

等高反坡阶措施对滇中红壤坡耕地土壤贮水量的影响

陈雪, 宋娅丽, 王克勤

(西南林业大学 生态与水土保持学院, 昆明 650224)

摘 要:为探讨布设等高反坡阶后土壤水分驱动特征,揭示其水源涵养能力,以滇中昆明市北郊松华坝迳者小流域为研究区,采用野外监测与室内测试分析相结合的方法,分析了 2017 年 5 月 1 日—2018 年 4 月 30 日期间不同土层深度(0—100 cm)土壤贮水量时空变化特征及其与其他物理性质的关系。结果表明:(1) 试验期间雨季和旱季降雨量分别为 528.5, 41.5 mm, 占试验年降雨量的 92.7%, 7.3%, I_{30} (最大 30 分钟雨强)与降雨量的整体变化趋势一致;(2) 布设等高反坡阶后,各土层平均土壤贮水量较原状坡耕地在雨季和旱季分别增加 9.6%~13.5%, 10.0%~23.9%;(3) 布设等高反坡阶后坡耕地土壤贮水量变异系数明显减小($p < 0.05$),各土层深度下土壤贮水量变异系数的大小为: 20 cm > 40 cm > 60 cm > 80 cm > 100 cm;(4) 土壤贮水量随土层深度的增加明显减弱,布设等高反坡阶对坡耕地土壤贮水量的影响表现为 40 cm > 20 cm > 60 cm > 80 cm > 100 cm;(5) 等高反坡阶处理和不同土层深度交互作用对土壤贮水量的影响显著,修正模型平方和达到 48 149.124。综上,等高反坡阶处理对坡耕地土壤的贮水能力具有明显的提高作用,对坡耕地地表径流拦蓄,增加水分入渗和减少土壤流失改善作用显著。

关键词:等高反坡阶; 坡耕地; 土壤贮水量; 水源涵养能力

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)06-0092-08

Effect of Contour Reverse-Slope Terrace Measures on Soil Water Storage in Sloping Farmland of Red Soil in Central Yunnan Province

CHEN Xue, SONG Yali, WANG Keqin

(College of Ecology and Soil & Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: In order to explore the characteristics of soil moisture driving under contour reverse-slope terrace, reveal its water conservation ability, the small watershed of Yi Songhuaba Dam in northern suburb of Kunming in central Yunnan was selected as a research area in this study. By means of field monitoring and indoor test analysis, the spatial and temporal variation characteristics of soil water storage at different soil depths (0—100 cm) from May 1st, 2017 to April 30th, 2018 and their relationship with other physical properties were analyzed. The results showed that: (1) during the experiment, the amounts of rainfall in rainy season and dry season were 528.5 mm and 41.5 mm, respectively, accounting for 92.7% and 7.3% of the annual rainfall in the experiment. I_{30} (maximum 30 minutes rain intensity) was consistent with the overall change trend of rainfall; (2) under contour reverse-slope terrace, the average soil water storage in each soil layer increased by 9.6%~13.5% and 10.0%~23.9%, respectively, compared with the original sloping farmland in rainy season and dry season; (3) the variation coefficient of soil water storage in sloping farmlands under contour reverse-slope terrace decreased significantly ($p < 0.05$), the variation coefficient of soil water storage in different soil depths decreased in the order: 20 cm > 40 cm > 60 cm > 80 cm > 100 cm; (4) soil water storage decreased significantly with the increase of soil depth, and the influence of contour reverse-slope terrace on soil water storage in sloping farmland decreased in the sequence: 40 cm > 20 cm > 60 cm > 80 cm > 100 cm; (5) the effect of the interaction of contour reverse-slope terrace treatment and different soil depths on soil

收稿日期:2019-01-03

修回日期:2019-02-17

资助项目:云南省科技计划重点研发项目(2018BB018);国家自然科学基金(30660037);云南省应用基础研究青年项目(2016FD044);云南省高校优势特色重点学科(生态学)建设项目(050005113111)

第一作者:陈雪(1992—),女,山东泰安人,硕士,研究方向为土壤水分特征研究。E-mail:13053862529@163.com

通信作者:王克勤(1964—),男,甘肃庄浪人,博导,教授,主要从事小流域环境综合治理的理论与技术研究。E-mail:wangkeqin7389@sina.com

water storage was significant, and the sum of squares of the modified model reached 48 149.124. In conclusion, the treatment of contour reverse-slope terrace had the significant effect on the soil water storage capacity, which played an important role in promoting the surface runoff interception, increasing water infiltration and reducing soil loss.

Keywords: contour reverse-slope terrace; slope farmland; soil water storage; water conservation capacity

土壤水分是衡量土壤质量高低的重要指标^[1],也是坡耕地农业生产中的主要限制因子,其含量的多少和分布能直接影响作物产量的形成^[2-3]。土壤贮水量可以系统地研究不同时段坡耕地的土壤水分利用情况,反映了土壤水分的真实值^[4],可通过土壤体积含水量与土壤厚度的乘积得到^[5]。已有研究^[6]表明,采取合理水土保持措施可以有效减轻风蚀和水蚀,增加土壤蓄水保墒能力。如郭清毅^[7]和郑洪兵^[1]等研究表明,保护性耕作结合深松能有效改善耕层结构,显著提高土壤含水量及贮水量,提高自然降水利用效率。杨永辉等^[8]研究认为植被的恢复与重建改善了土壤结构、提高了土壤入渗性能和坡面降雨利用潜力。贺慧丹等^[9]以三江源玛沁县高寒草甸为研究对象,研究了封育和未封育措施下土壤平均贮水量,表明封育措施一定程度上提高了高寒草甸土壤贮水量,利于水源涵养。可见,开展特定水土保持措施下土壤贮水量的研究对于区域高效利用自然降水、提高自然降水利用效率和增加作物产量具有重要意义。

等高反坡阶作为坡耕地水土保持控制措施之一,可有效减少水土流失增加入渗,其机理在于可直接蓄水减沙,对坡面降水进行再分配,同时阻止泥沙的产生,从而对产生的径流和泥沙起到调控作用^[10-11]。目前有关等高反坡阶对坡耕地水土流失的调控作用研究多集中于减流减沙效应、面源污染输出特征、土壤碳库等方面^[12-15],而对等高反坡阶处理下坡耕地土壤贮水量的研究鲜有报道。滇中昆明松华坝水源区迤者小流域内山区半山区面积占总面积的95%以上,耕地面积近6 500 hm²,一半以上为坡耕地^[10]。云南干湿季节分明,降雨主要集中于5—10月的雨季,而旱季(11月—次年4月)降雨量极少,更是加剧了坡耕地雨期严重水土流失和早期的干旱。因此,本试验选取滇中昆明市北郊的松华坝水源区迤者小流域为研究区,通过野外定位监测与室内测试分析相结合的方法,分析2017年5月1日—2018年4月30日期间不同季节下各土层深度处(20, 40, 60, 80, 100 cm)土壤贮水量变化规律,探讨土壤贮水量特征及其与其他物理性质的关系,以期为滇中松华坝水源区节水抗旱及保水蓄水技术的推广应用提供理论依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

迤者小流域位于昆明市盘龙区滇源街道西南部,大部分属于迤者村委会范围,地位于北纬24°14′43″—25°12′48″,东经102°48′37″—102°44′51″。小流域呈不规则纺锤形,南北长6.7 km,土地总面积13.26 km²。小流域东连金钟村,西部、南部与富民县毗邻,北到阿子营乡交界。为滇池水系盘龙江一级支流源头区,地势总体西北高东南低,最高海拔2 589.5 m,位于流域西南部野猫山,最低海拔2 010 m,位于流域河流出口处,相对高差479.5 m,平均海拔2 220 m。地面坡度西北和东部河流出口处较缓,坡度大多为5°~25°,平均坡长约1 000 m;西部、南部和东北端受河流切割影响,坡度较陡,坡度多数为10°~36°,平均坡长约为600 m。气候特点夏秋温热,冬春干凉,属北亚热带和暖温带混合型气候,多年平均气温13.8℃。流域内多年平均降雨量757.2 mm,其中5—10月为雨季,降雨量约占全年的85%以上。该流域内土壤主要为红壤,占流域土地总面积的89.3%。土壤pH值4.39,土壤有机质含量约为5.39 g/kg,土壤中速效性钾的含量约为659.44 mg/kg。表层土壤全氮含量约为0.94 g/kg,水解氮含量120.95 mg/kg。表层土壤全磷含量约为0.35 g/kg,速效磷含量92.39 mg/kg。

1.2 样地选择与样品的采集

试验地位于昆明市松华坝水源区迤者小流域,根据该地区地形条件,选择一块典型坡耕地进行试验布设。试验样地包括原状对照坡耕地和2009年布设的等高反坡阶处理坡耕地,分别编号为1[#]、2[#]小区,样地示意图见图1A。坡度均为15°,东西坡向,中坡位。等高反坡阶设置阶宽1.2 m,反坡5°,两条等高反坡阶之间距离为7.5 m,等高反坡阶剖面示意图见图1B。

在原状对照和等高反坡阶处理坡耕地上,于2017年4月沿坡面在坡上、坡中和坡下分别各选择3块样地,每块样地沿对角线设置5个1 m×1 m的样方。然后挖1 m深的土壤剖面,按照0—10 cm, 10—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm, 80—100 cm共6个土层分别取样,用于测定土壤物理背景值,文中所有数据均为3次重复平均值。

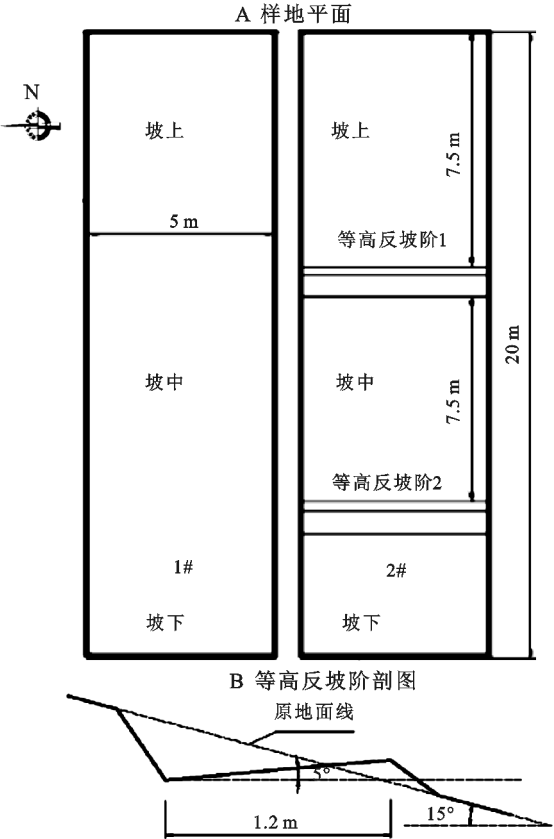


图 1 样地平面及等高反坡阶示意图

表 1 不同土层深度的土壤物理性状

土层 深度/cm	土壤容重/ (g·cm ⁻³)		总孔隙度/%		毛管孔隙度/%		通气孔隙度/%		黏粒 (<0.001 mm)/%		粉粒 (0.05~0.001 mm)/%		砂粒 (1~0.05 mm)/%		饱和导水率/ (mm·min ⁻¹)	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
0—10	1.31	1.33	47.02	51.03	38.39	42.03	8.63	8.99	0.0001	0.0001	51.970	55.941	47.114	44.070	0.430	1.804
10—20	1.24	1.17	51.69	52.29	40.46	41.58	11.23	10.71	0.0006	0.0001	60.624	71.762	38.416	28.241	1.243	2.313
20—40	1.32	1.16	49.23	50.59	39.37	35.24	9.86	15.35	0.0040	0.0002	58.337	71.470	41.730	28.532	0.392	2.043
40—60	1.38	1.30	42.77	42.59	36.74	37.67	6.03	4.92	0.0010	0.0007	57.352	68.794	42.500	31.210	0.290	2.571
60—80	1.46	1.40	42.21	41.83	37.16	36.74	5.05	5.09	0.0480	0.0010	55.320	62.484	44.612	37.522	0.185	2.049
80—100	1.50	1.40	42.07	41.96	36.38	37.24	5.69	4.72	0.0020	0.0017	47.114	47.876	52.925	52.110	0.087	0.175

注：A 表示原状坡耕地，B 表示等高反坡阶处理坡耕地。

1.3.2 降雨特征观测及土壤水分的测定 观测记录试验年度内次降雨量,使用自记雨量计(美国,型号 RG2-M)记录降雨过程,并对降雨过程进行分析。根据云南省多年平均降雨量划分,将 5—10 月划分为雨季,降雨量约占全年的 85%以上;11 月—次年 4 月划分为旱季,降雨量仅为全年的 15%。

为了对滇中松华坝水源区红壤坡耕地不同坡位的土壤水分变化进行实时动态监测,在昆明迤者小流域典型坡耕地径流小区的坡面上布设 6 组 TDR 仪(美国 Soilmoisture 公司生产的 mini Trase 土壤水分监测系统,型号 6050X3)探头。监测深度为 0—100 cm,每 20 cm 为 1 层,共分为 5 层,各个点位 40—100 cm 深度土壤水分使用直接埋在各处的 TDR 仪探头测定,表层 20 cm 深度土壤水分使用直插式波导管

1.3 样品的测定

1.3.1 土壤物理背景值的测定 土壤物理性状对土壤水分运动有重要影响^[16],试验前,测定不同土层深度的土壤物理性状,测定方法如下:

土壤容重采用环刀法,环刀体积 100 cm³。降雨前取样,取 0—100 cm 土层容重,每个小区均取三点样,用平均值代表小区容重。

总孔隙度 $\rho = (93.947 - 32.995d) \times 100\%$ ^[17], d 为土石混合体容重;毛管孔隙度采用室内环刀原状土吸水法测定;通气孔隙度为总孔隙度减去毛管孔隙度。

粒径组成分析采用马尔文 MS 2000 激光粒度分析仪测定,土壤质地采用卡庆斯基制分类标准。试验土样经过如下预处理:加 10% 的 H₂O₂ 10 ml 煮沸至反应平静,冷却;加 10% 盐酸 10 ml 煮沸,注入蒸馏水,静置一夜。抽去蒸馏水,洗去过量的盐酸,反复清洗,彻底清除酸离子。所有样品在测试前都加入 10 ml 的 0.5 mol/L 六偏磷酸钠,用超声波进行分散^[18]。

土壤饱和导水率(K_s)采用室内环刀定水头法,水头高控制在 5 cm。

不同土层深度的土壤物理性状见表 1。

(美国,型号 6002F1)直接插入坡耕地表层进行测定,测定前用烘干法对 TDR 仪进行标定。本研究采用 2017 年 5 月 1 日—2018 年 4 月 30 日期间的土壤含水量监测数据,雨季逐日监测,旱季每 15 d 监测 1 次,研究在不同土层深度处的土壤水分变化情况,本文所描述的含水量均为体积含水量。

1.3.3 土壤贮水量的计算 自然条件下一定厚度的土壤所能容纳的实际含水量,以 mm 降水量表示,计算公式^[5]如下:

$$v = h \times \theta / 10 \tag{1}$$

式中: v 为土壤贮水量(mm); h 为土层厚度(cm); θ 为土壤体积含水量(cm³/cm³)。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2010 软件进行数据初步处理与分

析,并采用 SPSS 21.0 软件中单因素方差分析(One-way ANOVA)方法分析等高反坡阶对不同土层土壤容重、孔隙度、土壤质地、饱和导水率及土壤体积含水量影响,检验显著性并做多重比较。采用 Excel 2010 软件和 Auto CAD 2007 软件制图。

2 结果与分析

2.1 降雨特征分析

降雨特征包括降雨量、降雨强度等指标^[19],本研究降雨强度选取最大 30 分钟雨强(I_{30})。图 2 为试验年份(2017 年 5 月—2018 年 4 月)各月降雨量及 I_{30} 分布特征。2017 年的降雨总量为 576.9 mm,较多年平均年降雨量 613.9 mm 低 37 mm,总体来说,2017 年属枯水年。雨季 2017 年 5 月 1 日—10 月 31 日降雨量为 528.5 mm,占试验年降雨量的 92.7%,其中 6 月、7 月、8 月份降雨量较多,分别为 105.6, 114.6, 131.2 mm,占雨季降雨量的 20.0%, 21.7%, 24.8%,总量占雨季降雨量的 66.5%。旱季 2017 年 11 月 1 日—2018 年 4 月 30 日降雨量为 41.5 mm,仅占试验年降雨量的 7.3%,其中 1 月、2 月、3 月份降雨量较少,分别为 1.6, 0.0, 4.6 mm,占旱季降雨量的 3.9%, 0.0%, 11.1%,总量占旱季降雨量的 14.9%。从图 2 中可以看出降雨量与 I_{30} 的整体变化趋势一致,最大降雨量出现在 8 月,最大 I_{30} 出现在 7 月,最小降雨量和最小 I_{30} 均出现在 2 月。

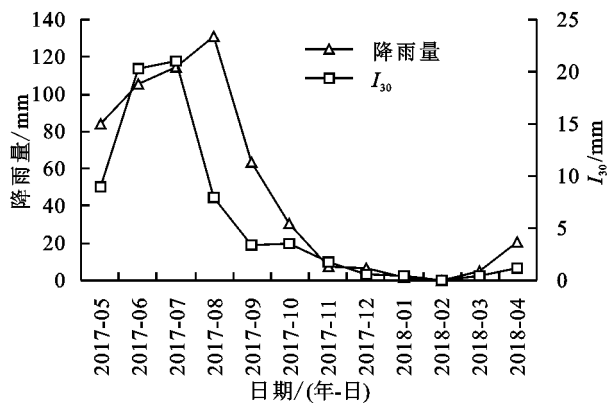


图 2 2017 年 5 月—2018 年 4 月各月降雨特征

2.2 等高反坡阶下土壤贮水量的垂直变化规律

表 2 为试验年雨季和旱季原状坡耕地和等高反坡阶处理坡耕地在不同土层深度的土壤贮水量,各土层深度处的土壤贮水量由坡面上中下 3 个坡位各土层深度逐日平均贮水量平均得到。在雨季,原状坡耕地 20, 40, 60, 80, 100 cm 深度处土壤贮水量分别为 49.90, 93.12, 130.62, 144.40, 186.40 mm(表 2),布设等高反坡阶后,各土层深度下土壤贮水量分别增加了

13.5%, 10.4%, 10.3%, 11.2%, 9.6%;在旱季,原状坡耕地 20, 40, 60, 80, 100 cm 深度处土壤贮水量为 32.82, 73.44, 94.68, 89.52, 125.60 mm,布设等高反坡阶后,各土层深度下土壤贮水量分别增加了 23.3%, 23.9%, 13.6%, 17.5%, 10.0%。总体上看,坡耕地布设等高反坡阶后,各土层平均土壤贮水量均显著增加($p < 0.05$),其中布设等高反坡阶对 20 cm 和 40 cm 土层的改善效果优于其他土层,对坡耕地土壤贮水量的影响力表现为 40 cm > 20 cm > 60 cm > 80 cm > 100 cm。

布设等高反坡阶后坡耕地各深度处土壤贮水量变异系数明显减小($p < 0.05$),在雨季,原状坡耕地 20, 40, 60, 80, 100 cm 深度处土壤贮水量变异系数为 22.49%, 8.09%, 3.05%, 1.64%, 0.80%,布设等高反坡阶后,各土层深度下土壤贮水量变异系数分别减小了 7.16%, 0.87%, 9.18%, 7.32%, 31.25%;在旱季,原状坡耕地 20, 40, 60, 80, 100 cm 深度处土壤贮水量变异系数为 19.34%, 8.00%, 2.60%, 1.15%, 0.51%,布设等高反坡阶后,各土层深度下土壤贮水量变异系数分别减小了 2.33%, 15.63%, 1.54%, 3.48%, 7.84%。这表明,在降雨量相对充沛的时期,土壤含水量相对较高,土壤贮水量变异程度较高;旱季由于降雨量较小,土壤含水量相对较低,土壤贮水量变异程度略小。另外,随着坡耕地土层深度的增加,变异系数逐渐减小,各土层深度下土壤贮水量变异系数的大小为:20 cm > 40 cm > 60 cm > 80 cm > 100 cm。这主要是由于表层土壤水分受降雨、径流、入渗、蒸发等外界条件的影响比较大,而大气边界的影响随着土层深度增加逐渐减弱,因此变异程度逐渐减小。

2.3 等高反坡阶下土壤贮水量的时间变化规律

由于不同时期降水、温度、土壤蒸发强度等的不同,原状坡耕地与等高反坡阶处理坡耕地土壤贮水量不仅表现出随土层深度变化而变化的特点,而且随时间的动态变化也存在着明显的差异。为了研究坡耕地不同土层深度土壤贮水量的年内动态变化,探究等高反坡阶在土壤贮水量年内动态变化中所起的作用,在试验年内将 1[#], 2[#] 小区的两块坡耕地每隔 15 d 的各土层深度土壤贮水量数据进行汇总(图 3)。从图 3 中可以看出,坡耕地土壤各土层深度平均土壤贮水量均表现为雨季 > 旱季,而等高反坡阶对各土层土壤贮水量的增加效果显著表现为雨季小于旱季($p < 0.05$),说明等高反坡阶对旱季土壤贮水量的提高作用更为明显。布设等高反坡阶后坡耕地土壤贮水量变异系数的变化均表现为雨季大于旱季($p < 0.05$)。土壤贮水量季节动态变化与降雨量基

本一致,坡耕地 20 cm 深度处土壤贮水量随着雨季来临,进入一个升高期,在 7 月 15 日达到顶峰(72~76 mm),之后在雨季呈现波动,但是土壤贮水量均稳定在

49 mm 以上;从 10 月后,随着降雨减少,土壤贮水量逐渐降低,降低的过程一直持续到 2018 年 2 月,随后持续保持在较低的水平,稳定在 25 mm 左右。

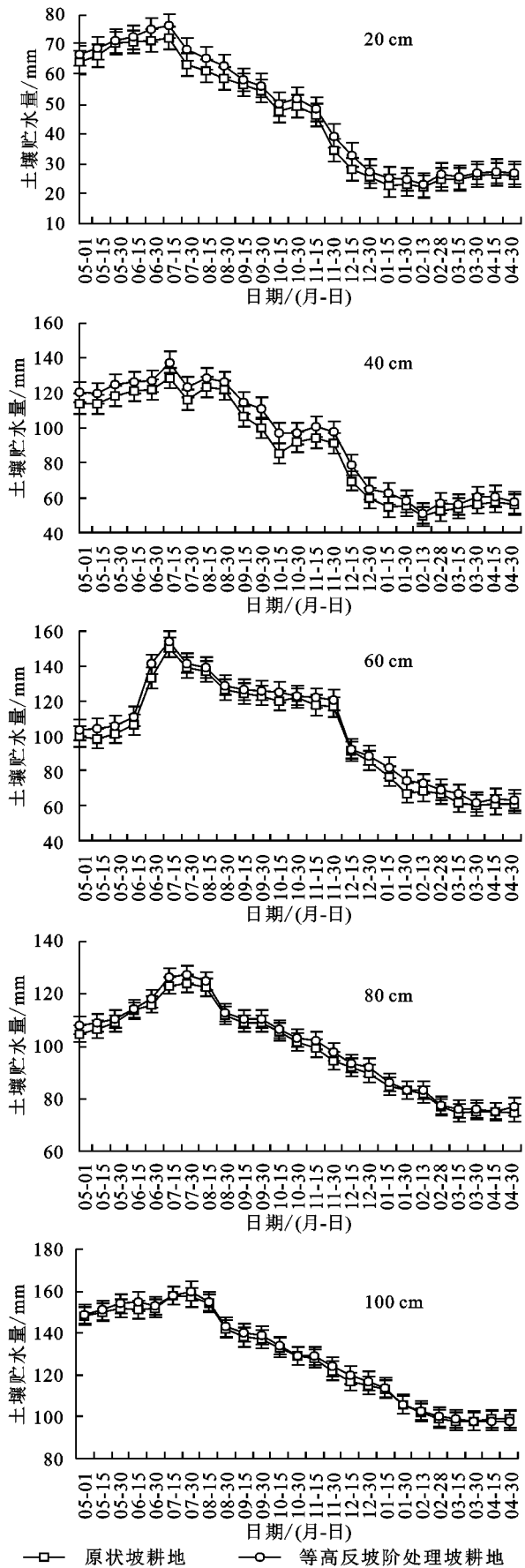
表 2 布设等高反坡阶对土壤贮水量垂直变化的影响

干湿季	类型	土层	土壤贮水量特征值				
		深度/cm	最大值/mm	最小值/mm	平均值/mm	标准差	变异系数/%
雨季	原状坡耕地	20	76.60	35.20	49.90	11.22	22.49
		40	136.40	60.80	93.12	7.53	8.09
		60	172.80	86.40	130.62	3.98	3.05
		80	196.00	93.60	144.40	2.37	1.64
		100	253.00	119.00	186.40	1.49	0.80
	等高反坡阶 处理坡耕地	20	80.20	43.80	56.64	11.83	20.88
		40	146.00	66.00	102.80	8.24	8.02
		60	193.20	94.80	144.06	3.99	2.77
		80	227.20	108.80	160.56	2.44	1.52
		100	297.00	142.00	204.30	1.23	0.55
旱季	原状坡耕地	20	55.20	17.40	32.82	6.35	19.34
		40	116.80	46.00	73.44	5.88	8.00
		60	118.80	61.80	94.68	2.46	2.60
		80	117.60	73.60	89.52	1.03	1.15
		100	152.00	98.00	125.60	0.64	0.51
	等高反坡阶 处理坡耕地	20	61.60	26.20	40.48	7.65	18.89
		40	132.40	58.80	91.00	6.14	6.75
		60	133.20	76.20	107.58	2.75	2.56
		80	130.40	86.40	105.20	1.17	1.11
		100	165.00	112.00	138.10	0.65	0.47

坡耕地 40 cm 深度处土壤贮水量年内变化趋势和 20 cm 深度处一致,随着雨季来临进入一个升高期,在 7 月 15 日达到顶峰,达到 128~137 mm 的水平,之后在雨季呈现波动,但是土壤贮水量均稳定在 92 mm 以上;从 10 月后,随着降雨减少,土壤贮水量逐渐降低,降低的过程一直持续到 2018 年 2 月,随后持续保持在较低的水平,稳定在 57 mm 左右。坡耕地 60 cm 深度处土壤贮水量年内变化幅度略小,最高土壤贮水量出现在 7 月 15 日,达到 150~154 mm 的水平,旱季最低土壤贮水量在 63 mm 左右。相比之下,坡耕地 80 cm 和 100 cm 深度处土壤贮水量全年变化均较小,主要原因是其受地表外界条件影响较小,同时进入土壤深层的水分较少。布设等高反坡阶后,20 cm 和 40 cm 处均呈现为雨季前期等高反坡阶处理坡耕地土壤贮水量升高速率大于原状坡耕地,而雨季结束后等高反坡阶处理坡耕地土壤贮水量降低速率小于原状坡耕地,60 cm,80 cm 和 100 cm 处这一规律不明显。

2.4 等高反坡阶下土壤物理性质与土壤贮水量之间的相关性

土壤贮水量在同一气候条件下因土壤质地等的不同造成土壤中水分含量的垂直梯度和水平分布的差异^[20-21]。由表 3 可见,土壤物理因子中土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度、通气孔隙度、粉粒含量、砂粒含量和土壤饱和导水率与土壤贮水量都达到了极显著相关($p<0.01$),其相关系数的大小顺序为土壤容重>砂粒含量>土壤饱和导水率>通气孔隙度>粉粒含量>毛管孔隙度>总孔隙度。黏粒含量与土壤贮水量的相关性不显著。各土壤物理因子间 X_1 与 X_2 , X_4 、 X_6 , X_7 , X_8 ; X_2 与 X_3 , X_4 ; X_3 与 X_5 ; X_4 与 X_5 ; X_6 与 X_7 , X_8 ; X_7 与 X_8 相关关系均达到极显著的水平($p<0.01$), X_1 与 X_3 ; X_3 与 X_6 , X_7 , X_8 达到显著水平($p<0.05$),说明在布设等高反坡阶后,土壤物理因子间存在交互作用。不同土层深度、等高反坡阶处理及其交互作用对土壤贮水量的影响均达到显著水平(表 4)。修正模型平方和最高且达到 48 149.124,即等高反坡阶处理与土层深度的交互作用对土壤贮水量的影响最大。



注:横坐标中 05-01—12-30 为 2017 年 5 月 1 日—2017 年 12 月 30 日,01-15—04-30 为 2018 年 1 月 15 日—2018 年 4 月 30 日,数据间隔为 15 d。

图 3 布设等高反坡阶对坡耕地不同土层深度时间变化的影响

3 讨论

降雨到达地面后被分解为两个部分,一部分形成地表径流,另一部分则入渗到土壤中形成土壤水分,而降雨特性和下垫面结构则决定了地表径流和土壤水分两者之间的比例^[22-23]。降雨入渗决定着土壤水分的分布特征^[24],进而影响着坡耕地作物的生长情况和稳定性。本研究选取的试验年份为 2017 年 5 月—2018 年 4 月,从多年平均年降雨量来看,2017 年降水较低,属枯水年。雨季 5 月 1 日—10 月 31 日降雨量为 528.5 mm,旱季 11 月 1 日—4 月 30 日降雨量为 41.5 mm,最大降雨量出现在 7—8 月,最大 I_{30} 出现在 7 月,最小降雨量和最小 I_{30} 均出现在 2 月,土壤贮水量与降雨量和 I_{30} 的变化一致,说明降雨特征直接决定了土壤贮水量。该区降雨年内季节分布不均且变率大,雨季雨水充沛而旱季雨水非常匮乏,降雨作为农业生产中一个不可预测的因素,给农业的持续发展造成很大影响,因此,采取相应的水土保持措施对坡耕地蓄水保墒是必要的。

本研究中,布设等高反坡阶后,各土层深度下土壤贮水量在雨季较原状坡耕地增加了 9.6%~13.5%,在旱季增加了 10.0%~23.9%。总体规律表现为坡耕地土壤各土层深度平均土壤贮水量在雨季大于旱季,郑洪兵等^[1]研究认为土壤贮水量随季节呈先增后降的趋势变化,这与本研究结果一致。布设等高反坡阶后,红壤坡耕地各土层平均土壤贮水量增加明显 ($p<0.05$),其中对 20 cm 和 40 cm 土层的改善效果优于其他土层,对不同土层土壤贮水量的影响表现为 40 cm>20 cm>60 cm>80 cm>100 cm,且雨季小于旱季 ($p<0.05$)。这说明布设等高反坡阶可以显著提高旱季土壤贮水量,从而增加全年贮水量,使土壤水分能够进入更深层土壤,从而更有效保持土壤水分,提高作物的生长。布设等高反坡阶后,雨季和旱季坡耕地土壤贮水量的变异系数均有所减小,表明等高反坡阶具有显著的调控土壤水分的效果,且效果稳定,这与华锦欣等^[13]研究结果一致,等高反坡阶具有拦蓄地表径流和再分配的功能,其保水效果优于原状坡面。另外,随着坡耕地土层深度的增加,变异系数逐渐减小,各土层深度下土壤贮水量变异系数的大小为:20 cm>40 cm>60 cm>80 cm>100 cm,这与王庆海^[23]、宁婷^[25]等研究结果一致。这是由于随着土层深度的增加,土壤贮水量受降雨、入渗、蒸发等的影响逐渐减弱,因此变异程度逐渐减小。

研究结果反映出原状坡耕地与等高反坡阶处理坡耕地土壤贮水量不仅表现出一定的垂直变化规律,而且随时间的动态变化也存在着明显的差异。在试验年内每隔 15 d 对两块坡耕地各土层深度的土壤贮水量数据进行汇总分析得到,布设等高反坡阶后,20 cm 和 40 cm 处均呈现为雨季前期等高反坡阶处理坡耕地土壤贮水量升高速率大于原状坡耕地,而雨季结束后等高反坡阶处理坡耕地土壤贮水量降低速率小于原状坡耕地,说明等高反坡阶能够使坡耕地表层在雨季开始时快速汇集水分,而在雨季结束后能够有效保存水分。不同层次土

壤水分状况对降雨的响应是复杂的^[26],在 0—100 cm 剖面上,土壤水分贮量与降雨量具有很强的一致性^[27],本研究中,土壤贮水量的季节动态变化与降雨量基本一致,这与贺慧丹^[9]、吕渡^[28]等研究结果一致。各土壤物理因子与土壤贮水量的相关性大小为土壤容重>砂粒含量>土壤饱和导水率>通气孔隙度>粉粒含量>毛管孔隙度>总孔隙度。土层深度、等高反坡阶处理及其交互作用对土壤贮水量的影响最大,修正模型平方和达到 48 149.124,土层深度和等高反坡阶处理对土壤贮水量的影响也均达到了显著性水平($p<0.05$)。

表 3 等高反坡阶下土壤物理性质与土壤贮水量之间的相关性

项目	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	Y
X_1	1								
X_2	-0.418**	1							
X_3	-0.264*	0.611**	1						
X_4	-0.356**	0.867**	0.135	1					
X_5	0.121	0.118	-0.316**	0.347**	1				
X_6	-0.341**	0.123	0.255*	-0.006	-0.190	1			
X_7	0.340**	-0.123	-0.254*	0.007	0.187	-1.000**	1		
X_8	-0.311**	0.139	0.249*	0.017	-0.210	0.803**	-0.802**	1	
Y	0.565**	-0.643**	-0.640**	-0.402**	0.218	-0.414**	0.412**	-0.385**	1

注: $X_1,X_2,X_3,X_4,X_5,X_6,X_7,X_8,Y$ 分别表示土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度、通气孔隙度、黏粒含量、粉粒含量、砂粒含量、土壤饱和导水率和土壤贮水量。*表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关,*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

表 4 等高反坡阶和不同土层对土壤贮水量的方差分析结果

差异来源	土壤贮水量/mm				
	离差平方和	df	均方	F	Sig.
修正模型	48149.124 ^a	9	5349.903	1143141.602	0.000
土层深度	46810.211	4	11702.553	2500545.468	0.000
等高反坡阶处理	1268.670	1	1268.670	271083.391	0.000
土层深度×等高反坡阶处理	70.243	4	17.561	3752.289	0.000

注:^a代表 R^2 ,调整的 $R^2=1.000$ 。

综上,等高反坡阶处理对坡耕地土壤的贮水能力具有明显的提高作用,对坡耕地地表径流拦蓄、增加水分入渗和减少土壤流失起到了明显的改善作用。等高反坡阶不仅具有很好的保墒保水功能,且操作简便、占用耕种面积小,其应用价值应该大力推广。小流域是滇中地区综合治理的基本单元,将来应集中于小流域尺度土壤贮水量的研究,这将有利于更好地理解小流域尺度的生态水文过程及小流域水土资源管理。

4 结论

(1) 试验期间,雨季 5 月 1 日—10 月 31 日和旱季 11 月 1 日—4 月 30 日降雨量分别为 528.5,41.5 mm,占试验年降雨量的 92.7%,7.3%; I_{30} 与降雨量

的整体变化一致,最大降雨量和 I_{30} 分别出现在 8 月和 7 月,最小降雨量和 I_{30} 均出现在 2 月,降雨年内季节分布不均且变率大;

(2) 布设等高反坡阶后,各土层平均土壤贮水量显著增加($p<0.05$),分别在雨季和旱季增加了 9.6%~13.5%和 10.0%~23.9%,其水源涵养能力优于原状坡面;坡耕地表层土壤贮水量年内变化较大,随深度的变化明显减弱,布设等高反坡阶对坡耕地土壤贮水量的影响表现为 40 cm>20 cm>60 cm>80 cm>100 cm;

(3) 坡耕地各深度处土壤贮水量变异系数的变化均表现为雨季大于旱季($p<0.05$),布设等高反坡阶后坡耕地各土层土壤贮水量变异系数明显减小($p<0.05$),分别在雨季和旱季减小 0.87%~31.25%和 1.54%~7.84%,较原状坡面提高了土壤的水源涵养能力;

(4) 各土壤物理因子与土壤贮水量的相关性为:土壤容重>砂粒含量>土壤饱和导水率>通气孔隙度>粉粒含量>毛管孔隙度>总孔隙度;等高反坡阶处理和不同土层深度对土壤贮水量的影响显著,修正模型平方和达到 48 149.124。

参考文献:

- [1] 郑洪兵,刘武仁,罗洋,等.耕作方式对农田土壤水分变化特征及水分利用效率的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):264-270.
- [2] Blevins R L, Cook D, Phillips S H, et al. Influence of no-tillage on soil moisture [J]. Agronomy Journal, 1971,63(4):593-596.
- [3] López M V, Arrúe J L, Sánchez-Girón V. A comparison between seasonal changes in soil water storage and penetration resistance under conventional and conservation tillage systems in Aragón [J]. Soil & Tillage Research, 1996,37(4):251-271.
- [4] He J, Kuhn N J, Zhang X M, et al. Effects of 10 years of conservation tillage on soil properties and productivity in the farming-pastoral ecotone of Inner Mongolia, China [J]. Soil Use and Management, 2009,25(2):201-209.
- [5] 张冬梅.覆盖耕作措施对土壤环境和玉米生长的影响[D].太原:山西大学,2007.
- [6] 柏炜霞,李军,王玉玲,等.渭北旱塬小麦玉米轮作区不同耕作方式对土壤水分和作物产量的影响[J].中国农业科学,2014,47(5):880-894.
- [7] 郭清毅,黄高宝, Li Guangdi,等.保护性耕作对旱地麦—豆双序列轮作农田土壤水分及利用效率的影响[J].水土保持学报,2005,19(3):165-169.
- [8] 杨永辉,赵世伟,雷廷武,等.宁南黄土丘陵区不同植被下土壤入渗性能[J].应用生态学报,2008,19(5):1040-1045.
- [9] 贺慧丹,祝景彬,未亚西,等.高寒草甸土壤贮水量对封育措施的响应[J].水土保持研究,2018,25(3):210-223.
- [10] 赵春雷,邵明安,贾小旭.黄土高原北部坡面尺度土壤饱和导水率分布与模拟[J].水科学进展,2014,25(6):806-815.
- [11] 赵合理,蒋定生,范兴科.不同水土保持措施对坡面降水再分配的影响[J].水土保持研究,1996,3(2):75-83.
- [12] 王帅兵,王克勤,宋娅丽,等.等高反坡阶对昆明市松华坝水源区坡耕地氮、磷流失的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):39-45.
- [13] 华锦欣,王克勤,张香群,等.等高反坡阶对坡耕地土壤水分空间分布的影响:以昆明松花坝水源区为例[J].人民长江,2016,47(1):11-14.
- [14] 陈敏全,王克勤.等高反坡阶对坡耕地土壤碳库的影响[J].水土保持通报,2015,35(6):41-46.
- [15] 王帅兵,宋娅丽,王克勤,等.不同雨型下等高反坡阶对红壤坡耕地氮、磷流失的影响[J].农业工程学报,2018,34(13):160-169.
- [16] 李坤,姚文艺,肖培青,等.黄丘区自然草地对坡面土壤入渗的影响机制[J].人民黄河,2017,39(6):82-85.
- [17] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室.土壤物理性质测定法[M].北京:科学出版社,1978.
- [18] 程鹏,高抒,李徐生.激光粒度仪测试结果及其与沉降法、筛析法的比较[J].沉积学报,2001,19(3):449-455.
- [19] 郭玉琴,钟博星.乌江流域 1956—2014 年降雨特征及输沙效应[J].水土保持通报,2018,38(1):1-7.
- [20] 祁如英,朱宝文,祁永婷.春小麦地和大气观测场土壤贮水量对比分析[J].气象科技,2007,35(4):528-530.
- [21] 盛裴轩,毛节泰,李建国,等.大气物理学[M].北京:北京大学出版社,2003.
- [22] Horton J W. Use of vacuum tubes in measurements [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1935,54(1):93-102.
- [23] 王庆海,庞卓,郑瑞伦,等.模拟降雨条件下草篱对坡地浅层土壤水分分布特征的影响[J].水土保持学报,2016,30(4):110-115.
- [24] 鲁瑞洁,唐清亮,魏殿生,等.青海湖湖东沙地不同沙丘降雨入渗研究[J].中国沙漠,2013,33(3):797-803.
- [25] 宁婷,郭忠升.半干旱黄土丘陵区撂荒坡地土壤水分循环特征[J].生态学报,2015,35(15):5168-5174.
- [26] 李海防,史梅容,王金叶,等.广西猫儿山毛竹林不同层次土壤含水量的降雨响应[J].水土保持研究,2016,23(5):120-123.
- [27] 张洛丹.不同植被类型对陡坡地土壤水分循环的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [28] 吕渡,杨亚辉,赵文慧,等.黄土高原沟壑区不同植被对土壤水分分布特征影响[J].水土保持研究,2018,25(4):60-64.