

黄丘区典型灌木和荒草地土壤含水量变化对 降雨的响应

吴远菲^{1,2}, 肖培青², 郝仕龙¹, 杨春霞²

(1.华北水利水电大学 测绘与地理信息学院, 郑州 450046;

2.黄河水利科学研究院 水利部黄土高原水土保持重点实验室, 郑州 450003)

摘 要:为了研究不同土地利用方式下土壤水分的变化特征及其对降雨的响应,以黄丘区辛店沟流域坡面径流小区灌木和荒草地为研究对象,利用多探头土壤水分监测仪对研究对象 0—50 cm 土层土壤水分进行了连续定位观测,对不同下垫面下土壤水分的变化特征进行了系统的分析和研究。结果表明:(1) 不同土地利用方式土壤水分表现出明显的季节变化特征,观测期内荒草地的平均土壤含水量为 0.099,大于灌木地 0.091,荒草地的土壤含水量总体要高于灌木地。(2) 不同土地利用方式土壤含水量垂直变化趋势相似,总体上随着土层深度的增加而减少,具有明显的垂直变异性,灌木地对深层土壤含水量的消耗比荒草地多。(3) 土壤含水量在垂直方向上对降雨的响应程度随着土层深度的增加而减小,灌木地和荒草地垂直方向上 0—30 cm 土层与 30—50 cm 土层对降雨响应表现为相反的规律。研究认为相比荒草地,灌木地土壤水分消耗更严重,且深层土壤水分受降雨补给有限,易引发土壤干层。

关键词:土壤含水量; 土地利用方式; 野外定点监测; 降雨; 黄土丘陵区

中图分类号:S157.2; S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)04-0121-06

Response of Soil Moisture of Typical Shrubland and Waste Grassland to Precipitation in the Loess Hilly-Gully Region

WU Yuanfei^{1,2}, XIAO Peiqing², HAO Shilong¹, YANG Chunxia²

(1.College of Surveying and Geo-Informatics, North China University of Water Resources and

Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2.Key Laboratory of Soil and Water Conservation on

the Loess Plateau of MWR, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: In order to study the variation characteristics of soil moisture and its response to precipitation in different land use patterns, the EM50 soil moisture data collector was used to continuously measure soil moisture in 0—50 cm soil layers of shrubland and barren grassland in slope runoff plot of the Xindiagou watershed in the loess hilly-gully region, and the variation characteristics of soil moisture in different underlying surfaces were systematically analyzed and studied. The results showed that: (1) the soil moisture of different land use patterns showed obvious seasonal variation characteristics; during the observation period, the average soil moisture of the barren grassland was 0.099, the average soil moisture of the shrubland was 0.091, and the soil moisture of the barren grassland was generally higher than that of the shrubland; (2) the vertical change trends of soil moisture in different land use patterns were similar, and generally decreased with the increase of soil depth, with obvious vertical variability; shrubland consumed more deep soil water content than barren grassland; (3) the vertical response of soil moisture to precipitation decreased with the increase of soil depth; the response of the 0—30 cm soil layer and 30—50 cm soil layer in the vertical direction of shrubland and waste grassland to precipitation was opposite. This research suggests that compared with waste grassland, shrubland consumes more soil moisture, and the deep soil moisture is limited by precipitation, which can easily lead to dry soil layers.

收稿日期:2021-08-09

修回日期:2021-08-30

资助项目:国家自然科学基金黄河水科学研究联合基金(U2243210);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(HKY-JBYW-2020-09)

第一作者:吴远菲(1997—),女(满族),河南南阳人,在读硕士研究生,研究方向为水土保持。E-mail:18864515918@163.com

通信作者:肖培青(1972—),女,河南卫辉人,博士,教授级高工,主要从事土壤侵蚀与水沙变化研究。E-mail:peiqingxiao@163.com

Keywords:soil moisture; land use mode; field fixed-point monitoring; precipitation; loess hilly-gully region

土壤水分是生态系统水循环的重要组成部分,在生态和水文过程中具有重要的作用,关系到区域生态系统的稳定和可持续发展^[1]。在水资源短缺的黄土高原地区,土壤水分对植被生长、生态格局和调控的演变以及退化植被的恢复起着重要作用^[2]。土壤水分受降雨、入渗和蒸散发等水文过程的影响,具有显著的时空变化特征^[3]。地表植被类型会改变降雨分配、雨水下渗和蒸散发过程,从而对土壤水分的年内分配和降雨补给特征产生巨大影响^[4-5]。因此,研究不同土地利用类型下的土壤水分年内变化特征及其对降雨的响应过程,有助于深入认识不同植被类型土壤水分消耗规律,从而对区域水资源合理利用和植被重建提供理论依据。

黄土高原是我国的生态屏障,也是黄河泥沙最主要来源。近年来,为控制水土流失,开展了以退耕还林还草等为代表的一系列水利水保措施,经过多年退耕还林还草,黄土丘陵区产生了多种土地利用方式,对土壤水分产生了影响^[6],极大地减少了泥沙入黄。然而,一些研究发现,人工恢复植被对土壤水分的消耗与自然植被相比,消耗增加,且一些研究发现,过度的水分消耗甚至引发土壤干层,严重威胁植被可持续^[7-9]。近年来,对黄土高原地区土壤水分变化问题的研究已经取得一系列的成果^[10-11],这些研究均认为不同植被类型下的土壤水分动态特征与剖面分布具有明显差异^[12-15]。关于研究土壤水分对降雨的响应,部分学者通过对黄土高原地区单一类型土地利用方式下的土壤水分进行野外连续监测,表明不同深度土层土壤水分对降雨的响应时间不同,深层土壤含水量较浅层变化有一定的滞后和延长,体现出土壤水分入渗的先后过程^[16-19]。也有学者通过降雨模拟试验方法,研究土壤水分在降雨过程中的规律,发现降雨仅增加各土层中的土壤水分,对各层间土壤水分在整体土层范围中土壤水分的占比影响较小^[20]。

2.2 试验设计

土壤水分数据通过 Em50 多探头土壤水分监测仪连续监测获得,监测仪分别布设于两个小区中部,仪器5个土壤水分探头分别布设于 10,20,30,40,50 cm 土层

近期,一些相关的研究分析了土壤水分随时间、垂直空间动态变化规律,但野外不同利用方式连续长期定位观测的研究不多,而且不同植被类型土壤水分对降水响应的研究相对较少。因此本文在黄土高原腹地的辛店沟流域,选取当地最为典型的两种植被类型(柠条灌木地和撂荒休闲地)为对象,在采用多探头土壤水分监测仪连续定位观测两种植被类型 0—50 cm 土壤含水量的基础上,系统分析两种典型土地利用类型剖面土壤水分的年内变化规律及其对降雨的响应过程,以期为对区域水资源合理利用和植被重建提供科学支持。

1 研究区概况

研究区位于陕西省绥德县无定河流域辛店沟试验场(110°15′—110°20′E,37°27′—37°32′N),该区梁峁起伏,沟壑纵横,土地贫瘠,地形破碎,属于黄土丘陵沟壑区第一副区,是典型的梁状黄土丘陵沟壑区。辛店沟小流域面积约 1.44 km²,地貌以梁、峁、坡为主,沟壑密度 7.26 km/km²,气候为温带大陆性半干旱季风气候,年平均气温 9.7℃,年平均降水量 486 mm(70%以上集中于 6—9 月且多以暴雨形式出现),土壤类型主要为黄绵土(约占 65%),年均土壤侵蚀模数 1.8 万 t/km²。

2 材料与方法

2.1 观测样地设置

经过实地勘察,选择在绥德辛店沟流域育林沟径流试验场布设 Em50 多探头土壤水分监测仪。植物柠条(*Caragana korshinskii*)具有蒸腾速率低、抗逆性强等特点,被广泛用于干旱半干旱地区的生态重建和植被恢复中,撂荒草地具有较好的控制水土流失作用,因此选择柠条灌木地和多年撂荒草地土壤水分变化过程进行对比分析。样地基本特征见表 1。

表 1 样地基本情况

样地类型	坡度/(°)	坡向	坡长/m		均宽/m	面积/m ²		整地方式	株行距/m	株高/m	盖度/%
			水平	倾斜		水平	倾斜				
灌木地	25	北偏西 14°	20	22.53	5	100	112.7	坡地	1.0×1.0	1.20	72
撂荒草地	25	北偏西 14°	20	22.53	5	100	112.7	坡地		0.45	85

处,传感器水平插入到安装深度,对土壤水分进行连续定位观测,5 个探头沿着一条直线垂直分布,土壤水分的观测频率为 60 min/次。降雨过程参数通过雨量计测定获取,两类数据均持续连续观测。

2.3 数据处理

数据均用 Microsoft Excel 和 Origin 2018 统计分析软件进行数理统计分析与制图。利用变异系数 CV 表示土壤水分垂直分布的稳定性。变异系数 CV 和标准差 s 的计算公式分别为:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}}$$
$$s = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

式中:CV 为变异系数; s 为标准差; \bar{x} 为算术平均数; n 为样本个数; x_i 为第 i 个样本的值。

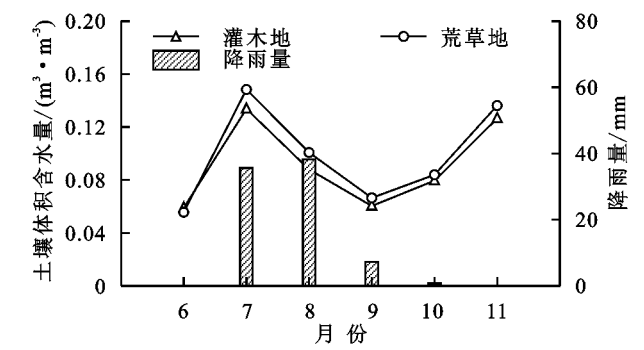
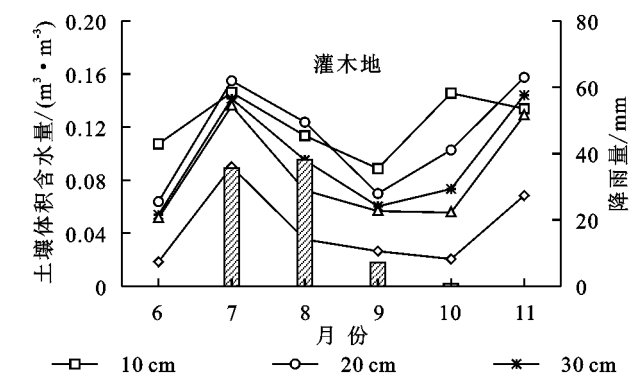


图1 不同土地利用方式 0—50 cm 土层土壤含水量时间变化过程

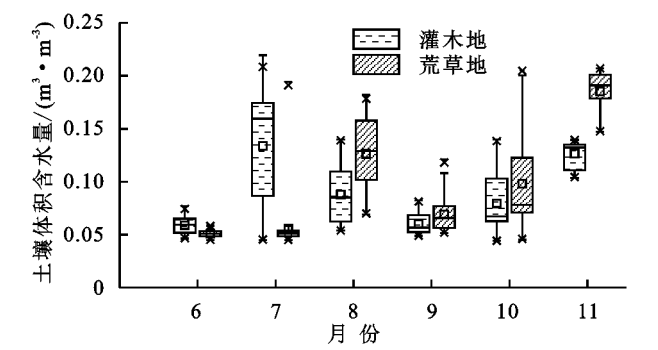
如图 2 所示,由于降水具有一定的季节性,不同土地利用方式 0—50 cm 土层土壤含水量具有明显的季节变化特征,灌木地平均土壤含水量最多是 7 月和 11 月,



3 结果与分析

3.1 不同地类土壤水分的年内时间变化特征

如图 1 所示,2020 年 6—11 月对灌木地、荒草地 0—50 cm 土壤含水量进行连续动态监测发现,灌木地 0—50 cm 土层各月平均土壤含水量分别为 0.059, 0.134, 0.088, 0.060, 0.080, 0.126, 荒草地 0—50 cm 土层各月平均土壤含水量分别为 0.056, 0.148, 0.101, 0.066, 0.084, 0.136, 总体来说荒草地的平均土壤含水量大于灌木地,说明草类植被耗水小于灌木。



分别为 0.134, 0.126, 最少的是 6 月、9 月,为 0.059, 0.060; 而荒草地平均土壤含水量最多是在 7 月和 11 月,分别为 0.148, 0.136, 6 月、9 月最少,为 0.056, 0.066。

图2 不同土地利用方式 0—50 cm 各土层土壤含水量时间变化过程

不同土地利用方式下的土壤水分变化有所不同,除了与降水有关,还因为不同土地利用方式的植物蒸腾、消耗和土壤蒸发不同^[21]。研究区柠条从 5 月中旬到 6 月中旬快速生长达到展叶盛期;6 月下旬到 8 月初果实成熟;其后 9 月中旬生长速度减缓进入落叶硬化期^[22]。在观测期间 6 月份样地未有降雨,此时柠条进入速生期,所需水量日渐增加,气温回升,土壤蒸发旺盛,加之雨季未到,不能及时补充土壤蒸发等因素造成的土壤水分消耗,此时土壤含水量处于较低水平;7—9 月两种土地利用方式土壤含水量变化剧烈,7 月土壤含水量较 6 月份快速增加,一方面是因为 6 月份植物生长处于速生期需水量大,另一方面 7

月份降水 35.6 mm 土壤水分得以补充;8 月份柠条生长处于旺季,加上夏季地表温度高,表层土壤水分蒸发量大,植被蒸散发强烈,因此土壤水分较 7 月份有所降低;9 月份,气温逐渐降低,土壤蒸发明显减弱,且植被生长速度减缓进入生长期末,耗水减少,加上雨季逐渐减退,降水量日渐减少,且 9 月和 10 月份有少量降雨对土壤水分进行了补充,因此 9 月份之后植物进入休眠期后整体上土壤含水量呈缓慢增加的趋势,11 月份达到一个小峰值,说明降雨对土壤水分的补充存在滞后。荒草地土壤含水量各月的变化趋势与灌木地相似,夏季草类植物也进入生长旺季,加上荒草地表层植被生物量少,地面蒸散发强烈,因此土

壤含水量也表现出较低水平;而进入秋冬季节后,气温降低,土壤蒸发明显减弱,植物进入生长期末,土壤水分消耗少,因此荒草地土壤含水量在整个秋冬季节呈现出较高水平。以上分析表明,两种土地利用方式 0—50 cm 土层平均土壤含水量具有明显的季节变化特征,夏季到秋冬季节土壤含水量整体上是随时间的变化呈增加趋势。这部分研究规律与王艳萍等^[23]在

研究黄土塬区不同土地利用方式土壤水分随时间的动态变化特征趋势大致一致。

3.2 不同地类土壤水分垂直剖面分布特征

对研究区两种土地利用方式 2020 年 6—11 月土壤水分垂直变化特征进行观察发现(图 3),土壤水分得到大量补充后又受到高度消耗,其垂直变化表现出不同的特征。

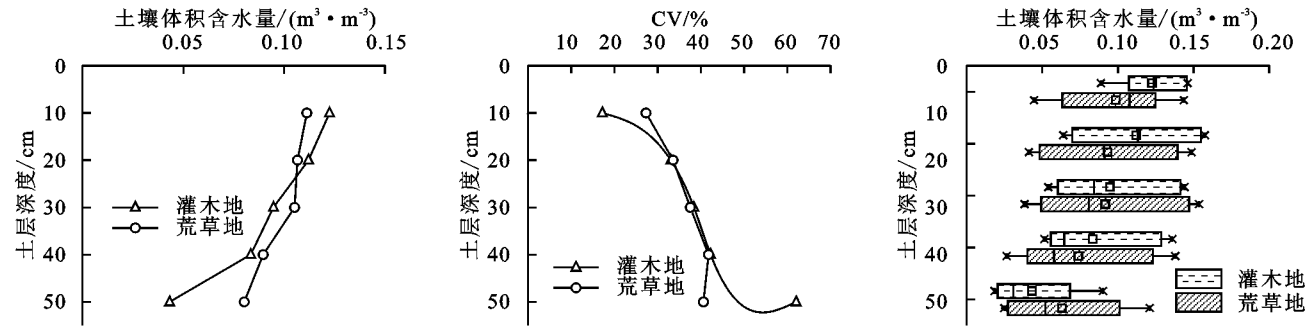


图 3 不同地类土壤水分垂直变异性

灌木地 0—50 cm 土层土壤含水量随土层深度的增加而减少,10,20,30,40,50 cm 的平均土壤含水量分别为 0.122,0.112,0.095,0.083,0.043;荒草地土壤含水量也表现为同样的趋势,各土层的土壤含水量分别为 0.111,0.107,0.105,0.090,0.080。两种土地利用方式 20—40 cm 土层土壤含水量差异不显著,但荒草地 10 cm 处土层 CV 值为 27.31% > 灌木地 CV 值 17.21%,分析其原因,表层土壤含水量既受降雨量的影响,又受植被盖度(影响蒸发)和根系分布的影响^[24],使得土壤含水量变化较大,草本植物的根系生物量分布主要集中在表层土层^[25],因此表层土壤水分变化较灌木地剧烈;在 50 cm 土层处,灌木地土壤含水量急剧减少,CV 值为 62.05% > 荒草地 CV 值 40.60%,在 0—100 cm 土层深度范围内,柠条细根主要分布在 30 cm 土层深度以下,其根重密度和根长密度随土层深度的增加呈相同变化趋势,最大值均出现在 50—60 cm 土层^[26],因此灌木地这部分土层表现出较高的变异性。总体来看,土地利用类型对垂直

方向上土壤含水量的分布特征影响显著,灌木地对深层土壤水分的消耗明显要高于荒草地。

3.3 不同地类土壤水分对降雨过程的响应

通过研究降雨前后两种土地利用方式不同深度土壤含水量随时间的变化特征发现,灌木地和荒草地土壤含水量的动态变化和累计降水量的变化是基本一致的,降水量越大,降水雨量级越高,土壤含水量对降水的响应就越显著。

如图 4—5 所示,7 月份和 8 月份发生了两次大的降水过程,降水量分别为 35.6,34.4 mm,7 月份降水前期研究区没有降雨发生,可以明显观察到降水前期荒草地 0—50 cm 土层土壤含水量稳定在一个较低的水平,变化不大;而灌木地 10 cm 土层土壤含水量略有波动,因为灌木地植被丰富,林下生物量多,表层土壤含水量变化较为活跃;50 cm 土层土壤含水量明显要低于其他土层土壤含水量,这部分土层是柠条细根的集中分布层,植被耗水量较大,这与灌木地土壤水分垂直分布特征一致。

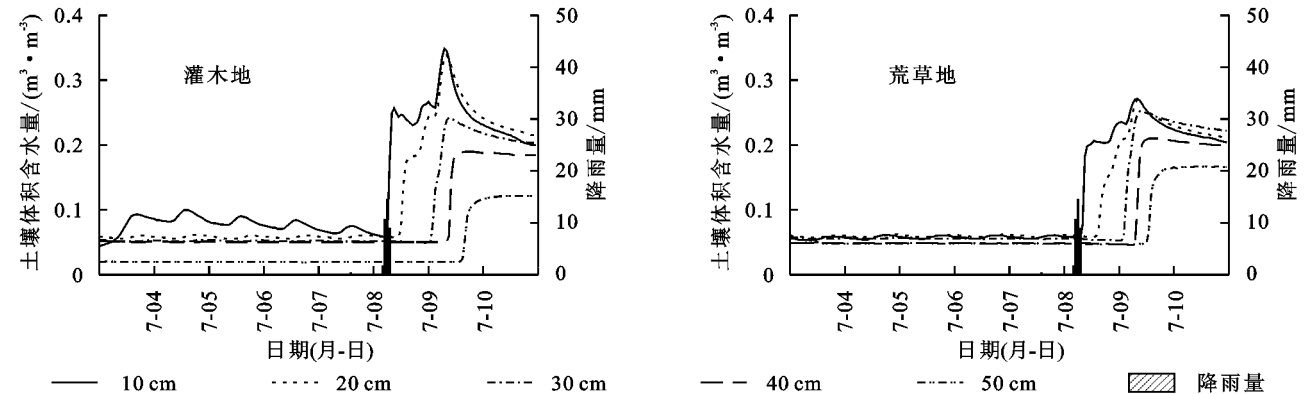


图 4 不同土地利用方式 7 月份土壤含水量变化

当降水入渗到某一土层时,土壤水分传感器会做出响应,在灌木地和荒草地均观测到5个响应,表明这两次降水强度足以入渗到50 cm土层深度,但是各土层对降雨响应的不同,灌木地各土层土壤含水量对降雨的响应时间约为雨后3,8,22,30,35 h,荒草地各土层土壤含水量对降雨的响应时间约为雨后4,11,23,28,33 h,总体表现为浅层土壤含水量对降雨的响应迅速,随着土层深度的增加,土壤含水量对降雨的响应时间也在增加,存在着滞后效应。0—30 cm土层灌木地对降雨的响应时间要小于荒草地,且灌木地受到降雨补充后土壤水分峰值要大于荒草地,分析原因可能是荒草地植被覆盖度比灌木地大,植被生长茂盛,地上生物对降雨有截留作用,降雨到达地面时间增大,到达地面的有效降雨量减少,且这部分是荒草地植物根系分布的主要土层,因此导致荒草地表层土壤水分对降雨的响应时间大于灌木地且土壤水分的有效补给量要小于灌木地;30—50 cm这部分土层中,灌木地土壤含水量对降雨的响应时间要大于荒草地,且土壤水分峰值要略小于荒草地,与表层土壤水分呈现出相反的规律,柠条细根分布在30 cm土层深度以下,其根重密度和根长密度随土层深度的增加呈相同变化趋势,最大值均出现在50—60 cm土层,因此这部分土层受到

柠条根系的吸收作用及下渗作用,导致其对降雨的响应时间和降雨后的土壤水分峰值要小于荒草地。

如图5—6所示,8月份和9月份研究区共发生了19次小降水事件,8月15号的两次小降水事件降雨量分别为0.6,0.2 mm,仅0—20 cm表层土壤水分做出了响应,;9月18—27日发生了陆陆续续的小降雨事件,仅0—10 cm土层土壤含水量对降雨作出了响应,单次降雨量过小,地面生物对降雨有拦截作用,到达土壤表层的有效降雨量有限,难以入渗到更深层次的土层。8月份前期土壤水分分布,灌木地0—50 cm土层土壤含水量大小顺序为:10—20 cm>30—40 cm>20—30 cm>0—10 cm>40—50 cm,7月份降水对土壤水分作了补充,但50 cm处土壤含水量最低,因为此处是柠条细根大量分布的地方,土壤水分消耗较快,而0—10 cm土层受到植被蒸散发和水分蒸发的作用,含水量也较低;荒草地0—50 cm土层土壤含水量大小顺序为:40—50 cm>30—40 cm>20—30 cm>10—20 cm>0—10 cm,降水对土壤水分补充后,荒草地根系分布较浅,深层土壤水分未受到大量消耗,而浅层土壤水分受到草类植被根系吸收和蒸腾作用的影响,导致土壤水分在垂直剖面上从上到下是依次减少的,这一现象也侧面说明了柠条灌木地比荒草地要更耗水。

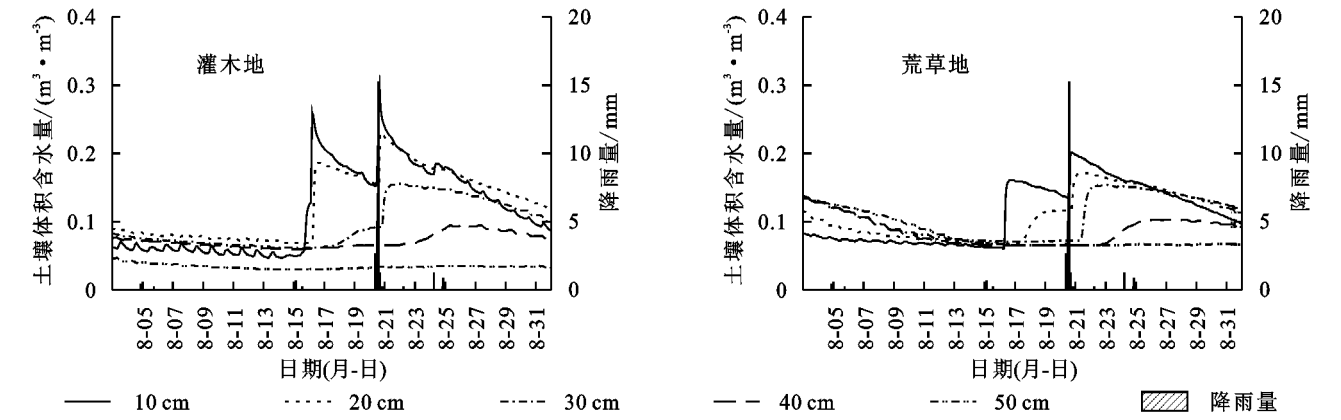


图5 不同土地利用方式8月份土壤含水量变化

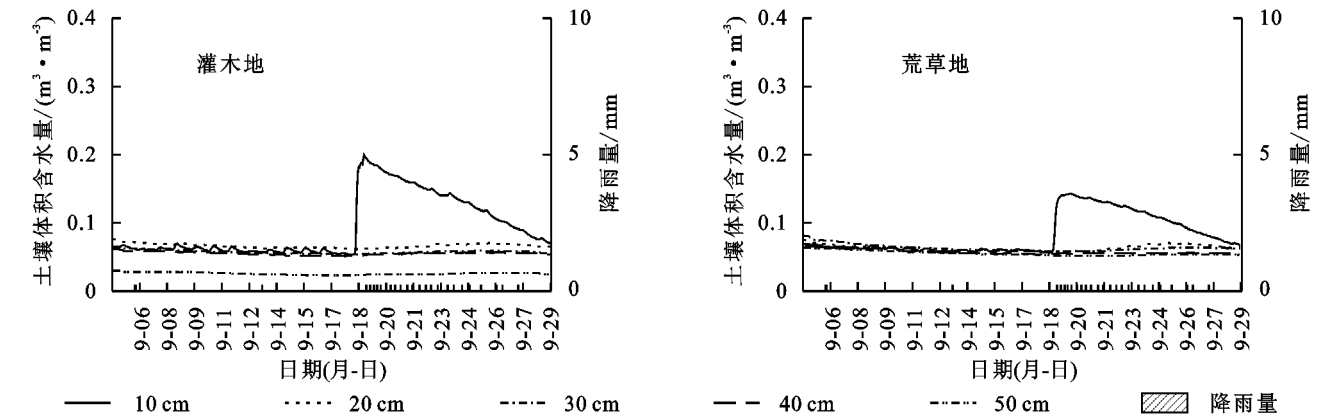


图6 不同土地利用方式9月份土壤含水量变化

4 结论

(1) 不同土地利用方式的土壤含水量表现为明显的时间特征,监测期内两种土地利用方式平均土壤含水量变化趋势相似,土壤含水量随时间的变化与降雨随季节的变化相同,但存在着滞后效应,总体上平均土壤含水量表现为荒草地>柠条灌木地,柠条灌木地比草地更加耗水。

(2) 灌木和荒草地两种土地利用方式 0—50 cm 土层土壤含水量垂直变化趋势相似,总体上随着土层深度的增加而减少,土壤含水量随土层深度的增加变化剧烈,土地利用方式对土壤含水量的垂直分布的变化及其变异性特征有一定的影响;相比荒草地,灌木地对深层土壤水分消耗更多。

(3) 不同土地利用方式土壤含水量受降雨的影响较大,浅层土壤水分对降水的响应迅速,随着土层深度的增加土壤水分对降水的响应时间逐渐增加;灌木地和荒草地垂直方向上各土层对降雨响应也表现为不同规律,灌木地 0—30 cm 土层土壤含水量对降雨的响应时间小于荒草地,且灌木地降雨后的土壤含水量峰值要高于荒草地,而 30—50 cm 土层表现出相反的规律。

不同土地利用方式对土壤水分的变化存在着一定影响作用,本文仅分析了典型的灌木和荒草地土壤含水量变化规律,关于植被恢复重建的其他土地利用方式和大暴雨作用下的深层土壤水分变化特征还需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 白晓,贾小旭,邵明安,等.黄土高原北部土地利用变化对长期土壤水分平衡影响模拟[J].水科学进展,2021,32(1):109-119.
- [2] 李新荣,张志山,王新平,等.干旱区土壤植被系统恢复的生态水文学研究进展[J].中国沙漠,2009,29(5):845-852.
- [3] 戴军杰,章新平,吕殿青,等.南方红壤丘陵区樟树林土壤水分动态变化[J].水土保持研究,2019,26(4):123-131.
- [4] 乔斌,陈国茜,石明明,等.不同土地利用方式下土壤水分动态及对降水的响应:以青海省互助县浅山旱地为例[J].中国农学通报,2020,36(13):115-123.
- [5] 张芳,曾馥平,杜虎,等.喀斯特峰丛洼地不同土地利用方式土壤水分对降水特征的响应[J].生态科学,2019,38(5):38-43.
- [6] 杜康,张北赢.黄土丘陵区不同土地利用方式土壤水分变化特征[J].水土保持研究,2020,27(6):72-76.
- [7] 刘丙霞,任健,邵明安,等.黄土高原北部人工灌草植被土壤干燥化过程研究[J].生态学报,2020,40(11):3795-3803.
- [8] 黄奕龙,陈利顶,傅伯杰,等.黄土丘陵小流域地形和土地利用对土壤水分时空格局的影响[J].第四纪研究,2003,23(3):334-342.
- [9] Wang Y, Liu Z. Large-scale spatial variability of dried

soil layers and related factors across the entire Loess Plateau of China[J]. Geoderma,2010,159(1/2):99-108.

- [10] Yu B, Liu G, Liu Q, et al. Soil moisture variations at different topographic domains and land use types in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. Catena,2018,165:125-132.
- [11] Wang Y, Sun H, Fu Z, et al. Response of deep soil drought to precipitation, land use and topography across a semiarid watershed[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2020,282:107866.
- [12] 唐敏,赵西宁,高晓东,等.黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分变化特征[J].应用生态学报,2018,29(3):765-774.
- [13] 肖列,刘国彬,薛莲,等.黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤水分及地上生物量的影响[J].水土保持通报,2016,36(4):204-209,215.
- [14] 安文明,韩晓阳,李宗善,等.黄土高原不同植被恢复方式对土壤水分坡面变化的影响[J].生态学报,2018,38(13):4852-4860.
- [15] 马婧怡,贾宁凤,程曼.黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分变化特征[J].生态学报,2018,38(10):3471-3481.
- [16] 鲍彪,毕华兴,云雷,等.晋西黄土区刺槐林地土壤水分对降雨的响应[J].北京林业大学学报,2012,34(2):84-89.
- [17] 邹慧,高光耀,朱斌,等.黄土高原恢复草地土壤水分对降水响应及模拟[J].干旱区研究,2020,37(4):890-898.
- [18] 姚雪玲,杨国靖,王帅,等.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[J].干旱区地理,2021,44(2):507-513.
- [19] Chen W, Li Z, Jiao L, et al. Response of soil moisture to rainfall event in black locust plantations at different stages of restoration in hilly-gully area of the Loess Plateau, China[J]. Chinese Geographical Science,2020,30(3):427-445.
- [20] 何子森,肖培青,郝仕龙,等.黄丘区野外坡面土壤水分变化对次降雨过程的响应[J].中国水土保持科学,2018,16(4):16-24.
- [21] 张敏,刘爽,刘勇,等.黄土丘陵缓坡风沙区不同土地利用类型土壤水分变化特征[J].水土保持学报,2019,33(3):115-120,128.
- [22] 王松伟,郭忠升.多年生人工柠条林生长对土壤水分的影响[J].水土保持研究,2020,27(3):70-75.
- [23] 王艳萍,王力,韩雪,等.黄土塬区不同土地利用方式土壤水分消耗与补给变化特征[J].生态学报,2015,35(22):7571-7579.
- [24] 宋乃平,杨明秀,王磊,等.荒漠草原区人工柠条林土壤水分周年动态变化[J].生态学杂志,2014,33(10):2618-2624.
- [25] 冯博.黄土高原北部两种典型草地土壤水分时空分异及对降雨的响应[D].沈阳:沈阳农业大学,2020.
- [26] 李婷婷.荒漠草原柠条沙柳灌木林生长特征与土壤水分关系[D].银川:宁夏大学,2019.