05	20.01	3.84	19.2
	20—30	31.07	20.52	24.49	2.63	10.74
	30—40	30.22	22.23	24.96	2.02	8.08
	40—50	30.23	23.69	26.26	1.91	7.28
	50—60	29.29	24.87	26.97	1.25	4.62
撂荒地 Abandoned land	0—10	26.7	5.27	15.1	5.99	39.64
	10—20	29.7	13.36	18.25	3.57	19.58
	20—30	28.3	15.03	18.08	3.76	20.81
	30—40	26.49	15.88	18.34	3.43	18.71
	40—50	24.17	14.77	16.99	3.14	18.5
	50—60	22.3	15.26	16.79	2.16	12.85

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 不同强度降雨对土壤含水量的影响

黄土丘陵区地下水埋藏深,降雨成为该地区土壤水分的最主要来源。本研究发现,随着降雨量的增加,土层的响应深度也呈增加的趋势。这是因为表层土壤含水量小,小降雨就能对其产生明显的补充作用,而深层土壤含水量较高,湿润前沿的水力梯度较小,水的渗透力较低,降雨量足够大时才能对其产生影响<sup>[20—21]</sup>。

研究期间共发生 65 次降雨事件,其中小雨 49 次,占总降雨次数的 75.38%,小雨仅使表层土壤水分产生了波动,对深层土壤水分的补充作用较弱。但许多研究都预测未来小降雨事件发生的频率会越来越少,将使表层土壤趋于干旱化,而大降雨事件会越来越多,大降雨能够使更多的水分渗透到深层土壤,对深层土壤水分产生明显的补充作用,将改变土壤剖面的水分分布格局<sup>[22—23]</sup>,土壤水分的改变可能使得植物群落结构发生显著变化。

4.1.2 不同土地覆被方式下土壤含水量的差异

除 0—10 cm 土层外,各强度降雨过程中农耕地土壤含水量均大于撂荒地,一方面是因为农耕地植被盖度较撂荒地高,植物根系的生长使得土壤孔隙增加,降雨通过这些孔隙入渗到土壤,另一方面植被盖度高,增加了地表粗糙度,使得降雨不容易很快产生径流,从而补充到土壤当中<sup>[24]</sup>。撂荒地植被盖度较低,土壤孔隙相对紧密,不利于水分的入渗,此外撂荒地表面枯枝落叶较少,雨滴直接击溅土壤表层对其产生一定的破坏,也不利于水分的入渗,使得撂荒地土壤含水量处于相对较低水平<sup>[25]</sup>。

值得注意的是,大雨条件下降雨前 0—10 cm 土层土壤含水量农耕地远大于撂荒地,这可能是由于撂荒地

植被盖度低,且正值夏季蒸发作用强烈,另一方面可能是由于谷子正处于生长期,0—20 cm 土层中根系表面积占总根系表面积的 80%,根系集中在表层,储存了大量的水分,虽也有强烈的蒸发但水分的消耗远小于水分的存储,致使表层土壤含水量较高<sup>[26]</sup>。

此外,大雨条件下农耕地各土层土壤含水量变化都比较明显,而撂荒地仅 0—10 cm 和 10—20 cm 土层土壤含水量产生了波动。撂荒地深层土壤含水量受降雨影响波动不大,这可能与降雨历时和降雨强度有关,撂荒地植被覆盖度低,历时久、强度大的降雨对地表直接击溅,表层土孔隙少,易发育土壤结皮,易产生径流<sup>[27]</sup>。

#### 4.1.3 不同土层深度土壤含水量的差异

在一次降雨过程中,表层土壤水分对降雨的响应显著,深层土壤水分对降雨的响应明显减弱,这是因为表层土壤水分的下渗受毛管力和重力的双重影响,随着土层深度的增加毛管力不断减小,土壤入渗速度减慢,最后仅在重力作用下缓慢下渗。受降雨量和入渗的影响,深层土壤水分能够得到的补给十分有限<sup>[28]</sup>。

各强度降雨过程中,农耕地土壤平均含水量最大值出现在 50—60 cm 土层而撂荒地出现在 30—40 cm 土层。这可能与土壤黏化淀积层分布差异有关,农耕地受人为影响较大,化肥的施用增加了土壤中可以优先淋洗的低价态离子,降雨后土壤水分显著高于撂荒地,这些因素结合在一起使农耕地的黏化淀积层比天然的撂荒地深,而撂荒地黏化淀积层的存在,阻碍了水分的入渗速度,同时也影响了水分在土层中的运移方向和含量。有研究表明,撂荒地黏化淀积层中中壤和重壤居多,较为紧实,降雨后,雨水沿着土壤孔隙在重力作用下垂直入渗,到达该层时水分很难入渗,发生侧向流动,导致水分在其上层聚集,形成壤中流<sup>[29—31]</sup>。

目前来说我们的观测时间相对较短,而以上分析需要多年降雨及土壤水分等数据予以支撑。通过上述分析可结合天气预报,预测未来不同强度降雨下土壤水分变化情况,从而提供准确的农业气象服务,为黄土高原丘陵沟壑区缓解干旱提供重要理论依据。

#### 4.2 结论

通过分析黄土丘陵区农耕地和撂荒地土壤含水量对不同强度降雨的响应特征,得出以下结论:

(1) 不同强度降雨下,小雨、中雨、大雨和暴雨对土壤水分的影响深度分别为 20、20、60 cm 和 60 cm,土壤水分受小雨的补给十分有限。

(2) 不同土地覆被方式下,除 0—10 cm 土层外,农耕地土壤含水量均大于撂荒地;大雨条件下降雨前 0—10 cm 土层土壤含水量农耕地远大于撂荒地;大雨条件下农耕地各土层土壤含水量变化都比较明显,而撂荒地仅 0—10、10—20 cm 和 20—30 cm 土层土壤含水量产生了波动。

(3) 不同土层深度下,降雨对各土层土壤水分的影响差异显著,随着土层深度的增加,降雨的补充作用减弱;农耕地土壤平均含水量最大值出现在 50—60 cm 土层,而撂荒地出现在 30—40 cm 土层。

#### 参考文献 (References):

- [1] 王正宁,王新平,刘博. 荒漠灌丛内降雨和土壤水分再分配. 应用生态学报, 2016, 27(3): 755-760.
- [2] 刘苑秋,郭圣茂,王红胜,李靖,孙建军. 退化石灰岩红壤区四种人工林旱季土壤水分的空间变异. 土壤学报, 2010, 47(2): 229-237.
- [3] 张少康. 黄土丘陵区降水变化对草地群落土壤水分及其利用效率的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [4] 姜娜,邵明安. 黄土高原小流域不同坡地利用方式的水土流失特征. 农业工程学报, 2011, 27(6): 36-41.
- [5] 程立平,刘文兆. 黄土塬区几种典型土地利用类型的土壤水稳定同位素特征. 应用生态学报, 2012, 23(3): 651-658.
- [6] 王正安,邸利,王彦辉,李振华,韩新生. 六盘山半干旱区华北落叶松林土壤水分对降雨的响应. 干旱区资源与环境, 2018, 32(4): 144-151.
- [7] 景建生,刘子琦,李渊,王进,罗鼎,蔡路路. 石漠化治理区不同植被类型浅层土壤水分对降雨的响应. 灌溉排水学报, 2020, 39(3): 100-109.
- [8] 孙智妍. 喀斯特坡地植被恢复的土壤水分效应及其影响因素研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2020.
- [9] 李新乐,吴波,张建平,辛智鸣,董雪,段瑞兵. 白刺沙包浅层土壤水分动态及其对不同降雨量的响应. 生态学报, 2019, 39(15): 5701-5708.
- [10] 葛波,杜妍,常猛,李嘉欣,刘超,庄家尧. 不同降雨等级下杉木林土壤含水率和侧向流变化特征. 水土保持研究, 2019, 26(2):

161-166.

- [11] 姚雪玲, 杨国靖, 王帅, 郭秀江. 黄土丘陵沟壑区不同深度土壤水分对降雨的响应及其稳定性. 干旱区地理, 2021, 44(2): 507-513.
- [12] 赵佰礼, 穆兴民, 高鹏, 赵广举, 孙文义, 田鹏. 黄土丘陵沟壑区不同退耕草地土壤水分研究. 水土保持研究, 2019, 26(4): 111-115.
- [13] 毕华兴, 刘立斌, 刘斌. 黄土高原沟壑区水土流失综合治理范式. 中国水土保持科学, 2010, 8(4): 27-33.
- [14] 孙从建, 侯慧新, 陈伟, 杨伟, 郑振婧. 黄土丘陵沟壑区典型农作物产流产沙效应研究. 水土保持研究, 2020, 27(2): 99-103, 111-111.
- [15] 孙从建, 侯慧新, 陈伟, 杨伟, 郑振婧. 典型黄土塬区不同植物措施水土保持效应分析. 自然资源学报, 2019, 34(7): 1405-1416.
- [16] 白盛元. 黄土土柱降雨特征与土壤水分入渗过程研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [17] 杨凯悦, 贾志清, 李清雪, 何凌仙子, 戴捷, 陈娟. 高寒沙地典型人工林土壤水分动态及其对降雨的响应. 生态环境学报, 2019, 28(9): 1757-1766.
- [18] 陈涛, 卓嘎, 拉巴. 那曲东部土壤水分 MODIS 遥感反演研究. 土壤通报, 2017, 48(2): 298-303.
- [19] 郭军庭, 张志强, 王盛萍, 张建军, Peter S. 黄土丘陵沟壑区小流域基流特点及其影响因子分析. 水土保持通报, 2011, 31(1): 87-92.
- [20] 李卓, 刘永红, 杨勤. 土壤水分入渗影响机制研究综述. 灌溉排水学报, 2011, 30(5): 124-130.
- [21] Liu H, Lei T W, Zhao J, Yuan C P, Fan Y T, Qu L Q. Effects of rainfall intensity and antecedent soil water content on soil infiltrability under rainfall conditions using the run off-on-out method. Journal of Hydrology, 2011, 396(1/2): 24-32.
- [22] Knapp A K, Beier C, Briske D D, Classen A T, Luo Y Q, Reichstein M, Smith M D, Smith S D, Bell J E, Fay P A, Heisler J L, Leavitt S W, Sherry R, Smith B, Weng E S. Consequences of more extreme precipitation regimes for terrestrial ecosystems. Bioscience, 2008, 58(9): 811-821.
- [23] Thomey M L, Collins S L, Vargas R, Johnson J E, Brown R F, Natvig D O, Friggens M T. Effect of precipitation variability on net primary production and soil respiration in a Chihuahuan Desert grassland. Global Change Biology, 2011, 17(4): 1505-1515.
- [24] 舒茂, 何国清. 地表植被覆盖与土壤大孔隙对地表径流影响实验分析. 江苏科技信息, 2015, (21): 75-78.
- [25] 鲍彪, 毕华兴, 云雷, 高路博, 许华森, 安云. 晋西黄土区刺槐林地土壤水分对降雨的响应. 北京林业大学学报, 2012, 34(2): 84-89.
- [26] 张喜英, 籍贵苏. 谷子根系生长发育规律及其在土壤中分布的动态模拟. 华北农学报, 1997, 12(3): 83-87.
- [27] 李海防, 史梅容, 王金叶, 赵连生, 王绍能, 赵苒. 广西猫儿山毛竹林不同层次土壤含水量的降雨响应. 水土保持研究, 2016, 23(5): 120-123, 128-128.
- [28] 杨帆, 刘志军, 马忠秋, 张万军, 唐常源. 太行山低山丘陵区坡地人工刺槐林降雨入渗及造林技术研究. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 172-174.
- [29] 黄敬. 不同水土保持措施对土壤水分及地表径流的影响. 中国新技术新产品, 2017, (10): 88-89.
- [30] 吴胡强, 邵永昌, 庄义琳, 张金池, 韩诚, 刘鑫, 庄家尧. 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. 浙江农林大学学报, 2014, 31(5): 683-689.
- [31] 王鹰翔, 张金池, 刘鑫, 薛雪, 赵文瑞, 王金平, 吴胡强. 苏南丘陵区毛竹林坡面土壤水分对降雨的响应. 水土保持通报, 2016, 36(1): 22-26, 32-32.