



基于原位监测的浅层黄土斜坡水分运移规律分析

赵利云^{1,2}, 张茂省^{1,2}, 孙萍萍², 程秀娟², 刘超男^{1,2}

1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710061;
2. 中国地质调查局 西安地质调查中心/自然资源部黄土地质灾害重点实验室, 陕西 西安 710054

摘要: 降雨诱发的浅层黄土滑坡是黄土高原重要的地质灾害类型之一。斜坡水分空间分布和变化趋势是导致斜坡失稳的重要因素, 但基于此的剖面监测数据较少。依托延安黄土地质灾害野外观测基地, 选择典型黄土斜坡, 在坡面布设两条 5 m 深的水分探测纵剖面, 观测在降雨过程中斜坡水分的空间特征。监测结果显示: 1) 降雨引起的土壤含水率变化深度有限, 与降雨量成正相关关系; 2) 土壤含水率随时间变化表现出周期性特征, 随深度增加, 周期逐渐变长; 3) 斜坡水分在空间分布上存在明显的各向异性——垂向上表现为含水率的不均匀性与阶段性, 而在斜坡的不同部位, 受降雨影响坡顶—坡腰—坡脚含水率大致呈递减趋势, 其中坡顶、坡脚的水分波动程度最大, 坡脚的入渗深度最大。

关键词: 黄土滑坡; 降雨量; 入渗深度; 含水率; 各向异性

ANALYSIS OF WATER MOVEMENT LAW IN SHALLOW LOESS SLOPE BASED ON IN-SITU MONITORING

ZHAO Li-yun^{1,2}, ZHANG Mao-sheng^{1,2}, SUN Ping-ping², CHENG Xiu-juan², LIU Chao-nan^{1,2}

1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710061, China;
2. Xi'an Center of China Geological Survey/Key Laboratory for Geohazards in Loess Area, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, China

Abstract: Rainfall-induced shallow loess landslide is one of the major geohazards in Loess Plateau. The spatial distribution and variation trend of moisture in slope are important factors leading to slope instability, but there are few section monitoring data based on the above factors. Relying on the loess geological hazards field observation base in Yan'an City, the study selects a typical loess slope to lay out two 5-meter-deep vertical sections for moisture detection, and observes the spatial characteristics of slope moisture during rainfall. The monitoring results indicate that the variation of rainfall-induced soil moisture content is limited to depth and positively correlated with rainfall; The soil moisture content shows periodicity with time and the period gradually lengthens with increasing depth; The slope moisture shows obvious anisotropy in spatial distribution, uneven and periodic vertically, while the water content in slope top, midslope and slope toe generally show a decreasing trend under the influence of rainfall, among which the water content fluctuates the most at the top and foot of slope, with the largest infiltration depth at the slope toe.

Key words: loess landslide; rainfall; infiltration depth; water content; anisotropy

0 引言

黄土主要分布在中国西北地区, 是一种结构脆弱、

水敏性极强的特殊土^[1]。尽管黄土地区降雨量小, 但其分布极不均匀, 因此诱发了大量的黄土滑坡和崩塌。

收稿日期: 2020-12-28; 修回日期: 2021-01-18. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局“延安革命老区综合地质调查”项目(DD20189270).

作者简介: 赵利云(1997—), 男, 硕士研究生, 从事地质灾害方向的研究, 通信地址 陕西省西安市雁塔区长安大学雁塔校区, E-mail//3073432927@qq.com

如2013年7月3—28日期间,陕西延安地区发生的持续性强降雨,降雨量最高达607.7 mm,引发崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害共计8000余处,其中占总数83.3%的浅表层“剥皮型”黄土滑坡造成了重大的财产损失和人员伤亡^[2]。因此,探究降雨作用下浅表层黄土斜坡的水分空间分布特征和运移规律,对于黄土滑坡机理研究具有重要的意义。

由于黄土斜坡的岩性组成、内部结构以及降雨的强度、持续时间等的不确定性,导致斜坡土体的水分空间分布呈现出明显的各向异性。

一方面,前人通过大量的现场试验研究降雨在黄土中的入渗深度。如在甘肃黄土台塬进行的原位监测表明,含水率变化主要发生在浅层地带,最大入渗深度不超过1.6 m^[3]。针对某黄土切坡进行人工降雨,发现当雨强小于40 mm/d时,黄土中水分入渗深度小于2 m;当降雨强度达到120 mm/d时,含水率在3 m范围内快速降低,影响明显^[4]。在西安骊山进行的长期现场观测表明,在无明显优势通道的情况下,降雨在该地区的入渗深度不超过1.5 m^[5]。由此可见,尽管降雨强度和研究区域不同,但降雨的黄土垂直入渗深度始终有限。

另一方面,针对黄土斜坡不同部位的变异方式,也有大量的模拟研究,但大多是从宏观角度直接观测其破坏形式。如通过室内模拟,发现强降雨导致的斜坡破坏模式经历4个阶段:原始斜坡—坡肩侵蚀—坡脚侵蚀—后缘裂隙(节理)扩展—滑动破坏^[6]。杨仲康等^[7]进行的黄土滑坡现场渗透试验,表明滑坡体不同部位渗透能力存在较大差异:滑坡体后缘>中部>前缘。潘俊义等^[8]通过超大型黄土斜坡上模拟的人工降雨试验,认为边坡不同部位的入渗速率不同:坡顶最快,其次是坡脚,最后是坡中,不同雨强条件下其变化规律基本一致。上述试验多为人工优选配置的均质斜坡,即使属于原位监测,也大多对斜坡进行了清除表层土、植被,平整坡面等人工处理,导致斜坡浅表层土体受到扰动,原有结构特征遭到破坏,从而引起试验结果的偏差。而且模拟试验在较短时间内达到了临界阈值,忽略了斜坡破坏过程中内部的水分运移规律及空间分布^[9]。

因此,为研究降雨作用下黄土斜坡浅层水分运移和分布规律,本研究选取延安市宝塔区典型黄土斜坡为试验区,通过对斜坡体在5 m深度范围内的含水率

进行长期监测,获取了大量原位监测数据。分析结果可为直观研究降雨诱发浅层黄土滑坡机理做出一定的揭示。

1 监测试验

1.1 试验区概况

试验区位于陕西省延安市宝塔区,地处陕北黄土高原中部,在黄河一级支流延河中下游,是典型的黄土丘陵沟壑区,平均海拔1110 m。多年平均降水量562.1 mm,降水年内分配极不均匀,主要集中在6—9月份,占全年降水量70%左右。年蒸发量1607.2 mm,蒸发量远大于降雨量,属于半干旱大陆性季风气候。

监测场地位于宝塔区万花山(图1),属于黄土崩地貌。沟底有基岩出露,岩性主要为灰黄色—灰白色中粗粒砂岩,顶部有页岩和薄层砂岩互层,属于侏罗系下统延安组(J₁)地层。基岩上部覆盖厚层风成黄土(Q₃)。其中午城黄土,红棕色,质地坚硬,含灰白色钙质结核层;离世黄土,是构成黄土崩的主体部分,土体主要为数层棕黄色黄土和深褐色古土壤互层,古土壤底部可见钙质结核层;马兰黄土,厚度较小,淡黄色,含钙质结核,虫孔、树根等孔隙发育。斜坡中小型灌木和草地发育,植被覆盖好。

1.2 监测方案的设计

监测场地为坡度较陡的自然斜坡,坡顶有人工早期开挖的平缓面,坡高50 m,坡体地形无较大差异,坡度相似,为42°。在斜坡面上纵向布设两条水分探测剖面,每条剖面从坡脚至坡顶等距开挖各5个探井(TK1—TK5、TK6—TK10),深度均为5 m。单井安装含水率传感器11个,分别埋设于地表以下0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、4.0、5.0 m处,均匀分布在整个坡面上(图2)。开挖过程中尽量避免对周围植被、土体等的干扰,并用原位土回填。探井主要揭露了马兰黄土和部分离世黄土。表层中植物根系及虫孔等发育,少量延伸到下部马兰黄土中,马兰黄土底部在1.5~2.5 m范围内钙质结核发育,颗粒直径不一,0.5~3 cm均有出现。

水分传感器采用长沙亿拓传感科技有限公司生产的DT-0102型土壤温湿度计探头,其利用TDR原理,可直接对土体中的温度和体积含水率进行自动监测,量程为0~100%,分辨率为0.01%(体积分数),可实时

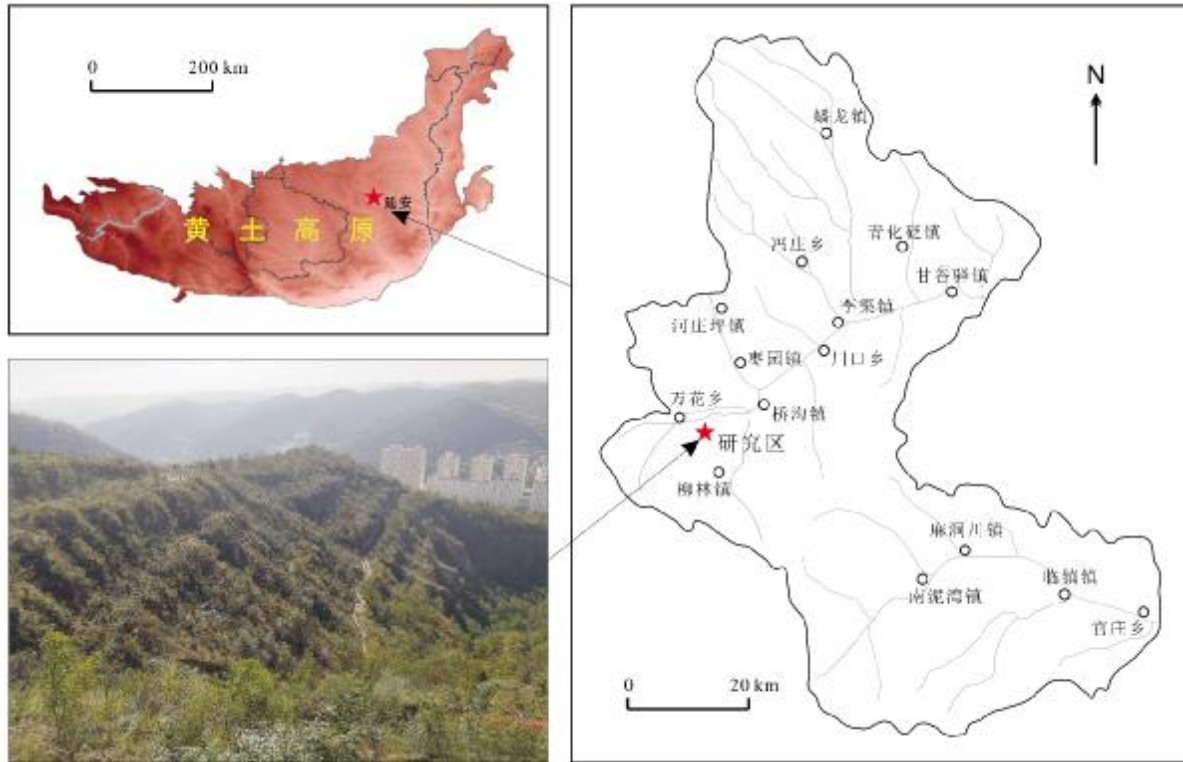


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of the study area

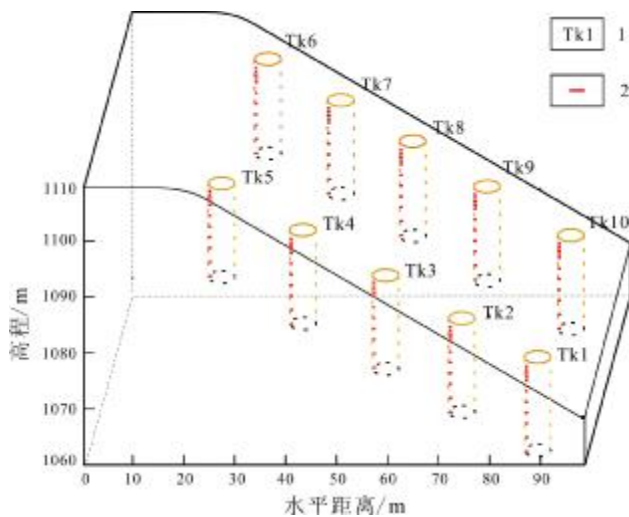


图2 水分监测仪器布设示意图

Fig. 2 Layout sketch of moisture sensors

1—水分探井编号(number of exploratory well); 2—TDR 探头位置 (location of TDR probe); 探井比例夸大(exaggerated proportion for exploratory well)

远程自动传输. 所有仪器在安装前均利用人工配置的重塑土进行了校准测试,符合试验精度要求.

为准确获取监测场地的降雨气象数据,在坡顶安

装翻斗式雨量计进行监测,可实现降雨量的长时间自动监测与远程传输.

2 监测结果分析

2.1 土体水分随时间变化曲线

根据前人研究成果^[3,10],黄土地区的土壤含水率具有以一年为周期的变化趋势.为此选择2019年10月—2020年9月期间某一探井的水分监测数据(图3),进一步分析土壤含水率随时间的变化规律.

观察整个监测期内在0~5.0 m深度范围内土壤含水率随时间的变化曲线,可以发现,降雨的出现明显引起斜坡浅表层土壤含水率的变化.该地区出现的2个降雨集中段,2019年10月7日—11月16日、2020年8月4日—8月18日,累计降雨量分别达到46.9、200.9 mm,引起0.2、0.4、0.6、0.8 m深度处的土壤含水率突变,在短期内出现峰值现象.在2020年8月5日出现的暴雨事件(降雨量为66.3 mm/d)中,0.2 m处的土壤含水率骤然上升,最大升幅达114%;而0.4 m处土壤含水率在达到峰值时,其升幅为43.2%;而0.6、0.8 m深度处的含水率则变化更为缓慢,升幅仅有

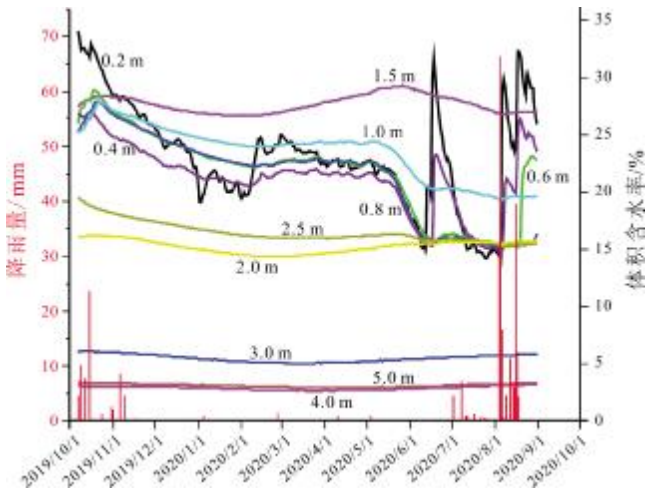


图 3 降雨量及不同深度土体含水率随时间变化曲线

Fig. 3 Curves of soil moisture content changing with time by rainfalls and depths

1.2%, 出现微小波动. 这一结果表明, 降雨入渗导致的土壤含水率变化的深度范围有限, 含水率增加幅度随深度逐渐减小.

排除降雨引起的水分突变现象, 考虑地表以下 0.8 m 浅表层的总体变化趋势, 发现在 10 月初到次年 2 月份, 含水率在不断下降, 而后到春夏之际, 含水率又开始逐渐升高, 并在 7—8 月达到最高值. 这是因为冬季浅表层的土中水冻结成固体, 导致土壤水分持续减少, 进入春季后, 气温上升, 积雪开始融化, 土体解冻, 导致部分土体含水率上升, 并受到雨季影响, 水分突变. 在

1.5~2.5 m 深度范围内, 土壤含水率也发生了微弱变化. 1.5 m 处自冬期监测时起, 含水率处于 4 个月的持续下降, 在 2020 年 2 月—6 月开始缓慢的上升, 随即再次出现下降趋势; 而 2.0 m 处含水率的变化拐点在 2020 年 3 月才出现, 比前者变化幅度也更加微弱; 2.5 m 处在观测期间一直处于持续下降阶段, 尚无拐点出现; 3.0~5.0 m 深度范围的土体几乎不发生变化. 这说明 0.8 m 内的浅表层土壤含水率在降雨、蒸发等因素共同作用下, 表现出以整年为周期的变化特点, 而 1.0~2.5 m 范围内的变化周期则随深度增加而可能更长, 短期原位监测尚无法确定其周期.

2.2 不同降雨条件下黄土斜坡的水分变化规律

由前文分析可知, 在不同的降雨条件下的入渗特点仍存在较大的差异. 因此, 需进一步研究在不同降雨强度等级下在黄土中的入渗规律^[11-13]. 根据国家气象局规定的降水强度等级划分标准(24 h 降水总量), 结合实测数据, 选择 2020 年 7 月 2 日(降雨量 4.6 mm, 小雨)、8 月 16 日(降雨量 39.4 mm, 大雨)、8 月 5 日(降雨量 66.3 mm, 暴雨)的降雨量及土壤含水率, 通过降雨前后该处的含水率变化趋势来研究降雨的入渗深度.

图 4 显示的是在不同降雨量下, 土壤含水率随深度变化的曲线. 为控制降雨为单一变量, 选择无降雨时的水分变化作为对比. 可以看出, 没有降雨发生时, 黄土各深度处的含水率几乎不发生变化, 保持稳定(图

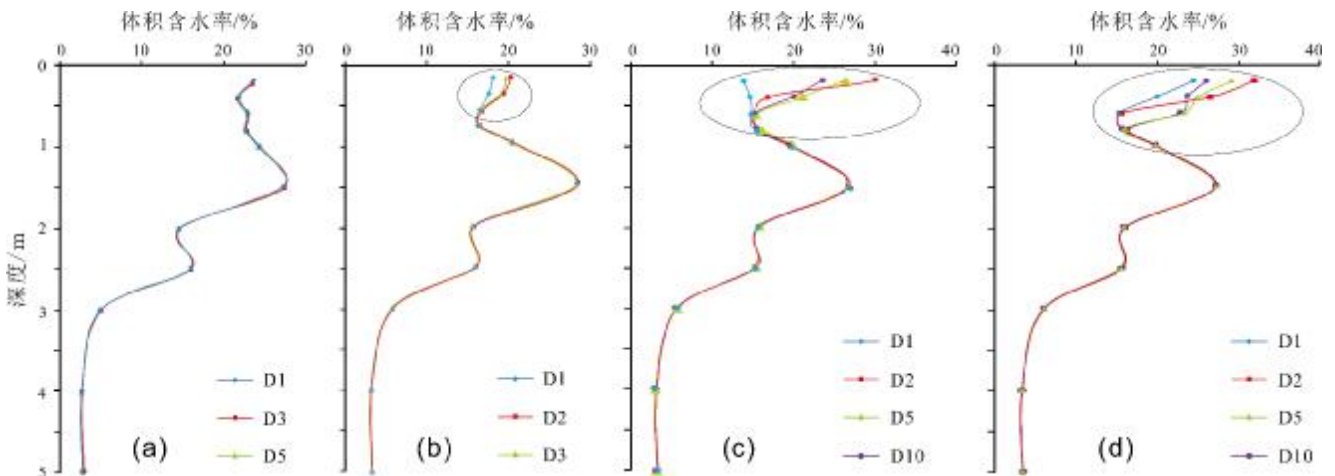


图 4 降雨量不同时入渗深度变化曲线

Fig. 4 Curves of infiltration depth by rainfalls

a—无降雨(no rain); b—降雨量 4.6 mm (precipitation of 4.6 mm); c—降雨量 39.4 mm (precipitation of 39.4 mm); d—降雨量 66.3 mm (precipitation of 66.3 mm); D1—第一天(1st day); D2—第二天(2nd day); D3—第三天(3rd day); D5—第五天(5th day); D10—第十天(10th day)

4a),当降雨量为 4.6 mm 时,土壤含水率在 0.4 m 深度范围内发生变化,降雨 1 d 后该范围内土壤含水率均达到最大值(图 4b);当降雨量为 39.4 mm 时,降雨发生后 0.6 m 范围内土壤含水率升高,但其变化速率不同:降雨 2 d 后,0.2 m 处的含水率值即达到最大,随后便开始下降,而 0.4 m 处的含水率在降雨 5 d 后达到最大,降雨 10 d 后 0.6 m 处的含水率发生微弱的增加(图 4c);当降雨量为 66.3 mm 时,土壤含水率在 0.8 m 范围内发生变化,降雨 3 d 后 0.2~0.4 m 处的含水率达到最大值,降雨 10 d 后 0.6 m 的含水率达到最大值,而在降雨 15 d 后,0.8 m 的含水率值才出现小幅度增加(图 4d).

这一结果说明,水分入渗深度与降雨量大小呈正相关.降雨量增大,水分入渗深度增大.在同一深度处,降雨量大的情况下土壤含水最先发生变化,入渗速率变大.而在同一降雨条件下,随深度增加,入渗时间出现明显的滞后现象.

尽管降雨对浅表层黄土的含水率具有一定的影响,但从图 4 中可以看出,土体水分在垂向上的整体变化趋势并没有明显,垂向分布呈现出明显的分层特征.根据其变化特征总体上可将其分为 3 个亚层:0~1.0 m,土层含水率高,达 25%左右,这一阶段水分受外界环境影响明显,波动剧烈,变化趋势相近,降雨后短期内含水率升高,但随之便因蒸发或根系吸水等作用而下降,波动程度较大;1.0~2.5 m,土体含水率较低,水分变化微弱,受降雨影响小.结合李萍等^[3]的研究,在这

一深度范围内,土体含水率呈现季节性波动变化,不受降雨等因素的直接影响;2.5~5.0 m,土体平均含水率约 5%,在整个监测期内,含水率基本保持不变.

2.3 降雨入渗引起斜坡不同部位的水分变化

很多降雨型滑坡因浅层大量吸水,土体渐趋饱和,导致平行于坡面的滑动面较浅,进而顺坡而下发生滑动.分析斜坡浅层不同部位在降雨前后的水分空间分布及变化情况,有利于预测判断滑体位置^[6-8,11].为此,根据斜坡地形特征,将黄土斜坡分为坡顶、坡腰和坡脚 3 个部位,选择 2020 年 6 月 15 日(降雨量 0.4 mm)、8 月 5 日(降雨量 66.3 mm)的土壤含水率,分析在降雨前、降雨当日及降雨后土壤含水率变化特征.

由图 5 可以看出,斜坡不同部位的水分分布存在较大的差异.不论是在降雨前或是降雨后,含水率值都呈现从坡顶→坡腰→坡脚逐渐递减的趋势,降雨量的大小对斜坡各部位的水分空间分布没有出现明显的影响,各部位保持与土壤的前期含水率相似的变化趋势.

降雨发生一段时间后,受蒸发及植物根系吸水等作用,土体含水率有所下降,但仍大于降雨之前的含水率^[14-16].不同部位在降雨过程中的含水率波动程度存在较大差异,在图 5b 中,坡顶的土壤含水率最大增幅约 113.4%,而坡腰和坡脚分别增加了约 54%、104.4%,相差甚大.

因此,通过计算出对应深度处的方差,可准确了解斜坡各部位在不同深度处的波动程度.方差越大,水

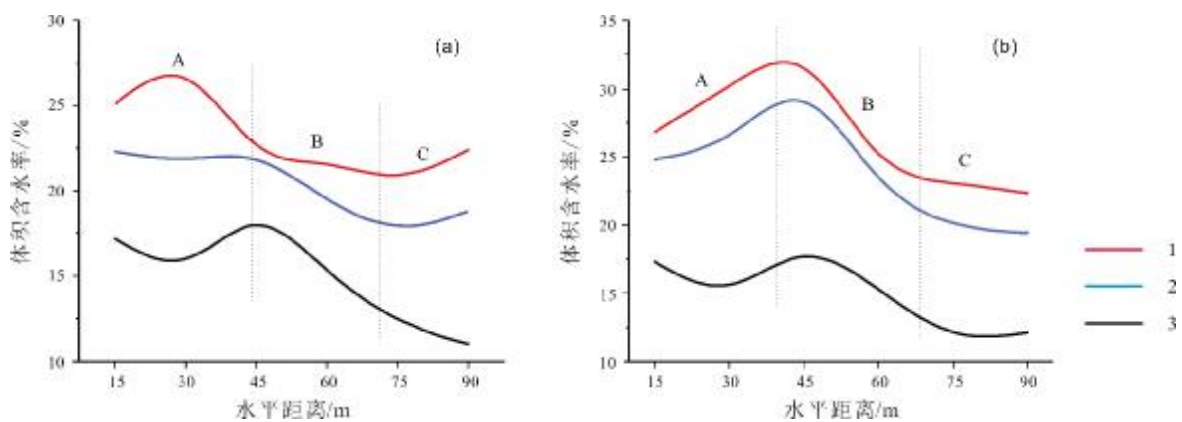


图 5 降雨前后斜坡不同部位含水率变化曲线

Fig. 5 Curves of soil moisture content in different positions of slope before and after rainfall

a—降雨量 0.4 mm/d (precipitation of 0.4 mm/d); b—降雨量 66.3 mm/d (precipitation of 66.3 mm/d); 1—降雨当日 (current raining day); 2—降雨后 (after rain); 3—降雨前 (before rain); A—坡顶 (slope top); B—坡腰 (midslope); C—坡脚 (slope toe)

分波动程度越强.在图6中,坡顶较为平缓,地势较高,雨水集聚而入渗充分,同时又受光照、风等作用使得蒸发强烈,在0.8 m范围内土壤含水率波动明显,方差最大;而坡腰因坡度较陡,产生顺坡的表面径流,水分来不及入渗,有效入渗量少^[17-18],含水率仅在0.2 m深度处存在较大的波动,0.2 m以下土壤含水率变化较小.坡脚因受到当前降雨和后期顺坡产流的影响,水分波动较大,入渗深度最深,在1.5 m处含水率仍然发生变化,作为斜坡的水分集中区,极易先发生滑动^[19-20].

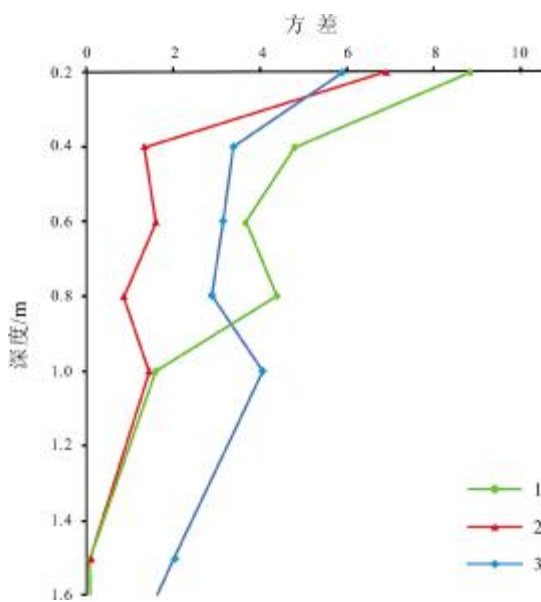


图6 含水率方差值

Fig. 6 Variance of water content in different positions of slope
1—坡脚(slope toe); 2—坡腰(midslope); 3—坡顶(slope top)

3 结论

通过以上对原位监测含水率和降雨量的分析,表明在降雨作用下,黄土斜坡的水分空间分布有明显的各向异性,主要有以下特征.

(1)土壤含水率随时间具有周期性变化特征,不同深度处的周期有一定差异.在浅表层0.8 m范围内,土壤含水率以整年为周期发生循环,雨季的持续性降雨导致土体含水量增大,而干旱少雨季节则因蒸发等外部因素导致水分含量逐渐减少;在1.5~2.5 m深度范围内,其变化周期随深度增加更为长久.

(2)降雨引起的土壤含水率可观测变化深度有限,水分入渗深度与降雨量大小成正相关,当降雨量分别

为4.6 mm(小雨)、39.4 mm(大雨)、66.3 mm(暴雨)时,其入渗深度相应为0.4 m、0.6 m、0.8 m.随深度增加,土壤含水率的变化幅度减弱,时间上出现滞后现象.而1.5 m深度以下的土壤含水率基本观测不到降雨的影响.

(3)根据土壤含水率变化特征,在垂直方向上可将其分为3个不同的亚层:0~1.0 m、1.0~2.5 m、2.5~5.0 m.在斜坡不同部位上,土壤含水率呈坡顶—坡腰—坡脚的递减趋势,降雨量大小对此无明显的影响.整个监测期内,坡顶的土壤含水率波动程度最大,坡脚、坡腰的波动依次减弱,而在不同降雨类型下,坡脚的入渗深度最大,坡腰和坡顶在深度1.0 m处已近似不变.

参考文献(References):

- [1]张茂省,胡炜,孙萍萍,等.黄土水敏性及水致黄土滑坡研究现状与展望[J].地球环境学报,2016,7(4):323-334.
Zhang M S, Hu W, Sun P P, et al. Advances and prospects of water sensitivity of loess and the induced loess landslides [J]. Journal of Earth Environment, 2016, 7(4): 323-334.
- [2]黄玉华,武文英,冯卫,等.陕北延安“7.3暴雨”诱发地质灾害主要类型与特征[J].西北地质,2014,47(3):140-146.
Huang Y H, Wu W Y, Feng W, et al. Main types and characteristics of the geo-hazards triggered by heavy rain on July 3 in Yan'an, Shaanxi[J]. Northwestern Geology, 2014, 47(3): 140-146.
- [3]李萍,李同录,付显凯,等.非饱和黄土中降雨入渗规律的现场监测研究[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(10):3551-3560.
Li P, Li T L, Fu Y K, et al. In-situ observation on regularities of rainfall infiltration in loess [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(10): 3551-3560.
- [4]Tu X B, Kwong A K L, Dai F C, et al. Field monitoring of rainfall infiltration in a loess slope and analysis of failure mechanism of rainfall-induced landslides [J]. Engineering Geology, 2009, 105 (1/2): 134-150.
- [5]同霄,彭建兵,朱兴华,等.黄土地区降雨的优势入渗深度[J].水土保持通报,2017,37(3):231-236.
Tong X, Peng J B, Zhu X H, et al. Advantage infiltration depth of rainfall in Loess Area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3): 231-236.
- [6]王刚,孙萍,吴礼舟,等.降雨诱发浅表层黄土滑坡机理实验研究[J].工程地质学报,2017,25(5):1252-1263.
Wang G, Sun P, Wu L Z, et al. Experimental study on mechanism of shallow loess landslides induced by rainfall [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(5): 1252-1263.

- [7]杨仲康, 陈冠, 孟兴民, 等. 基于现场渗透试验的黄土滑坡体入渗特性[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2017, 53(3): 285-291.
Yang Z K, Chen G, Meng X M, et al. Infiltration characteristics of loess landslide based on a infiltration test in the field[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2017, 53(3): 285-291.
- [8]潘俊义, 侯大勇, 李荣建, 等. 不同雨强下黄土边坡降雨入渗测试与分析[J]. 工程地质学报, 2018, 26(5): 1170-1177.
Pan J Y, Hou D Y, Li R J, et al. Rainfall infiltration test and analysis of loess slope under different rainfall intensities[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(5): 1170-1177.
- [9]林鸿州, 于玉贞, 李广信, 等. 降雨特性对土质边坡失稳的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 198-204.
Lin H Z, Yu Y Z, Li G X, et al. Influence of rainfall characteristics on soil slope failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 198-204.
- [10]Zhang C L, Zhang Y G, Li T L, et al. In-situ observation research on the regularities of water migration in loess[C]//Proceedings of 2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection. Xi'an: IEEE, 2011: 2745-2748.
- [11]王刘华. 延安地区典型滑坡的形成机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
Wang L H. The research on the formation mechanism of the typical landslide in Yan'an area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [12]王晨兴. 降雨入渗及其对斜坡稳定性的影响——以延安宝塔区皮家沟斜坡为例[D]. 西安: 西北大学, 2019.
Wang C X. Rainfall infiltration and its impact on slope stability: A case study of Pijiagou slope in Baota district, Yan'an[D]. Xi'an: Northwest University, 2019.
- [13]张树轩, 杨为民, 程小杰, 等. 甘肃天水红旗山黄土滑坡群成因及稳定性分析[J]. 中国地质, 2017, 44(5): 924-937.
Zhang S X, Yang W M, Cheng X J, et al. Genetic mechanism and stability analysis of loess landslides group in Tianshui Hongqishan, Gansu Province[J]. Geology in China, 2017, 44(5): 924-937.
- [14]孙萍萍, 张茂省, 冯立, 等. 黄土水敏性及其时空分布规律[J]. 西北地质, 2019, 52(2): 117-124.
Sun P P, Zhang M S, Feng L, et al. Water sensitivity of loess and its spatial-temporal distribution on the Loess Plateau[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(2): 117-124.
- [15]段天柱. 沁水盆地黄土塬区三维地震勘探激发层位试验研究[J]. 地质与资源, 2019, 28(3): 309-314.
Duan T Z. Experimental study on the excitation horizon of 3D seismic exploration in the loess table area of Qinshui basin[J]. Geology and Resources, 2019, 28(3): 309-314.
- [16]张永双, 巴仁基, 任三绍, 等. 中国西藏金沙江白格滑坡的地质成因分析[J]. 中国地质, 2020, 47(6): 1637-1645.
Zhang Y S, Ba R J, Ren S S, et al. An analysis of geo-mechanism of the Baige landslide in Jinsha River, Tibet[J]. Geology in China, 2020, 47(6): 1637-1645.
- [17]石兰君, 乔晓英, 曾磊, 等. 甘肃黑方台黄土水分运移规律模拟[J]. 干旱区研究, 2018, 35(4): 813-820.
Shi L J, Qiao X Y, Zeng L, et al. Loess moisture migration in Heifangtai of Gansu Province[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(4): 813-820.
- [18]高策. 强降水条件下延安地区典型黄土斜坡水分运移规律研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
Gao C. Study on water movement law in typical loess slope under heavy precipitation in Yan'an Area [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [19]薛强, 张茂省, 高波. 斜坡单元支持下基于土体含水率的陕西省清涧县城区黄土滑坡危险性评价[J]. 中国地质, 2020, 47(6): 1904-1914.
Xue Q, Zhang M S, Gao B. Hazard assessment of loess landslide based on soil moisture content and supported by slope unit in Qingjian City, Shaanxi Province[J]. Geology in China, 2020, 47(6): 1904-1914.
- [20]李明波, 陈平, 陈植华, 等. 湖南雪峰山地区降雨型滑坡灾害敏感性区划[J]. 地质与资源, 2019, 28(1): 78-84.
Li M B, Chen P, Chen Z H, et al. Sensitivity zoning of rainfall-induced landslide hazard in Xuefeng Mountain area[J]. Geology and Resources, 2019, 28(1): 78-84.