

# 喀斯特地区黄壤坡面土壤水分对降雨的响应

杨志成, 柯奇画, 马芊红, 曹梓豪, 张科利

(地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875)

**摘要:** 土壤水分是喀斯特地区水文生态环境的重要因素。通过在不同土地利用设置试验点, 对降雨和 20, 40, 80, 100 cm 深度土壤水分进行监测分析, 揭示不同土地利用条件下土壤水分在降雨过程中的变化规律。结果表明: (1) 植被盖度、土壤前期贮水量等因素对土壤水分的降雨补给量和土壤水分在土壤剖面上的再分配具有明显的影响。(2) 土壤水分的降雨补给量在土壤剖面上的分布具有一定的层次性, 随土层深度的增加整体表现为先增加后减少再增加的趋势; 表层降雨补给量最小, 最大降雨补给量多出现在 100 cm 深度。(3) 土壤水分对降雨的响应具有滞后效应, 并随土层深度增加而增强, 随盖度增加而减弱。(4) 在降雨影响阶段, 可将土壤水分变化分为滞后期、上升期和消退期 3 个阶段; 降雨过程中, 植被盖度越高, 降雨强度越大, 土壤水分变化越快, 并随着土层深度的增加减缓。研究结果为水资源的合理利用和配置以及水土保持提供参考和理论依据。

**关键词:** 土壤水分; 降雨补给; 再分配; 滞后效应

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)02-0075-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.02.011

## Response of Soil Moisture to Rainfall on Karst Yellow Soil Slope

YANG Zhicheng, KE Qihua, MA Qianhong, CAO Zihao, ZHANG Keli

(State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology,

Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875)

**Abstract:** Soil moisture is an essential variable in hydrology and ecology in karst region. In order to reveal the change rules of soil moisture during rainfall event, we monitored and analyzed the relationship between rainfall and soil moisture contents at 20 cm, 40 cm, 80 cm and 100 cm depth below surface in the grassland, cropland and bare land in Guizhou Province. Soil moisture was monitored by the ECH2O monitoring system and the EM50 data collector. The rainfall amount was collected by HOBO automatic weather station, and its measurement accuracy was 0.2 mm. The results showed that: (1) Vegetation cover, initial soil moisture content and rainfall density showed great influence on rainfall replenishment and redistribution of soil moisture in the soil profile. (2) To a certain extent, soil moisture affected by rainfall replenishment was not uniform in soil profile, which showed an up-down-up trend with the increase of soil depth, and 100 cm layer had the biggest rainfall replenishment compared with other layers. (3) The period in which soil moisture affected by rainfall could be divided into 3 stages: lag stage, rise stage and decline stage; as vegetation cover increased and rainfall density enhanced, the lag stage ended early, and the rise stage and decline stage started early. (4) The hysteresis effect in the lag stage enhanced with the increasing soil depth but receded with the increasing vegetation coverage. These results could provide a reference and theoretical basis for rational utilization and allocation of water resources and soil and water conservation.

**Keywords:** soil moisture; rainfall replenishment; redistribution; hysteretic effect

土壤水是陆地水循环的重要组成部分。土壤水分含量及其变化对生物、气候及地表水文过程都有深

刻的影响<sup>[1]</sup>。西南喀斯特地区地质构造独特, 基岩裂隙发育, 土层薄且不连续, 土壤贮水量时空动态对区

域生态系统的结构、功能和多样性维持更为重要。喀斯特坡地土壤水分除了受降雨过程<sup>[2]</sup>决定外,降雨转化为土壤水分的过程和效率还受基岩裂隙发育程度、土地利用类型及土层厚度等因素影响<sup>[3-5]</sup>。因此,与其他地貌类型区相比,喀斯特地区土壤水消长变化与降雨的关系复杂。目前,虽然对喀斯特地区土壤水与降雨关系的研究较多,但多集中在季节变化或年际变化等尺度上<sup>[5-7]</sup>,而对降雨过程中土壤水分的变化响应关注不多。在降雨过程中,由于降雨强度的不断变化,土壤入渗过程也会随之而变。因此,为了准确计算土壤含水量及坡面径流量,研究土壤水分对降雨过程的响应关系很有必要。本文利用原位监测设备获得的土壤水分随降雨变化过程的数据,研究不同土地利用方式下,黄壤坡面土壤水分随降雨过程的变化规律,以期为合理利用和分配水资源以及水土保持提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验区位于遵义县鸭溪镇(106°37'E,27°37'N),属长江流域乌江水系泮洋水小流域,气候为中亚热带

表 1 不同土地利用的土壤物理性状

土地利用	坡度/(°)	砂粒(0.05~2 mm)/%	粉粒(0.05~0.002 mm)/%	黏粒(<0.002 mm)/%
裸地	15	0.57	56.98	42.44
农地	15	2.06	60.39	37.55
草地	15	1.81	56.61	41.58

### 1.4 数据处理计算

利用 Excel 和 Origin 8.5 软件进行数据处理及制图。根据公式<sup>[8]</sup>计算土壤贮水量。

$$S_i = 10 \theta_i h_i \quad (1)$$

$$S = \sum_i^n S_i \quad (2)$$

式中: $S_i$ 为第*i*层土壤贮水量(mm); $\theta_i$ 为土壤体积含水量( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); $h_i$ 为土层厚度(cm); $n$ 为土层序号; $S$ 为土壤总贮水量(mm)。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同降雨条件下土壤水分的补给

2.1.1 降雨对不同土地利用的补给 国家气象局根据日降雨量将降雨分为小雨(10 mm 以下)、中雨(10.0~24.9 mm)和大雨(25.0~49.9 mm)<sup>[9]</sup>。为此,选择降雨前大于 3 天及降雨后 24 h 内无降雨的大、中、小 3 场典型降雨来分析降雨过程中土壤水分的变化特征。其中,大雨为 2018 年 9 月 17 日的 35.8 mm,中雨为 2018 年 9 月 25 日的 22.8 mm,小雨为 2018 年 10 月 7 日的 9.0 mm 降雨。

由图 1 可知,降雨后 12 h 后土壤各层水分达到相对稳定的状态,故用降雨前 1 h 与降雨后 12 h 土壤贮水量的差值来表征降雨前后土壤的水分补给量,得到不同降

季风湿润气候,多年平均降水量 1 024 mm,降雨多集中在 4—9 月,多年平均气温 14.6 °C。主要植被类型为常绿落叶针阔混交林,土壤类型为黄壤。

### 1.2 降雨监测

降雨数据来源于 HOBO 气象站,数据采集精度为 0.2 mm,自 2018 年 5 月起进行降雨监测。

### 1.3 土壤水分监测

自 2018 年 6 月起在利用 EM50 野外径流小区内的裸地、农地、草地 3 个土地利用小区监测土壤体积含水量。分别在 20,40,60,80,100 cm 土层深度处布设 ECH<sub>2</sub>O 传感器,数据记录频率为 15 min/次,误差 <0.01%。仪器所在小区的处理为:农地按照当地耕作习惯种植玉米,并分别进行整地、播种、中耕、施肥等管理措施。裸地地表植被盖度保持 5% 以下;草地不做任何处理,维持自然状态,主要建群种为苏门白酒草、小飞蓬等。根据观测数据,本文选取典型大、中、小型降雨进行土壤水分特征分析。每次降雨对应小区的盖度为裸地不超过 5%,农地为 70%~80%,草地不低于 90%。不同土地利用土壤物理性质见表 1。

雨条件下的土壤水分补给量(表 2)。在不同降雨条件下,降雨对土壤水分的补给量均表现为草地大于农地和裸地,是裸地和农地的 2~3 倍。同时,土壤水分补给量随着降雨量的增加而增加。在小雨和中雨条件下,土壤降雨补给量随地表盖度的增加而增加。这一实测结果印证了增加植被盖度可以提高降雨转化率,减少地表径流量。而在大雨条件下裸地的降雨补给量大于农地,主要是由于裸地土壤前期贮水量(192.71 mm)与农地表层土壤前期贮水量(251.53 mm)相差较大,裸地具有较大的入渗库容所致。

尽管降雨对土壤水分的补给量随着降雨量、降雨强度和植被盖度的变化而变化,但是在不同降雨条件下,同一土地利用在降雨结束后 12 h 的土壤贮水量差异不大(图 1)。降雨结束后 12 h,裸地土壤贮水量维持在 255~270 mm,农地土壤贮水量维持在在 295~305 mm,草地土壤贮水量最大,维持在 425~440 mm,表明草地的贮水能力大于农地大于裸地。

植被对土壤水分补给的影响主要表现在 3 个方面:一是植被的茎叶具有有效延缓产流时间,降低径流流速<sup>[10-11]</sup>,从而增加降雨入渗的作用;二是植被冠层及地表枯枝落叶除能减少雨滴打击外,还可以防止地表土壤被浸润后,土壤孔隙被堵塞<sup>[12-13]</sup>;三是植物根

系生长所产生的根生性孔隙能提高土壤孔隙度和水分渗透性<sup>[14]</sup>,从而增加降雨入渗率和入渗量。土壤前期贮水量通过影响产流发生的初始时间来影响土

壤水分,随着土壤前期贮水量的增大,坡面发生产流时间越早<sup>[15]</sup>,降雨入渗越少。另外,随着土壤前期贮水量的增加土壤入渗率和入渗能力均有所下降<sup>[16-17]</sup>。

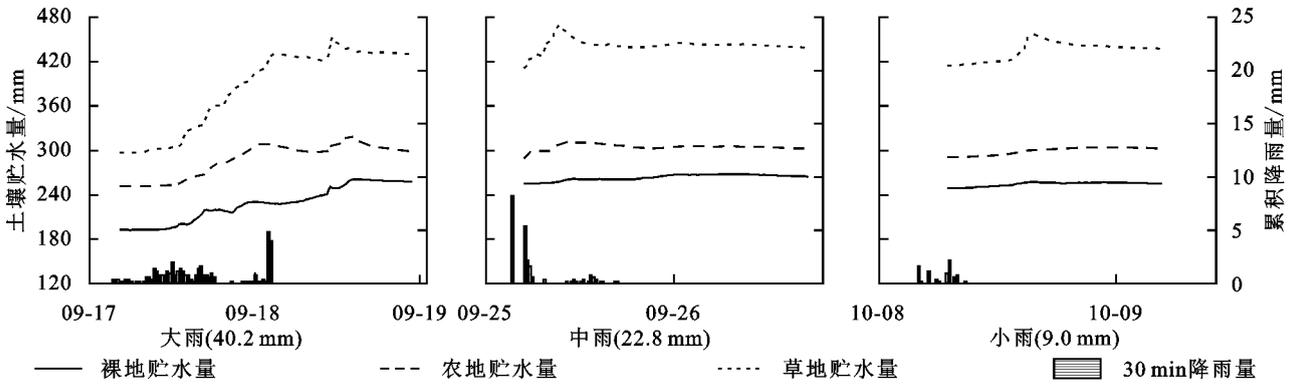


图 1 不同降雨条件下土壤贮水量变化

表 2 不同土地利用土壤水分降雨补给量

单位:mm			
降雨量	裸地	农地	草地
40.2	65.28	47.43	131.92
22.8	10.37	12.58	28.22
9.0	6.12	11.56	22.95

2.1.2 土壤剖面土壤水分的再分配 随着土层深度的增加,土壤容重增加,孔隙度减小<sup>[18]</sup>,导致降雨对土壤水分的补给量在土壤剖面上存在明显分异(图 2)。降雨结束 12 h 后,各土层的降雨补给量随土层深度的增加整体上表现出增加趋势,并且在不同深度降雨补给量增加的量存在一定差异。土壤表层(0—20 cm)总孔隙度较大,非毛管孔隙占比大,土壤透水性较好,持水性较差,土壤贮水能力低,故而降雨补给量较小,主要的作用是将降雨转化为土壤水分。40—

60 cm 土层深度是土壤水分补给的次高值层,该层是植被根系分布的主要部位,由于植被蒸腾耗水作用使该层土壤水分消耗较大,在 40—60 cm 土层深度形成土壤缺水层,土壤入渗库容较大;在降雨过程中能够补给较多的土壤水分,加之该深度是植被根系分布的主要部位,根系的吸水作用及毛细作用往往使得该层的土壤含水量较大<sup>[19]</sup>。80 cm 土层深度根系分布较少,植被从该层补给的水分较少;土壤前期贮水量高于 40—60 cm 土层,土壤入渗库容较小,土壤水分的降雨补给量低于 40—60 cm 土层。

研究区的土层较薄且具有与基岩直接接触的特点,土壤上层的水分通过活塞流形式下渗到深层土壤<sup>[20]</sup>,由于岩石界面的阻挡土壤水分不能继续下渗或者在岩石界面上方形成壤中流是导致土壤水分补给量最大值多出现在 100 cm 深度的主要原因。

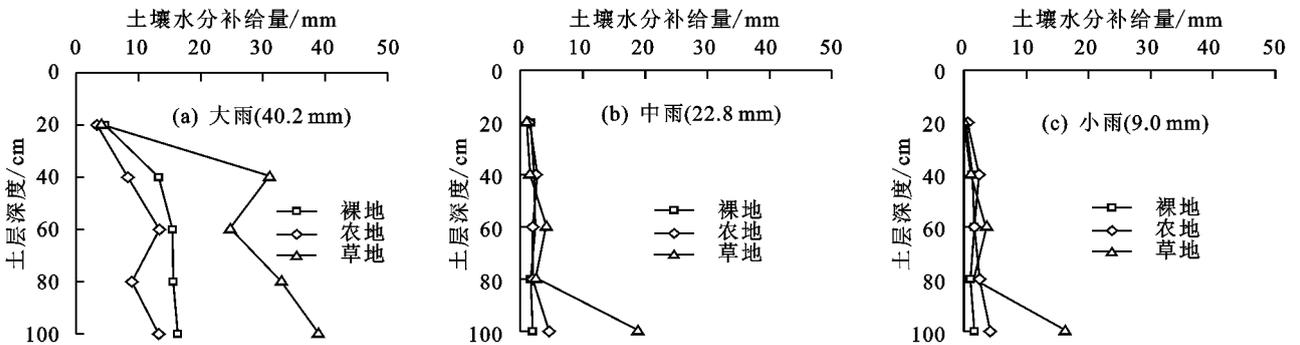


图 2 典型降雨对土壤水分补给量

2.2 土壤水分对降雨的响应

2.2.1 不同土地利用土壤水分对降雨的敏感性 由不同降雨条件下的土壤剖面水分变化(图 3)可知,土壤水分在降雨开始一段时间后才发生变化,并随土层深度的增加土壤水分发生变化的时间延后,表明土壤水分对降雨响应具有一定的滞后效应,且滞后效应随土层深度的增加而增强。土壤水分对降雨响应时间最短,敏感性最高的土层深度是裸地和农地的 0—

40 cm 及草地的 0—60 cm。在这一土层深度范围内,随降雨的变化,土壤水分能够在较短的时间内响应,裸地、农地和草地土壤水分的平均响应时间分别为 1.25,1.67,2.58 h,并能够在降雨过程中随着降雨强度的变化快速发生增减;当土层深度超过这一范围时,由于上层土壤对土壤水分入渗截留,使得深层土壤水分对降雨响应的延迟增长,敏感性也明显降低,在降雨过程中随降雨强度的变化不明显。同一降雨

条件下,草地土壤水分对降雨的响应时间少于农地和裸地,敏感性高于农地和裸地。说明较高植被覆盖度使土壤水分对降雨响应的滞后效应减弱。孙智妍等<sup>[21]</sup>利用径流小区得出较高植被覆盖度使土壤水分对降雨响应的滞后效应增强,与本文结果相反,可能是由于本研究中试验处理的植被高度较低、冠层降雨截留量较小所致。

2.2.2 降雨影响过程中土壤水分的动态变化 根据土壤水分在降雨前、中、后的变化情况(图 3),可将土壤水分变化分为滞后期、上升期和消退期 3 个阶段。就不同土地利用而言,大雨条件下,草地土壤水分滞后期的维持时间比农地和裸地分别短 30,135 min;草地上升期和消退期开始的时间早于农地和裸地。土壤水分入渗是一个由表层逐渐到深层的扩散过程。降雨开始后,表层土壤水分最先发生变化,滞后期最短,上升期最早开

始;随着土层深度的增加,土壤水分滞后期增长,上升期开始时间越晚。整个土壤剖面上,表层土壤水分消退期最先开始,随土层深度的增加,土壤水分消退期开始的时间逐渐延迟。与表层土壤水分上升期之后即是消退期的特点不同,在 100 cm 土层深度,土壤水分在上升期结束后仍能够维持一段时间再进入消退期,说明在这过程中深层土壤仍然受到土壤水的补给作用<sup>[22]</sup>。不同土地利用方式下的土壤水分变化差异明显,草地土壤水分增加的速度明显快于农地和裸地;裸地地表无植被覆盖,雨滴直接打击地面,破坏表层土壤结构,导致表层土壤入渗性能降低。另外,生物性大孔隙如根孔,具有很好的连通性且孔隙直径较大,能加速土壤水分入渗<sup>[14]</sup>。在单一土地利用情况下,随土层深度的增加,土壤水分的增速表现出梯度性差异,表明水分在土壤中的流动并不均匀<sup>[13]</sup>。

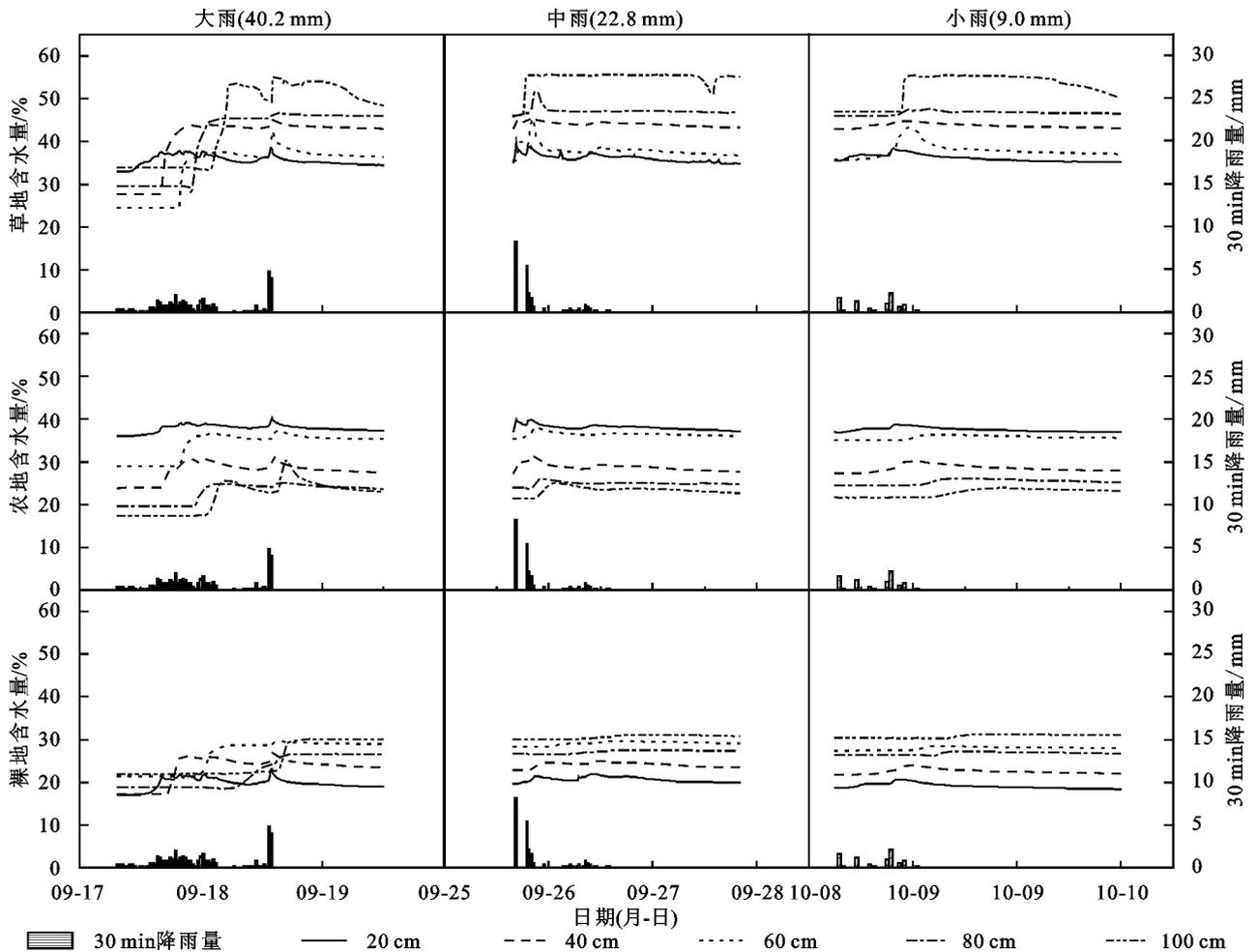


图 3 不同降雨条件下的土壤剖面水分变化

### 3 结论

(1)在不同降雨条件下,随着植被盖度的增加,土壤水分的降雨补给量越大,土壤水分增加的速度越快。土壤前期贮水量可以通过影响土壤入渗库容来影响土壤水分的降雨补给量。

(2)土壤水分的降雨补给量在土壤剖面上的分布具有一定的层次性,随土层深度的增加整体表现为先增加后减少再增加的趋势。表层土壤降雨补给量最小,贮水能力低,在降雨过程中的主要作用是将降雨转化为土壤水分;40—60 cm 土层是植被获取土壤水

分的主要深度,是降雨补给的次高值层,基岩与土壤直接接触,阻挡土壤水分不能继续下渗,导致100 cm土层降雨补给量最高。

(3)土壤水分对降雨的响应具有滞后效应,并随土层深度的增加而增强,由裸地到草地,随植被盖度的增加土壤水分对降雨响应的滞后效应减弱。3种土地利用中,草地对降雨的响应最快,敏感性最高,农地次之,裸地最差。土壤水分对降雨响应最快、敏感性最高的层为裸地和农地的0—40 cm以及草地的0—60 cm。

(4)土壤水分在降雨过程影响阶段,可将土壤水分变化分为滞后期、上升期和消退期3个阶段;草地土壤水分滞后期的维持时间短于农地和裸地,上升期和消退期开始的时间早于农地和裸地。降雨过程中,植被盖度越高,降雨强度越大,土壤水分变化越快,并随着土层深度的增加而减缓。

#### 参考文献:

- [1] Zhao W W, Fang X N, Daryanto S. Factors influencing soil moisture in the Loess Plateau, China: A review[J]. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 2018, 109(3/4): 501-509.
- [2] 傅伟,陈洪松,王克林.喀斯特坡地不同土地利用类型土壤水分差异性研究[J].*中国生态农业学报*, 2007, 27(5): 59-62.
- [3] 孙佳美,余新晓,樊登星.模拟降雨条件下黑麦草对土壤水分入渗的影响[J].*土壤*, 2014, 46(6): 1115-1120.
- [4] 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.
- [5] Zhou Q W, Sun Z Y, Liu X L, et al. Temporal soil moisture variations in different vegetation cover types in Karst areas of Southwest China: A plot scale case study[J].*Water*, 2019, 11(7): 1-24.
- [6] 颜蒙蒙,周洲,王济,等.喀斯特地区土壤水分随降雨的动态变化研究:以贵阳市花溪区为例[J].*中国岩溶*, 2016, 35(4): 446-452.
- [7] 孙永磊,周金星,庞丹波,等.喀斯特断陷盆地不同植被恢复模式土壤水分动态变化[J].*林业科学研究*, 2018, 31(4): 104-112.
- [8] 张瑜,黄明斌.黄土高原不同降雨年型乔、灌木蒸散特征于影响因素[J].*水土保持通报*, 2013, 33(6): 207-212.
- [9] 白盛元.黄土土柱降雨特征与土壤水分入渗过程研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学, 2015.
- [10] 邓景成.灌草植被盖度对产流产沙影响的模拟降雨实验研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学, 2018.
- [11] 李龙,郝明德,肖庆红,等.不同盖度羊草地对水土流失的影响[J].*水土保持通报*, 2016, 36(2): 22-27.
- [12] Li F, Zhao W Z, Liu H. Productivity responses of desert vegetation to precipitation patterns across a rainfall gradient[J].*Journal of Plant Research*, 2015, 128: 283-294.
- [13] 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.
- [14] 彭舜磊,由文辉,沈会涛.植被群落演替对土壤饱和和导水率的影响[J].*农业工程学报*, 2015, 26(11): 78-84.
- [15] 张玉斌,郑粉莉.近地表土壤水分条件对坡面土壤侵蚀过程的影响[J].*中国水土保持科学*, 2007, 5(2): 5-10.
- [16] 解文艳,樊贵盛.土壤含水量对土壤入渗能力的影响[J].*太原理工大学学报*, 2004, 35(3): 272-275.
- [17] 游微,樊军,魏修彬,等.粗质地土壤坡度和前期含水量对土壤侵蚀的影响[J].*水土保持学报*, 2017, 31(4): 19-25.
- [18] 李向富,刘目兴,易军,等.三峡山地不同垂直带土壤层的水文功能及其影响因子[J].*长江流域资源与环境*, 2018, 27(8): 1809-1818.
- [19] 郭小娇,龚晓萍,汤庆佳,等.典型岩溶山坡土壤剖面水分对降雨响应过程研究[J].*中国岩溶*, 2016, 35(6): 630-639.
- [20] Gazis C, Feng X H. A stable isotope study of soil water: Evidence for mixing and preferential flow paths[J].*Geoderma*, 2004, 119: 97-111.
- [21] 孙智妍,周秋文,罗雅雪,等.黄壤径流小区植被覆盖度对土壤湿度的影响[J].*水资源与水工程学报*, 2019, 30(4): 39-46.
- [22] 侯贵荣,余新晓,刘自强,等.不同降雨强度下北京山区典型林地土壤水分时空变化特征[J].*水土保持学报*, 2016, 31(3): 209-215.