

降雨入渗对黄土斜坡土体含水率 时空分布特性的影响

薛强, 唐亚明, 孙萍萍, 毕俊攀

(国土资源部黄土地质灾害重点实验室/中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 为了对降雨入渗引起黄土斜坡土体含水率的变化有较深入的了解, 在陕西省延安市宝塔山选取了一个典型的黄土自然斜坡进行土体含水率和降雨联合监测。监测结果表明, 斜坡土体中的含水率对降雨入渗的响应具有时间上的滞后性与空间上的差异性。当日降雨量达到 10 mm 或 10 d 累计降雨量达到 70 mm 时, 降雨入渗对土体含水率的影响深度小于 1.0 m; 当日降雨量达到 50 mm 或 10 d 累计降雨量达到 140 mm 时, 降雨入渗对土体含水率的影响深度小于 2.0 m。同时, 当小时降雨量达到 10.4 mm 时, 降雨入渗至 0.2 m 的入渗速率为 0.04 m/h, 由 0.2 m 入渗至 1.0 m 的入渗速率为 0.033 m/h, 降雨入渗速率随着土层深度的增加而减小。

关键词: 黄土斜坡; 降雨入渗; 监测; 土体含水率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)02-0053-04

中图分类号: S152.7

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.02.012

Temporal-spatial Distribution of Soil Water Content in Loess Slope Subjected to Rainfall Infiltration

XUE Qiang, TANG Ya-ming, SUN Ping-ping, BI Jun-bo

(Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area, MLR/Xi'an

Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: To understand the variation of soil water content in loess slope due to rainfall infiltration, the soil water content and rainfall were monitored on a typical natural loess slope in Baota Mountain of Yan'an City, Shaanxi Province. The monitoring results showed that there was temporal hysteresis and spatial difference in the responses of soil water content to rainfall infiltration. The impact depth of rainfall infiltration was less than 1.0 m when the daily rainfall was 10 mm or the 10-day cumulative rainfall reached 70 mm. When the daily rainfall was 50 mm or the 10-day cumulative rainfall reached 140 mm, the impact depth was less than 2.0 m. The rate of rainfall infiltration was 0.04 m/h at the shallow depth of 0.2 m and it decreased to 0.033 m/h from the depth of 0.2 m to 1.0 m when the cumulative rainfall reached to 10.4 mm per hour at the study area. The rainfall infiltration rate decreased with the increase of depth.

Keywords: loess slope; rainfall infiltration; monitoring; soil water content

黄土地区斜坡土体含水率的变化主要由降雨入渗引起^[1]。而降雨对土体含水率的影响十分复杂, 这种复杂性一方面来自降雨强度、持续时长、间断时长的不确定性; 另一方面来自黄土斜坡岩性、微观结构、宏观结构的不确定性, 两者的叠加导致降雨入渗速率、入渗深度、土体含水率等呈现出更加复杂的特性^[2]。在没有节理裂隙等快速入渗通道的完整黄土坡体条件下, 降雨的入渗深度是有限的。张士宇等^[3]

利用经验方法计算出降雨在路堤边坡的入渗率为 27 mm/h, 1 h 降雨的入渗深度为 0.4 m, 2 h 降雨的入渗深度为 0.6 m, 12 h 降雨的入渗深度为 2.0 m。詹良通等^[4]通过原位试验的方法得出, 降雨入渗对孔隙水压力或吸力、含水率、土压力和变形的影响主要反应在 2.0 m 之内的土层中。郭迎新等^[5]通过试验得出, 土壤剖面含水率变化规律为双峰型, 降雨对土壤含水率主要影响深度在 0—30 cm 土层; 降雨前后土

收稿日期: 2013-04-18

修回日期: 2013-05-16

资助项目: 中国地质调查局项目“延安市地质灾害监测预警”(1212011140018); 国土资源部野外科学观测研究基地项目

作者简介: 薛强(1979—), 男(汉族), 宁夏回族自治区固原市人, 硕士, 工程师, 主要从事水文地质、工程地质和环境地质的调查和研究工作。

E-mail: xueqiang_79@163.com.

壤含水率的变化主要是受到土壤特性、土壤初期含水率和降水影响。

目前,关于降雨入渗对土体含水率影响的相关研究多以人工降雨模拟试验为主^[6-10],缺乏持续的野外实验监测,因此所得结果具有一定的局限性。针对以上问题,本研究选取陕北延安市一个完整黄土斜坡进行了连续 4 a 的降雨及土体含水率定位监测,分析土体含水率相对于降雨的滞后效应,土体含水率随土层深度的时空变异规律,降雨入渗的影响深度及入渗速率,从野外监测的角度对黄土地区降雨入渗对土体含水率影响的时空特性进行了探讨。

1 监测场概况

监测现场位于陕西省延安市宝塔区宝塔山,该地属半湿润半干旱气候,多年平均降雨量在 500 mm 左右,80%的降雨集中在 5—9 月份。宝塔山地层主要为第四系黄土,上更新统黄土最大厚度为 12.5 m,中更新统黄土最大厚度为 63.6 m,黄土平均厚度在 20~30 m 左右。其中上更新统黄土颗粒成份以粉粒为主,结构疏松,大孔隙发育;中更新统黄土颗粒成份中黏粒含量较高,小于 0.005 mm 粒级 >20%,夹数层古土壤及钙质结核层。

监测场地选择在宝塔山西南部的一个自然坡面

上,坡度约 30°,顺坡向长 46 m,垂直坡向宽 22 m,坡体上部为人工修筑宝塔平台,下部为陡坎,监测区域集水区面积约 558 m²,监测场地内土体完整,未发生滑塌扰动。

2 监测系统布置

监测仪器包括土体含水率监测仪及雨量仪。土体含水率监测选用 AQUA-TEL-TDR 土壤水分仪,通过测量土壤中的水和其它电介质介电常数之间的差异,采用时域反射测试技术测量土体含水率。雨量监测选用 3554WD 自动雨量计,采用翻斗式雨量桶。

为了研究降雨量、入渗率、土体含水率在不同深度的变化曲线与规律,采用开挖探井的方式布置含水率测点,在探井的不同深度放置传感器探头。共开挖探井 4 个,分布于坡体上中下各个部位,单井深度分别为 4.0,8.0,3.0 和 4.0 m,各井内不同深度处共安装 TDR 含水率传感器探头 20 个,同时,在探井附近安装自动雨量计 1 个。表 1 详细列出了不同深度 TDR 含水率探头的安装位置。

所有监测数据均由数据采集器自动采集,本次采集频率为 1 次/h,同时通过 GPRS 网络传输至固定 IP 地址接收,实现了监测数据实时自动采集、自动传输、自动入库等全自动的监测传输系统。

表 1 TDR 含水率探头安装位置

探井编号	TJ ₁				TJ ₂					
测点编号	TDR-1	TDR-2	TDR-3	TDR-4	TDR-5	TDR-6	TDR-7	TDR-8	TDR-9	TDR-10
深度/m	1.0	2.0	3.0	4.0	0.2	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
探井编号	TJ ₂			TJ ₃			TJ ₄			
测点编号	TDR-11	TDR-12	TDR-13	TDR-14	TDR-15	TDR-16	TDR-17	TDR-18	TDR-19	TDR-20
深度/m	6.0	7.0	8.0	1.0	2.0	3.0	1.0	2.0	3.0	4.0

3 结果与分析

3.1 土体含水率相对于降雨的滞后效应

土体含水率和降雨监测自 2008 年 10 月开始,共计监测时间为 4 a。图 1 显示的是由 TJ₂ 剖面的 9 个含水率探头得到的土体含水率的月均值及月累计降雨量随时间变化曲线。由图 1 可见,土体含水率随降雨量的增大而增大,具有明显的正相关关系,但其增大却有滞后效应,如 2009 和 2010 年雨量峰值出现在 8 月,而含水率峰值却出现在 9 月。滞后时间与降雨量、降雨持续时间等因素密切相关,本次选取持续降雨达 6 d 的一种天气情况(2010 年 8 月 28 日至 9 月 26 日)的 30 组数据作滞后效应分析,利用这 30 d 的降雨量与不同深度土体含水率进行相关分析(图 2)。结果表明,持续降雨达 6 d 时,在深度为 0.2 m 的测

点位置,日降雨量与 16 d 后的土体含水率的相关系数升高到最大值;在深度为 1.0 m 的测点位置,日降雨量与 24 d 后的土体含水率的相关系数最大。

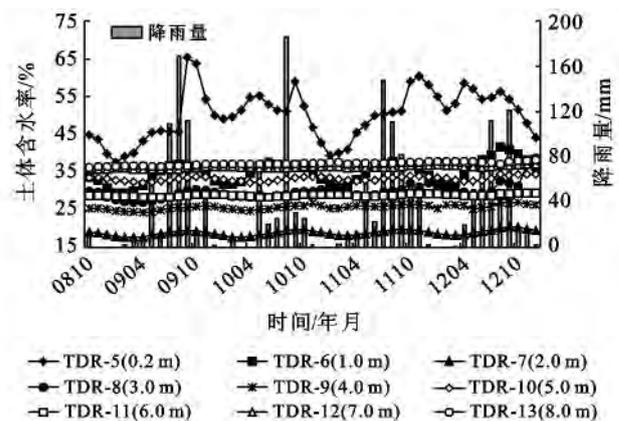


图 1 TJ₂ 剖面处土体含水率对降雨量的响应曲线

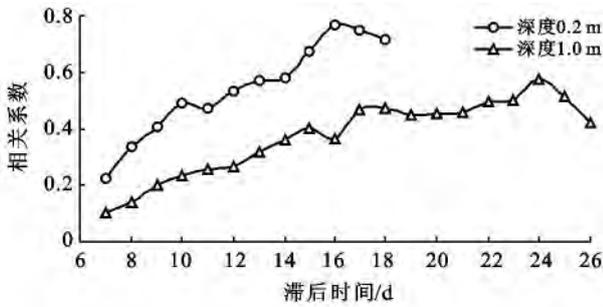


图 2 土体含水率与降雨量的相关系数

3.2 土体含水率随土层深度的时空变化

土体含水率在剖面方向的分布不仅受土体质地、成土母质、容重等自身因素的限制,还受降雨、蒸发、太阳辐射和植被等环境因子的影响^[11]。由 TJ₂ 剖面的 9 个含水率探头得到的土体含水率随土层深度的变化分析可知,随土层深度的增加,土体含水率呈现波动型,在 0—8.0 m 土层深度内共有 3 处波峰点,它们分别位于 3.0、5.0 和 7.0 m 处。对比 2008 年 10 月至 2012 年 4 月所监测的剖面土体含水率随土层深度的变化规律可以发现,表层 0.2 m 的土体含水率随时间变化最大,深度为 1.0 m 的土体含水率随时间变化较大,深度在 2.0—4.0 m 的土体含水率随时间变化较小,而 5.0 m 及以下深度的土体含水率基本不随时间的变化而变化。值得注意的是,在不同的测定时间,剖面土体含水率随土层深度的变化规律基本上是一致的。土体含水率的时间稳定性是指在任意时间内,在一个试验地中对不同的土体水分测点所测得的土体含水率,大者仍大,小者仍小。由于土体水分的空间分布在很大的程度上取决于土体结构,而土体结构是一个相对稳定的因素^[11-12]。同理,对 TJ₁, TJ₃ 和 TJ₄ 剖面土体含水率做同样的分析,它们也具有这样的特征。由此表明,宝塔山坡体剖面土体含水率随土层深度的变化规律具有时间稳定性。

3.3 降雨入渗的影响深度

本研究所指影响深度是指降雨入渗在一定时间内造成土体含水率升高的土层厚度,即降雨入渗至地表以下一定深度的土层厚度。在陕北黄土地区,降雨是土体水分的主要影响因素,斜坡土体中的含水率对降雨入渗的反应具有空间上的差异性。其中深度为 0.2 m 的测点其含水率对降雨入渗的反应最大;深度为 1.0 m 的测点反应较大;深度在 2.0—4.0 m 的测点其含水率对降雨入渗的反应较小;深度为 5.0 m 及以下的各测点含水率不随降雨量的变化而变化。

3.3.1 日降雨量对土体含水率的影响深度 陕北地区年内降雨主要分布在 5—9 月份,因此对 2009 年 8 月 26 日至 9 月 26 日之间的日降雨量与土体含水率进行统计分析(图 3)。结果表明,当日降雨量达到 10 mm

时,降雨入渗造成表层 0.2 m 的土体含水率小幅增加,但具有滞后性,滞后约 2 d;当日降雨量达到 50 mm 时,降雨入渗造成 1.0 m 以上土层中的含水率显著增加,其中 0.2 m 处滞后 1 d,1.0 m 处滞后 3 d,对 2.0 m 及以下深度土层中的含水率的影响较小。

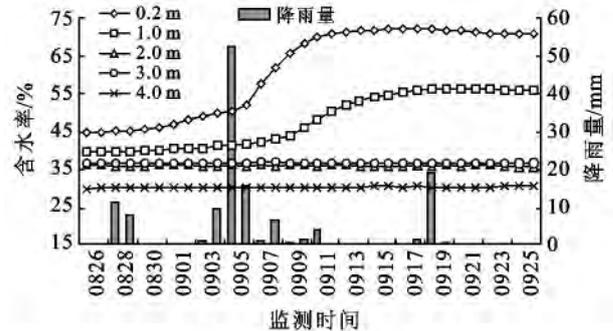


图 3 日降雨量与含水率变化曲线(2008 年)

3.3.2 累计降雨量对土体含水率的影响深度

(1) 根据 2009 年 5 月 15 日至 12 月 25 日的实际监测数据,统计分析 10 d 累计降雨量与土体含水率的关系(图 4)。由图 4 可以发现,10 d 累计降雨量达到 70 mm 时,降雨入渗造成表层 0.2 m 的土体含水率小幅增加;10 d 累计降雨量达到 140 mm 时,降雨入渗造成 1.0 m 以上土层中的含水率显著增加,对 2.0 m 及以下深度土层中的含水率的影响较小。

(2) 根据 2009 年 5 月 20 日至 12 月 20 日的实际监测数据,统计分析 15 d 累计降雨量与土体含水率的关系(图 5)。由图 5 可以发现,15 d 累计降雨量达到 190 mm 时,降雨入渗造成 1.0 m 以上土层中的含水率显著增加,对 2.0 m 及以下深度土层中的含水率的影响较小。

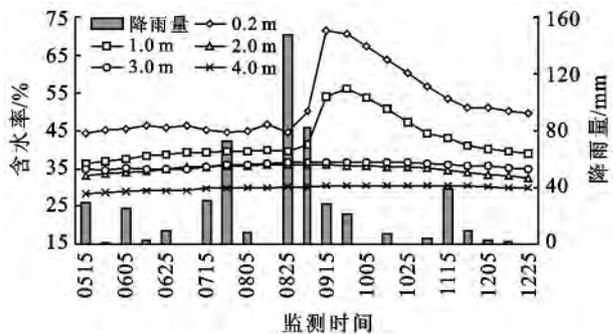


图 4 10 d 累计降雨量与含水率变化曲线(2009 年)

3.4 降雨入渗速率

从 4 a 的监测过程看,由于雨季较短而干燥期较长,各个探井各个深度的 TDR 传感器多数处于稳定状态,即保持一定的含水率不变,当出现一个足够大的降雨量后,传感器所量测的含水率在一定滞后期后即发生变化,通过观察一定深度传感器含水率开始升

高的时刻,即可判断地表降雨入渗到此深度所用的时间,这样根据渗透距离和所需时间,即可计算出渗透速率的大小。

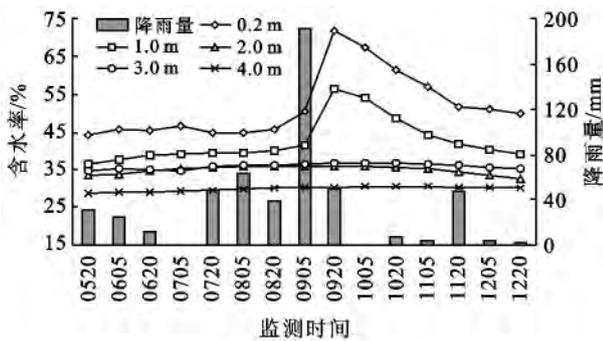


图 5 15 d 累计降雨量与含水率变化曲线(2009 年)

图 6 为 2009 年 9 月 5 日 01:00—2009 年 9 月 18 日 23:00 每小时降雨量与浅层土体含水率的监测曲线。

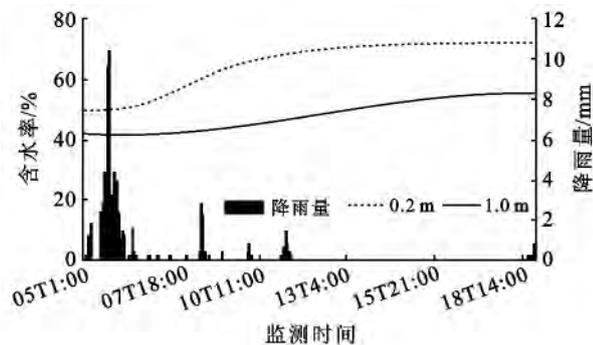


图 6 土体含水率对小时降雨量的响应曲线(2009 年 9 月)

由图 6 可以看出,从小时降雨量达到 10.4 mm 开始,5 h 后深度 0.2 m 处的传感器探测到含水率开始升高,由此可得出 0.0~0.2 m 段的入渗速率为 0.04 m/h。接下来,由 0.2 m 入渗至 1.0 m 的用时为 18 h,可知该段的入渗速率为 0.033 m/h。由此可见,当土体性质、降雨量、降雨持续时间等因素一定时,降雨入渗速率随着土层深度的增加而减小。经回归分析得出:

深度为 0.2 m 处土层中的含水率随时间的拟合方程为: $\theta = -8E - 09h^3 - 0.0004h^2 + 0.2004h + 45.886$ ($R^2 = 0.9804$)

深度为 1.0 m 处土层中的含水率随着时间的拟合方程为: $\theta = -1E - 06h^3 + 0.0007h^2 - 0.045h + 42.085$ ($R^2 = 0.9961$)

式中: θ ——土体体积含水率(%); h ——开始降雨之后经历的时间(h)。

4 结论

(1) 斜坡土体中的含水率对降雨入渗的反应具

有时间上的滞后性与空间上的差异性。当持续降雨达 7 d 时,地表以下 0.2 m 处土体含水率相对于日降雨量的滞后时间为 16 d,在地表以下 1.0 m 处土体含水率相对于日降雨量的滞后时间为 25 d。同时,随土层深度的增加,土体含水率呈现波动型规律,其变化具有时间稳定性。

(2) 当日降雨量达到 10 mm 或 10 d 累计降雨量达到 70 mm 时,降雨入渗对土体含水率的影响深度小于 1.0 m;当日降雨量达到 50 mm 或 10 d 累计降雨量达到 140 mm 时,降雨入渗对土体含水率的影响深度小于 2.0 m。

(3) 当小时降雨量达到 10.4 mm 时,降雨入渗至 0.2 m 的入渗速率为 0.04 m/h,由 0.2 m 入渗至 1.0 m 的入渗速率为 0.033 m/h。当土体性质、降雨量、降雨持续时间等因素一定时,降雨入渗速率随着土层深度的增加而减小。

致谢:李林、陈社斌、裴赢、殷昊、王树丰在野外仪器安装中付出了辛苦的劳动,在此诚表谢意。

[参 考 文 献]

- [1] 张少宏,康顺祥,李永红. 降雨对黄土边坡稳定性的影响[J]. 水土保持通报,2005,25(5):42-44.
- [2] 唐亚明,薛强,毕俊攀,等. 降雨入渗诱发黄土塌塌的模式及临界值初探[J]. 地质论评,2013(1):97-106.
- [3] 张士宇,王瑞钢. 降雨对高填土路堤的入渗深度的确定及有限元稳定分析[J]. 路基工程,2004(5):17-21.
- [4] 詹良通,吴宏伟,包承刚,等. 降雨入渗条件下非饱和膨胀土边坡原位监测[J]. 岩土力学,2003,24(2):151-158.
- [5] 郭迎新,秦大庸,刘家宏,等. 黑龙港地区降雨与土壤含水率的动态变化[J]. 灌溉排水学报,2011,30(1):80-83.
- [6] 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.
- [7] 张家俊,龚壁卫,王军,等. 降雨入渗下膨胀岩渠坡失稳的原位试验研究[J]. 长江科学院院报,2010,27(9):47-52.
- [8] 张磊,郭海庆,谢兴华,等. 人工降雨入渗边坡破坏试验研究[J]. 水利水运工程学报,2012(6):21-27.
- [9] 李海亮,吴礼舟,黄润秋,等. 降雨条件下双层土坡的模型实验研究[J]. 长江科学院院报,2012,29(10):102-107.
- [10] 武彩萍,骆亚生,陈伟,等. 降雨对黄土裸坡坡面形态影响的室内模型试验[J]. 水土保持通报,2013,33(1):115-119.
- [11] 王云强,张兴昌. 黄土区小尺度坡面土壤含水率时空变异性研究[J]. 水土保持学报,2008,22(2):32-37.
- [12] 朱首军,丁艳芳,薛泰谦. 农林复合生态系统土壤含水率空间变异性和时间稳定性研究[J]. 水土保持研究,2000,7(1):46-48.