

晋西黄土区切沟对其上方集水区内土壤水分的影响

施政乐¹, 张建军^{1,2,3,4}, 申明爽¹, 刘畅¹, 胡亚伟¹, 徐勤涛¹

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站,山西 吉县 042200;3.北京林业大学水土保持国家林业局重点实验室,北京 100083;
4.林业生态工程教育部工程研究中心(北京林业大学),北京 100083)

摘要:为掌握黄土高原切沟对其上方集水区内土壤水分的影响,选取晋西黄土区典型切沟上方的集水区为研究对象,采用土钻法定期测量 0—10 m 土层的土壤水分,探讨集水区内不同地貌部位的土壤水分状况。结果表明:(1)集水区内土壤水分状况受距离切沟远近和地貌部位的共同影响。(2)集水区内距离切沟 1 m 处的蓄水量显著低于距离切沟 3,6 m 处的蓄水量($P<0.05$),集水区内洼地的蓄水量大于坡面。(3)集水区内 6 个采样点浅层含水量随时间变化剧烈,深层含水量随时间变化小。(4)切沟对其上方集水区内土壤水分的水平影响距离为 1~3 m,距切沟 1 m 处,影响深度最深可达 7 m,距切沟 3 m 处,影响深度为 2 m。在未来开展切沟治理中,建议在距离切沟 1 m 范围内密植低耗水的耐旱灌木或草本,利用密植的植物增加地面糙率,降低水流流速,并利用植物根系网络固土,增加抗冲性,从而起到防治切沟溯源侵蚀。

关键词:切沟; 沟头; 土壤水分; 影响范围; 晋西黄土区

中图分类号:S152.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2022)03-0071-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.03.011

Effects of Gully on Soil Water Content in the Catchment Area
Above in the Loess Region of Western Shanxi Province

SHI Zhengle¹, ZHANG Jianjun^{1,2,3,4}, SHEN Mingshuang¹, LIU Chang¹, HU Yawei¹, XU Qintao¹

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;
2.National Station for Forest Ecosystem Research in Ji County, Ji County, Shanxi 042200;
3.State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;
4.Center of Forestry Ecological Engineering Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: We selected catchment area above typical gully in the loess region of western Shanxi Province to study effects of gully on soil water content in the catchment area above in the Loess Plateau. The soil water content in a profile of 10 m was measured by soil core method and we discussed the soil moisture status of different landforms in the catchment area. The results showed that: (1) The soil moisture status in the catchment area was affected by the distance from the gully and the landform. (2) Soil water storage at 1 m from the head of the gully was significantly lower than that at 3 and 6 m. Soil water storage was higher in the depression than in the slope. (3) The shallow soil water content of 6 sampling points changed sharply with time, and the deep layer had little changes. (4) The horizontal influence distance of gully on soil water content in catchment area was 1~3 m, for gully in catchment area, 7 m for influence depth. It was suggested that drought-tolerant shrubs and herbs with low water consumption should be densely planted near the gully to increase the surface roughness and reduce the water flow velocity. And the plant roots could hold the soil and increase the anti-impact property to control gully erosion.

Keywords: gully; gully head; soil water; the affected range; Loess Region of Western Shanxi Province

切沟是黄土地貌发育过程中最活跃的侵蚀沟类型,在一定程度上切沟对黄土地区地貌特征起着决定性作用,它映射了黄土地貌的空间分异特征^[1]。在黄土地貌发育进程中,溯源侵蚀是侵蚀沟发育的

收稿日期:2021-10-12
资助项目:国家重点研究计划项目(2022YFE0104700)
第一作者:施政乐(1997—),女,硕士研究生,主要从事林业生态工程研究。E-mail:shizhengle1997@163.com
通信作者:张建军(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事水土保持、植被恢复、生态效益评价、森林水文研究。E-mail:zhangjianjun@bjfu.edu.cn

基本方式。随着溯源侵蚀的发生发展,切沟沟头的位置、高度、形态等均会发生显著变化^[2-3]。切沟上方集水区内地表径流汇集并向下流入切沟内,通过不断地冲掏沟头,形成跌水,进而引起沟头土体坍塌,形成沟壁^[4]。沟壁的形成使其上方集水区的蒸发面(垂直蒸发面)增大,这必然会对集水区内临近切沟沟壁部位的土壤水分状况产生影响^[5-6]。尤其是临近沟壁附近的土壤水分,因受沟壁蒸发和地表面蒸发的共同作用,土壤含水量必然与集水区内其他部位的含水量不同^[7-8]。但是切沟对其上方集水区的土壤水分状况有怎样的影响?影响范围有多大还鲜有研究。

对切沟附近土壤含水量的准确把握不仅是选择造林树种的需要,更是判断沟头是否发生崩塌以及布设沟头防护措施的主要依据,因此探究切沟对其上方集水区土壤水分的影响具有重要意义。许多学者针对切沟展开了一系列研究,谢云等^[9]对切沟内不同部位的土壤水分状况和空间变化特征进行过探究发现,切沟内沟头部位的土壤水分状况较好;张宝军等^[10]基于力矩法探究了切沟沟头的稳定性发现,沟头稳定性受土壤含水量、内凹洞发育高度、裂缝发育深度等多因素综合影响;王小丹等^[11]研究了切沟的形态学特征发现,沟头的分形特征在一定程度上能表征切沟发育的特征;马玉凤等^[12]监测了雨季前后切沟沟头的侵蚀状况发现,沟头上部土体干裂会加强雨季的流水侵蚀,且沟头土体稳定性随裂缝发育增大呈指数函数降低。可见,对切沟的研究主要集中于形态学特征、溯源侵蚀特征及属性组合规律(汇水面积—坡度等)等方面^[13-14],但对切沟沟头上方集水区土壤水分动态变化的研究相对较为欠缺。

因此,本研究以切沟上方集水区为研究对象,通过测定离切沟不同距离处的坡面和洼地的土壤水分含量,探究切沟上方集水区内土壤含水量的动态变化、土壤蓄水量的差异及影响因素,以期为集水区内植被恢复的树种选择和切沟治理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西吉县红旗林场内的石山湾,地理坐标为 110°45′27″E,36°02′29″N,属于晋西黄土残塬沟壑区,海拔 1 360 m,年均气温 10 ℃。土壤为褐土,黄土母质。所选切沟沟头边缘平滑,无明显土壤裂缝,沟壁较陡。在切沟上部的集水区内布设采样点,试验地平均坡度 20°,研究期为 2019 年 5—10 月,研究期间的各月的降雨量分别为 9.5,39.6,34.6,101.5,111.2,63.5 mm,造林树种为油松(*Pinus tabulaeformis*),系人工种植,平均树龄为 39 年,平均树高 6.3 m,平均胸径 12.6 cm,郁闭度 75%。林下分布少量黄刺玫(*Rosa xanthina*)和虎榛子(*Ostryopsis davidiana*),各样点间植被情况差别不大。

1.2 试验设计

1.2.1 样点布设 在红旗林场内石山湾所选切沟上部的集水区内分别沿洼地和坡面各布设 3 个采样点,洼地和坡面采样点与切沟沟头的距离分别为 1,3,6 m,将集水区内洼地部位距离切沟沟头 1,3,6 m 处的采样点分别命名为 a1、a2、a3,将集水区内坡面距离切沟沟头 1,3,6 m 处的采样点分别命名为 b1、b2、b3。

1.2.2 数据采集 2019 年 5—10 月,每月下旬在切沟上方集水区内的各采样点利用土钻法测定 0—10 m 土层的含水量,0—1 m 土层内每隔 0.1 m 取样,1—10 m 土层内每隔 0.2 m 取样。每层采集 3 个土样分别装入铝盒,带回实验室称重后放入烘箱,在 105 ℃ 条件下烘 24 h 至恒重,计算土壤质量含水量。黄土高原地区 2 m 以下土层的容重基本保持不变,因此本研究在试验地内使用 100 cm³ 的环刀以 0.2 m 土层为间隔测定了 0—2 m 土层的容重,作为采样点 0—10 m 土层的土壤容重,为 1.26 g/cm³。

1.3 数据计算与处理

1.3.1 土壤含水量 土壤质量含水量(SWC)计算公式为:

$$SWC = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中:SWC(soil water content)为质量含水量(%); ω_1 为湿土质量(g); ω_2 为烘干土质量(g)。

1.3.2 土壤蓄水量 土壤蓄水量(SWS)为一定厚度土层所储存的水量,计算公式^[15]为:

$$SWS = \frac{10 \times SWC \times BD \times H}{\rho} \quad (2)$$

式中:SWS(soil water storage)为土壤蓄水量(mm);BD(bulk density)为土壤容重(g/cm³),取值为 1.26 g/cm³;H 为土层厚度(mm); ρ 为水的密度,取值为 1.0 g/cm³。

1.3.3 数据处理 数据计算与处理采用 Excel 2017、SPSS 24.0 版本软件;图表制作采用 Origin 2017、AutoCAD 2007 软件。

2 结果与分析

2.1 集水区内距切沟不同距离处土壤蓄水量

由图 1 可知,集水区内距离切沟 3 m 处的蓄水量最高,可达 1 174.29 mm;而距离切沟 1 m 处的蓄水量最低,只有 1 122.69 mm,距离切沟 6 m 处的蓄水量;为 1 163.46 mm;经方差分析可知,距离切沟 1 m 的蓄水量

与距离切沟 3,6 m 的蓄水量差异显著($P<0.05$)。

2.2 集水区内不同地貌部位 0—10 m 土层蓄水量

由表 1 可知,集水区内坡面的平均土壤蓄水量小于洼地。坡面观测点 b1 点的平均土壤蓄水量比洼地观测点 a1 点低 4.05 mm。b1 点与 a1 点蓄水量差值的最大值出现在 9 月,此时 b1 点的蓄水量比 a1 点高 69.68 mm;蓄水量差值的最小值出现在 6 月,此时 b1 点的蓄水量比 a1 点高 2.23 mm。在 7,8,10 月,坡面的土壤蓄水量小于洼地。坡面观测点 b2 点的平均土壤蓄水量比洼地观测点 a2 点低 46.12 mm。b2 点与 a2 点蓄水量差值的最大值出现在 7 月,此时 b2 点的蓄水量比 a2 点低 99.56 mm;蓄水量差值的最小值出现在 9 月,此时 b2 点的蓄水量比 a2 点低 23.55 mm。只有 10 月坡面的土壤蓄水量大于洼地。坡面观测点

b3 点的平均土壤蓄水量比洼地观测点 a3 点低 31.96 mm,b3 点与 a3 点蓄水量差值的最大值出现在 6 月,此时 b3 点的蓄水量比 a3 点低 76.38 mm,蓄水量差值的最小值出现在 5 月,此时 b3 点比 a3 点高 2.97 mm。6—10 月坡面的土壤蓄水量均小于洼地。

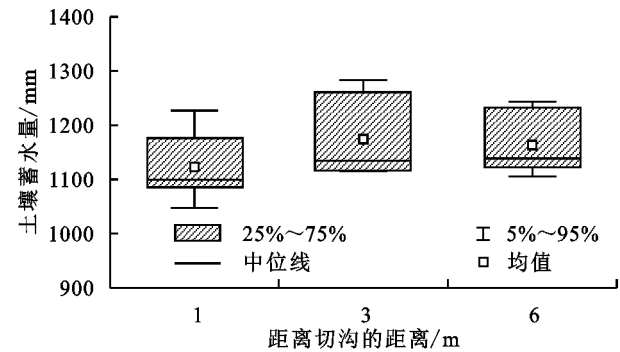


图 1 集水区内距切沟不同距离处土壤蓄水量

表 1 集水区内不同地貌部位 0—10 m 土层平均土壤蓄水量 单位:mm

采样点	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	均值
坡面观测点 b1 点	1109.97	1087.24	1025.04	1081.49	1211.51	1208.75	1120.66
洼地观测点 a1 点	1084.57	1085.01	1070.33	1106.84	1141.83	1245.87	1124.72
b1 点—a1 点	25.40	2.23	—45.29	—25.35	69.68	—37.12	—4.05
坡面观测点 b2 点	1093.93	1091.09	1066.14	1105.88	1249.54	1300.81	1151.23
洼地观测点 a2 点	1143.03	1141.47	1165.70	1194.71	1273.09	1266.11	1197.35
b2 点—a2 点	—49.10	—50.38	—99.56	—88.83	—23.55	34.70	—46.12
坡面观测点 b3 点	1149.41	1091.24	1111.65	1095.69	1196.38	1240.50	1147.48
洼地观测点 a3 点	1146.44	1167.62	1131.95	1115.22	1268.73	1246.68	1179.44
b3 点—a3 点	2.97	—76.38	—20.30	—19.54	—72.35	—6.18	—31.96

由图 2 可知,在距离切沟 1 m 的位置,坡面在 0—2,6—8,9—10 m 土层中的土壤蓄水量大于洼地,其余土层的土壤蓄水量均小于洼地。2 个地貌部位 9—10 m 土层土壤蓄水量的差值最大,为 27.09 mm,1—2 m 土层的差值最小,为 3.82 mm。在距离切沟 3 m 的位置,坡面在 0—2,8—9 m 土层中的土壤蓄水量大于洼地,其余土层的土壤蓄水量均小于洼地。2 个地貌部位 8—9 m 土层土壤蓄水量的差值最大,为 40.37 mm,0—1 m 土层的差值最小,为 1.19 mm。在距离切沟 6 m 的位置,坡面在 1—2,5—6,8—10 m 土层中的土壤蓄水量大于洼地,其余土层的土壤蓄水量均小于洼地。2 个地貌部位 4—5 m 土层土壤蓄水量的差值最大,为 33.10 mm,0—1 m 土层的差值最小,为 2.61 mm。总体而言,集水区内洼地土壤蓄水量高于坡面,洼地土壤水分条件更好。且洼地蓄水量高于坡面的土层主要集中在 2 m 以下的土层。

2.3 集水区内各采样点土壤水分的垂直分布

由集水区内各采样点平均土壤含水量及其变异系数的垂直分布(表 2)可知,不同采样点的土壤水分垂直分布均表现为剖面浅层含水量随时间变化剧烈,

深层含水量随时间变化小。

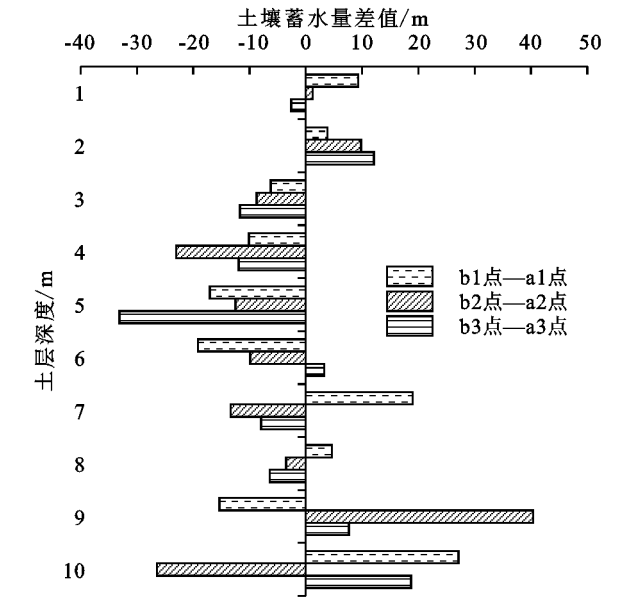


图 2 不同地貌不同土层蓄水量差值

坡面观测点 b1 点的 5—10 月土壤含水量在 1.2 m 以上差异较大,1.2 m 以下含水量很接近,0—1.2,1.2—10 m 土层含水量分别为 9.16%~15.59%和 8.00%~8.90%。坡面观测点 b2 点的 5—10 月的土壤含水量在

2 m 以上差异较大,2 m 以下含水量很接近,0—2,2—10 m 土层的含水量分别为 9.56%~17.85%和 7.97%~8.81%。坡面观测点 b3 点的 5—10 月土壤含水量在 2.4 m 以上差异较大,2.4 m 以下含水量很接近,0—2.4,2.4—10 m 土层含水量分别为 7.33%~15.82%和 8.27%~9.02%。洼地观测点 a1 点的 5—10 月土壤含水量在 1.2 m 以上差异较大,1.2—7 m 有较小差异,7 m 以下含水量较为接近,0—1.2,1.2—7,7—10 m 土层的含水量分别为 7.27%~14.83%,8.29%~9.63%,8.03%~9.21%。洼地观测点 a2 点的 5—10 月土壤含水量在 2 m 以上差异较大,2 m 以下含水量很接近,0—2,2—10 m 土层含水量分别为 7.98%~16.66%,8.70%~9.30%。洼地观测点 a3 点的 5—10 月土壤含水量在 1.2 m 以上差异较大,1.2 m 以下含水量很接近,0—1.2,1.2—10 m 土层的含水量分别为 8.33%~17.20%,8.79%~9.38%。

3 讨论

集水区内距离切沟 1 m 处的蓄水量显著低于距离切沟 3,6 m 处的蓄水量($P<0.05$),且距离切沟 3 m 处的蓄水量与 6 m 处的蓄水量差异不显著($P>0.05$),这与张晨成等^[16]的研究结果一致,切沟对其上方集水区土壤水分的水平影响距离为 1~3 m,原因可能是切沟的存在扩大了水分蒸发面积,加速了土壤水分的损失^[5,17],且离切沟越近,蒸发越大,土壤含水量越低,从而导致距离切沟 1 m 处的含水量显著低于距离切沟 3,6 m 处的含水量($P<0.05$)。

集水区内洼地距离切沟 1,3,6 m 处的蓄水量均大于坡面,洼地的土壤水分条件更好。这是因为坡面接受较多的太阳辐射,地表蒸发量大,而洼地由于地势较低,一方面蒸发量较坡面低,而降雨时洼地又接收坡面地表径流^[18],从而导致洼地的含水量高于坡面。表明集水区内地貌是影响土壤水分的一个重要因素^[19-20]。洼地 0—2 m 土层的土壤蓄水量和坡面土壤蓄水量大小相近,而 2 m 以下土层的蓄水量差值增大,这表明 0—2 m 土层的土壤水分受地貌影响不明显,而 2 m 以下土层的蓄水量受地貌影响较明显,这也与前人^[21]的研究结果一致。

b1 点、b2 点、b3 点、a1 点、a2 点、a3 点分别在 0—1.2,0—2,0—2.4,0—1.2,0—2,0—1.2 m 土层表现出含水量随时间的剧烈变化。这是因为这些土层易受降水入渗补给、蒸散耗水的影响,土壤水分具有明显的随时间变化的特征。6 个样点的深层土层受降水补给较少,其土壤水分状况主要受植物利用的影响^[22],因而土壤含水量动态变化较小。距离切沟较

远的 b2 点、b3 点和 a2 点、a3 点的含水量随时间剧烈变化的土层深度均深于距离切沟较近的 b1 点和 a1 点,但距离切沟 6 m 处的 a3 点的含水量随时间剧烈变化的土层深度小于 b3 点,这是因为 b3 点地势高于 a3 点,b3 点地表蒸散量较大,土壤水分含量低,加之试验地中油松林的生长会消耗土壤水分,当浅层土壤不足以维持植被生长所需的水分便会消耗更深层次的水分,这便导致了 b3 点的土壤水分随时间的剧烈变化层深于 a3 点。相较于其他 5 个样点,洼地观测点 a1 点的 1.2—7 m 土层仍表现出明显的含水量的动态变化,程立平等^[23]、王志强等^[24]将各月土壤含水量曲线在剖面上相交的深度作为土壤水分受到影响的深度,即土壤水分的变异系数随深度变化出现的低值点作为土壤水分受影响的深度,而 a1 点不仅在 1.2 m 土层处出现了变异系数的低值点(8.04%),在 7 m 土层处再次出现了变异系数的低值点(6.63%),因此,可以认为切沟对上方集水区内土壤水分的影响深度最深可达 7 m 土层。造成这种现象的原因可能是 a1 点距切沟较近,土壤水分受到正面和侧面双向蒸发影响,加重了深层土壤水分的损失^[25],而在距切沟稍远的位置可能只受正面蒸发,加之降雨时地势较低的 a1 点又接收来自坡面的地表径流^[18],增加水分入渗深度,这些原因共同导致 a1 点 1.2—7 m 土层的含水量表现出明显的动态变化。根据表 1,6 个采样点的土壤蓄水量随时间整体上呈现出增大的趋势,但在整个生长季降雨量最大的 9 月,a1 点的蓄水量较 8 月仅增加了 34.99 mm,a1 点蓄水量的增加量远远小于其他采样点,这同样也证明了 a1 点受侧面蒸发的影响大于其他采样点。甘森等^[7]研究认为,切沟的存在是沟缘土壤水分损失的主要原因,且沟缘的土壤水分是双侧蒸发。

本研究发现,切沟沟头附近的含水量较低,且在经历较大降雨事件时,集水区内靠近切沟沟头的部位土壤水分波动较大。因此在未来开展沟头治理过程中,可根据当地土壤水分条件,合理选择植被,同时配置合理的沟头防护工程。研究区内已密植人工油松林,油松林起到了林冠截留等作用。考虑到距离切沟 1 m 处的蓄水量显著低于距离切沟 3,6 m 处的蓄水量($P<0.05$),因此,在未来进行植被恢复过程中,可在距离切沟 1 m 范围内种植冰草(*Agropyron cristatum*)、狗尾草(*Setaria viridis*)等草本,其耗水量较少,且在播种后 90~150 天便能将裸露地表覆盖,起到增加地面糙率、减少土壤水分运移、防治水土流失的作用。

表 2 集水区内各采样点平均土壤含水量及其变异系数的垂直分布

土层 深度/m	坡面观测点 b1		坡面观测点 b2		坡面观测点 b3		洼地观测点 a1		洼地观测点 a2		洼地观测点 a3	
	SWC/%	CV/%	SWC/%	CV/%	SWC/%	CV/%	SWC/%	CV/%	SWC/%	CV/%	SWC/%	CV/%
0.1	13.82	33.00	14.39	44.30	13.37	32.90	12.58	40.15	13.18	45.22	15.01	47.14
0.2	12.60	35.03	13.05	37.21	11.43	43.58	11.84	36.16	12.43	42.73	11.99	44.77
0.3	12.28	36.85	11.71	46.84	11.19	44.58	11.51	38.27	12.58	44.54	11.97	47.79
0.4	12.08	37.33	12.21	44.41	11.43	43.79	11.11	35.73	11.86	37.97	12.43	47.73
0.5	11.85	34.15	12.69	41.63	11.89	41.96	10.75	34.37	12.38	39.74	12.59	43.74
0.6	11.89	30.60	12.64	39.16	11.94	36.46	11.49	32.90	12.67	37.32	12.87	41.57
0.7	11.81	24.71	12.78	35.88	11.31	29.67	10.97	29.07	12.79	33.15	11.85	30.15
0.8	10.86	17.37	11.91	28.06	11.16	32.11	9.99	23.49	12.73	33.56	10.42	17.43
0.9	10.09	9.41	11.67	28.54	11.62	35.39	9.78	22.48	12.27	29.98	10.01	10.38
1.0	9.91	7.05	12.39	32.19	11.45	29.04	9.77	19.94	11.59	29.42	9.72	6.33
1.2	9.84	6.20	12.61	27.74	11.32	26.91	9.56	8.04	11.09	17.79	9.74	6.50
1.4	9.98	4.93	12.24	17.38	10.82	16.26	9.31	6.13	10.79	11.96	9.75	3.20
1.6	9.83	2.89	11.49	5.08	11.11	13.88	9.39	6.20	10.61	8.35	10.00	1.58
1.8	9.74	2.96	10.54	4.17	11.07	12.11	9.50	5.77	10.35	5.99	10.09	6.01
2.0	9.60	3.91	10.05	1.75	10.25	8.23	9.72	13.68	10.21	2.85	10.18	6.79
2.2	9.81	6.65	9.81	3.40	9.43	5.16	10.37	8.76	10.19	1.96	10.33	3.55
2.4	10.02	5.40	9.44	4.24	9.21	3.55	10.07	6.70	10.15	3.97	10.38	3.68
2.6	9.72	4.84	9.36	4.61	9.41	2.58	9.94	6.02	10.04	4.30	10.55	4.74
2.8	8.25	7.28	9.26	5.55	9.64	2.37	9.03	10.02	10.02	3.88	10.10	5.28
3.0	7.84	2.73	9.17	4.41	9.33	1.92	8.73	17.61	10.11	7.33	10.30	6.29
3.2	8.06	4.76	9.07	4.50	9.43	5.47	8.74	18.19	10.67	8.05	10.64	7.97
3.4	7.98	5.00	8.97	2.83	9.52	5.85	8.66	18.50	11.06	1.62	10.52	8.00
3.6	8.12	4.43	9.04	4.98	9.46	4.54	8.86	17.67	10.90	4.00	9.88	10.55
3.8	8.24	1.88	9.11	4.03	9.10	6.74	9.27	15.92	11.07	3.91	9.55	3.11
4.0	8.33	2.22	8.84	4.38	8.87	9.04	9.23	12.42	10.49	4.89	10.54	4.60
4.2	7.92	3.31	8.18	6.22	7.73	10.06	8.72	13.28	9.82	8.04	11.26	4.81
4.4	7.53	3.42	7.48	4.83	7.22	10.93	8.88	13.46	9.39	4.82	11.15	2.69
4.6	7.34	2.96	7.82	4.39	7.03	6.29	8.65	18.44	8.96	14.26	10.33	15.43
4.8	6.90	4.59	8.23	4.78	7.27	6.44	8.66	16.78	7.98	11.51	9.48	11.18
5.0	6.78	3.75	8.28	3.73	7.61	4.71	8.33	15.63	8.79	4.41	7.77	13.97
5.2	6.71	4.22	8.15	2.81	8.05	4.26	8.17	13.99	8.91	5.23	7.56	5.61
5.4	6.77	3.51	8.16	3.06	8.53	3.05	8.34	13.79	9.06	6.46	7.69	7.57
5.6	6.73	3.26	8.40	6.06	8.95	3.75	8.22	10.89	8.99	5.62	8.92	8.83
5.8	6.71	4.60	8.06	4.21	8.91	4.96	8.14	9.35	8.82	4.71	8.76	6.48
6.0	6.87	6.92	7.90	6.37	8.65	1.62	8.53	14.51	8.81	5.02	8.85	7.11
6.2	7.62	9.78	7.68	6.93	8.95	2.91	8.29	14.52	8.79	5.79	9.07	4.10
6.4	8.89	8.71	7.68	1.89	8.60	2.23	7.92	10.17	8.43	6.92	9.27	3.91
6.6	9.62	8.17	7.41	3.53	8.22	4.80	7.66	9.83	8.19	5.36	9.09	2.33
6.8	9.99	4.38	6.70	3.09	8.02	3.85	7.28	6.76	8.08	8.17	8.83	2.12
7.0	10.21	3.18	6.60	2.29	7.96	5.02	7.63	6.63	7.87	7.25	8.65	1.95
7.2	9.77	8.83	6.48	2.90	7.93	6.53	7.47	6.99	7.68	9.22	8.41	3.64
7.4	8.99	9.73	6.41	4.05	7.58	4.15	7.40	6.33	7.47	5.79	8.17	3.39
7.6	8.38	7.36	6.86	3.44	7.48	11.16	8.08	15.46	7.58	14.24	8.06	1.75
7.8	8.01	4.89	7.28	4.03	7.31	10.12	8.76	12.12	7.08	8.40	7.74	3.81
8.0	7.59	5.16	8.28	12.48	7.04	5.60	9.18	9.69	6.90	8.56	7.50	4.67
8.2	7.51	6.92	9.94	9.30	6.90	7.17	9.21	12.98	6.99	7.56	7.19	3.81
8.4	7.43	5.25	11.23	6.25	7.13	6.04	9.69	12.77	6.80	4.86	7.07	4.47
8.6	7.61	6.46	11.49	5.75	7.24	6.59	9.48	14.36	7.32	8.16	6.92	5.97
8.8	8.34	7.24	10.71	4.04	7.80	6.86	8.77	14.47	7.33	5.76	6.90	4.23
9.0	8.72	4.61	9.08	5.22	8.82	9.66	8.55	9.83	8.00	7.18	6.76	2.72
9.2	9.58	7.75	8.51	4.87	10.00	9.63	8.30	13.31	9.12	7.51	7.17	3.58
9.4	10.67	12.86	8.00	3.79	10.59	8.79	7.88	10.59	9.77	9.02	8.16	6.48
9.6	11.24	9.60	8.00	6.49	11.09	6.05	8.26	13.10	10.31	7.29	9.22	5.94
9.8	10.55	7.56	8.18	8.51	10.44	5.71	8.24	8.74	11.09	4.38	10.11	4.33
10.0	9.75	7.26	7.94	7.50	9.93	9.69	8.36	17.30	10.83	6.67	9.98	10.34

注:CV 为变异系数(%);SWC 为土壤含水量(%)。

4 结 论

(1)集水区内土壤水分状况受距离切沟远近和地貌的共同影响。切沟对其上方集水区内土壤水分的水平影响距离为 1~3 m,距切沟 1 m 处,影响深度最深可达 7 m,距切沟 3 m 处,影响深度为 2 m。

(2)集水区内距离切沟 1 m 处的蓄水量显著低于距离切沟 3,6 m 处的蓄水量($P < 0.05$)。

(3)集水区内洼地的蓄水量均大于坡面,洼地的土壤水分状况好于坡面。

(4)集水区内距离切沟 1 m 处,0—1.2 m 土层含水量随时间变化剧烈;距离切沟 3 m 处,0—2 m 土层含水量随时间变化剧烈;距离切沟 6 m 处,坡面的 0—2.4 m 土层和洼地的 0—1.2 m 土层含水量随时间变化剧烈,其余土层含水量随时间变化小。

参考文献:

- [1] 朱红春,黄伟,赵翼鹏,等.基于 DEM 影像的黄土区域地形自动分割及沟头识别[J].地理与地理信息科学,2017,33(4):74-78.
- [2] 康宏亮.黄土高原沟壑区土地利用方式对沟头溯源侵蚀过程的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [3] 陈绍宇.高原沟壑区溯源侵蚀发生发育规律研究[D].北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2009.
- [4] 郭明明.黄土高原沟壑区退耕草地沟头溯源侵蚀及形态演化特征[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [5] Jia X X, Shao M A, Zhu Y J, et al. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China [J].Journal of Hydrology,2017,546:113-122.
- [6] 赵春红,高建恩.坡面不同侵蚀沟断面特征及水力几何形态[J].水科学进展,2016,27(1):22-30.
- [7] 甘森,贾玉华,李同川,等.黄土区坡沟系统容重、饱和导水率和土壤含水量变化分析[J].干旱区研究,2018,35(2):315-324.
- [8] 高晓东,吴普特,张宝庆,等.黄土丘陵区小流域土壤有效水空间变异及其季节性特征[J].土壤学报,2015,52(1):57-67.
- [9] 谢云,刘宝元,伍永秋.切沟中土壤水分的空间变化特征[J].地球科学进展,2002,17(2):278-282.
- [10] 张宝军,熊东红,张光辉,等.基于力矩法的元谋干热河谷冲沟沟头土体稳定性模拟与验证[J].农业工程学报,2018,34(15):133-140.
- [11] 王小丹,钟祥浩,范建容,等.金沙江干热河谷元谋盆地

冲沟沟头形态学特征研究[J].地理科学,2005,25(1):63-67.

- [12] 马玉凤,严平,李双权,等.龙羊峡库区威连滩冲沟沟头侵蚀的动态监测[J].干旱区研究,2012,29(2):238-244.
- [13] Zhu H C, Tang G A, Qian K J, et al.Extraction and analysis of gully head of loess plateau in China based on digital elevation model [J].Chinese Geographical Science,2014,24(3):328-338.
- [14] 张光辉.切沟侵蚀研究进展与展望[J].水土保持学报,2020,34(5):1-13.
- [15] 苟清平,朱清科,李依璇,等.陕北黄土区不同林地土壤干燥化效应[J].生态学报,2019,39(19):7161-7168.
- [16] 张晨成,邵明安,王云强,等.黄土区切沟对不同植被下土壤水分时空变异的影响[J].水科学进展,2016,27(5):679-686.
- [17] Li T C, Shao M A, Jia Y H, et al. Profile distribution of soil moisture in the gully on the northern Loess Plateau, China [J].Catena,2018,171:460-468.
- [18] 王承书,高峰,孙文义,等.黄土丘陵沟壑区坡沟系统不同降雨类型的土壤入渗特征[J].生态学报,2021,41(8):3111-3122.
- [19] Gou Q P, Zhu Q K. Response of deep soil moisture to different vegetation types in the Loess Plateau of northern Shannxi, China [J].Scientific Reports,2021,11(1):15098-15098.
- [20] Shen M S, Zhang J J, Zhang S H, et al. Seasonal variations in the influence of vegetation cover on soil water on the loess hillslope [J].Journal of Mountain Science,2020,17(9):2148-2160.
- [21] Li B B, Zhang W T, Li S J, et al. Severe depletion of available deep soil water induced by revegetation on the arid and semiarid Loess Plateau [J].Forest Ecology and Management,2021,491:e119156.
- [22] 杨鸿琨,苏正安,朱大鹏,等.集水区耕作对干热河谷冲沟沟头溯源侵蚀过程的影响[J].农业工程学报,2019,35(21):151-157.
- [23] 程立平,刘文兆,李志.黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征[J].生态学报,2014,34(8):1975-1983.
- [24] 王志强,刘宝元,张岩.不同植被类型对厚层黄土剖面水分含量的影响[J].地理学报,2008,63(7):703-713.
- [25] 陈明玉,邵明安,李同川,等.黄土高原典型切沟土壤水分时空分布特征及其影响因素[J].土壤学报,2021,58(2):381-390.