

金沙江下游季节性干旱区紫色土坡耕地 土壤水分变化特征

徐露^{1,2}, 张丹^{1*}, 向宇国^{1,2}, 陈凡³, 陈玉蓝³, 黄田钊⁴

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 四川省烟草公司凉山州公司, 四川 西昌 615000; 4. 中国科学院成都生物研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 土壤水分是季节性干旱区农业生产的限制因子, 研究紫色土坡耕地土壤水分变化特征有助于解决坡耕地的生态水文型干旱问题。以金沙江下游季节性干旱区紫色土坡耕地为研究对象, 使用 PR2/6 土壤剖面水分测定仪在雨季对 5°、10°、15°、20°、25°、30°坡面 10、20、30、40、60、100 cm 土层的土壤体积含水量进行连续监测, 分析紫色土剖面含水量变化特征。结果表明: 坡耕地土壤水分随时间的变化特征可分为四个阶段: 6 月初至 6 月底为土壤水分恢复期, 7 月初至 8 月中旬为土壤水分快速补充期, 8 月中旬至 8 月底为土壤水分消耗期, 9 月初至 9 月底为土壤水分回升期。土体剖面含水量自上而下呈现逐渐增加的趋势, 且各层含水量都具有显著的差异性和相关性。6 个监测点最大含水量均出现在 100 cm 处, 为 19.67%~33.82%, 最小含水量大多出现在 20 cm 处, 为 3.07%~11.71%。土壤含水量变异系数自上而下逐渐降低, 10 cm 处土壤含水量变异系数最大, 为 8.67%~56.28%, 100 cm 处最小, 为 0.68%~14.76%; 土壤含水量随着坡度的增加总体上呈减小趋势, 在 0~60 cm 土层, 10°监测点的土壤含水量最高, 为 12.20%~20.40%, 在 0~100 cm 土层, 25°监测点的土壤含水量较低, 为 4.28%~19.22%。降雨和坡度对土壤含水量均有显著影响, 二者对土壤含水量的影响随土层深度的增加而减弱。研究结果对紫色土坡面水资源高效利用及提高农业生产力具有重要意义。

关键词: 降雨; 土壤含水量; 紫色土; 季节性干旱区

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2021)03-0585-09

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2020080301

徐露, 张丹, 向宇国, 陈凡, 陈玉蓝, 黄田钊. 金沙江下游季节性干旱区紫色土坡耕地土壤水分变化特征 [J]. 土壤通报, 2021, 52(3): 585 - 593

XU Lu, ZHANG Dan, XIANG Yu-guo, CHEN Fan, CHEN Yu-lan, HUANG Tian-fang. Moisture Characteristics of Purple Soil in a Seasonal Arid Area in the Lower Reaches of the Jinsha River[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(3): 585 - 593

土壤水分是土壤的重要组成物质之一, 是土壤系统中养分和能量循环的载体, 对土壤的形成和发育、植物的生存与生长以及生态系统的恢复, 都有着重要的影响^[1-3]。长期以来, 土壤水分都是限制干旱半干旱地区农业生产和植物生长的主要因子^[4]。位于金沙江下游的季节性干旱区是一类特殊的干旱半干旱地区^[5], 该地区雨热资源丰富, 降水量大, 但时空分布不均, 年蒸发量为降雨量的 2~6 倍, 旱季可达数十倍, 春旱、夏旱、伏旱频繁发生, 土壤水分与其它干旱半干旱区一样匮乏, 易形成季风气候条件下独特的干旱现象^[6-7]。紫色土是金沙江下游地区主要的耕地资源之一, 紫色土作为一种特殊的土类, 土壤水文过程有其特殊性^[8]。一方面, 紫色土母质埋深较浅、极易风化等原因导致土壤中常含有大量砾石, 砾石的存在会改变水分运动通道和过水断面,

并且增加土壤孔隙的弯曲程度, 导致紫色土的土壤水分特征较均质土壤更为复杂^[9]。另一方面, 紫色土典型的土-岩二元结构和泥岩夹层使其降雨产流过程与其他土壤类型有明显差异, 除地表径流外, 壤中流、优先流也极为发育^[10]。目前对紫色土的研究集中在径流动态及其影响因素方面^[8-10], 对坡地内部水分变化规律的研究相对较少。刘刚等^[11]认为对紫色土土壤水分变化特征的研究是认识该区土壤侵蚀和产流机制的基础。李军健等^[12]分析了紫色土旱坡地土壤水分时空分布规律, 结果表明土壤水分具季节性变化特征, 与同期降水量存在相关性, 大雨强下坡面易发生超渗产流, 抑制了降水向坡地土壤水分的转化。程训强等^[13]人采用 TDR 系统对紫色土坡耕地土壤水分进行自动监测, 结果表明坡下 15 cm 处土壤含水量低于坡上、坡中, 而坡下 25 cm 处高于

收稿日期: 2020-08-03; 修订日期: 2021-01-25

基金项目: 中国烟草总公司四川省公司重点科技项目 (SCYC201802) 和四川省重点研发项目 (2019YFG0332) 资助

作者简介: 徐露 (1994-), 女, 四川省成都市人, 博士研究生, 主要从事土壤修复与水土保持研究。E-mail: 1179313196@qq.com

*通讯作者: E-mail: daniezhang@imde.ac.cn

坡上和坡中，其分布差异与土壤容重有一定相关性。吴汉等^[14]人研究了金沙江冲沟发育区土壤水分的时空变化特征，结果表明土壤水分及变异系数随着土层深度的增加均表现出先减小后增加分布特征，表层（10~30 cm）和深层（60~100 cm）土壤水分年内含量高且分配不均，而中间土层（30~60 cm）土壤水分含量相对较少且分配相对均匀。

前人对土壤水分的研究主要集中在华北、西北和青藏高原等干旱半干旱区^[15-17]，有关季节性干旱区紫色土坡耕地土壤水分的研究相对较少。因此，本研究针对金沙江下游地区经常发生季节性干旱制约农业生产发展的特点，选取 6 块不同坡度的紫色土坡耕地为研究对象，采用 PR2/6 土壤剖面水分测定仪，对土壤剖面水分进行连续原位观测，研究分析雨季土壤水分时间变化、垂直变化和水平变化特征，为金沙江下游季节性干旱区紫色土坡面水资源高效利用及水土流失的治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验所在地位于金沙江下游北岸的凉山彝族自治

治州会东县境内（26°33'42" N，102°27'53" E），受河谷深切和大气环流影响，该区域属季节性干旱区，年平均气温 16.2 ℃，大于 10 ℃ 积温为 5249 ℃，无霜期 268 d，年日照时间 2288.6 h，年均蒸发量为 2002.7 mm，年均降水量为 1111.6 mm，且降雨时空分布极其不均，雨季 6~10 月降雨量占年降雨量 95% 左右，多为暴雨，有雨热同季，干湿分明的特点。根据 1982 年第二次土壤普查，会东县内紫色土面积约为 5.84 万 hm²，占比为 26.34%，是该地区第一大类土壤。耕地类型主要为坡耕地，且以陡坡耕地为主，其中凉山州内 >25° 的陡坡耕地占耕地面积 14% 以上^[18]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选取 根据凉山州内坡耕地的地形条件和土壤类型，参照国标《水土保持综合治理技术规范坡耕地治理技术》（GB/T 16453.1—2008）^[19]，选取 6 个典型紫色土坡耕地监测点，坡度：5°、10°、15°、20°、25° 和 30°，研究区位置和监测点基本情况分别见图 1 和表 1。

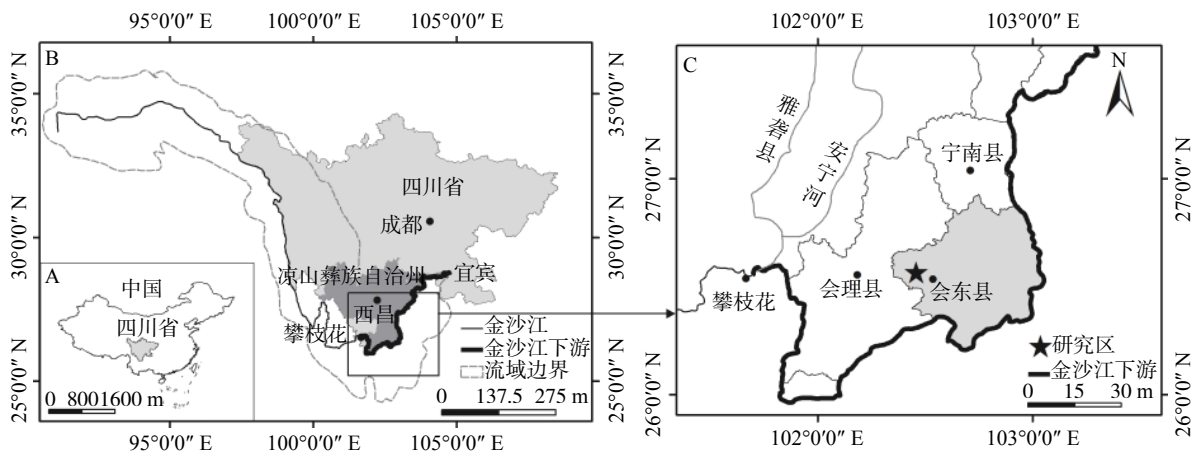


图 1 研究区位置图

Fig.1 The location of study area

表 1 土壤水分监测点基本情况

Table 1 Characteristics of soil moisture sampling sites

监测点 Sites	坡度 (°) Slope	坡位 Slope position	黏粒 (%) Clay				粉粒 (%) Silt				砂粒 (%) Sand			
			0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~100 cm	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~100 cm	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~100 cm
1	5	坡上	15.9	10.3	7.4	15.0	9.7	7.4	9.0	9.6	74.4	82.3	83.6	75.4
2	10	坡中	16.9	15.6	16.2	22.1	15.4	12.8	13.4	19.3	67.7	71.6	70.3	58.6
3	15	坡中	18.5	20.5	18.0	32.6	10.5	10.9	9.7	17.8	71.0	68.6	72.3	49.6
4	20	坡中	23.4	22.2	18.5	13.5	15.3	14.7	15.4	11.5	61.3	63.1	66.1	75.0
5	25	坡中	20.2	16.4	22.2	21.0	13.1	10.3	15.8	11.8	66.8	73.3	61.9	67.2
6	30	坡脚	16.9	18.1	25.4	13.9	10.4	12.7	19.3	11.0	72.7	69.2	55.3	75.2

1.2.2 数据采集 土壤含水量数据:使用英国 Delta-T Devices 公司生产的 PR2/6 土壤剖面水分测定仪,对土体剖面含水量进行连续定点监测。测量深度包括地表以下 10、20、30、40、60、100 cm 六个土层。监测日期为 2019 年 6 月 6 日至 2019 年 9 月 20 日。测定时间为每天下午 19:00,若当日有降雨,雨后补测一次。PR2/6 测定的土壤含水量为体积含水量,用百分数(%)表示,文中平均土壤含水量是指整个观测期某一监测点某土层深度土壤含水量的平均值。

降雨量数据:研究区 2019 年雨季降雨数据由 JBD-2 型翻斗自记雨量计实时监测、记录。数据采集频率为 1 min 次⁻¹,分辨率为 0.1 mm,并用雨量桶进行校验。

1.2.3 数据处理 采用 Excel 2010 和 SPSS 20.0 软件对土体剖面含水量数据进行统计分析,采用 Origin 2017 软件进行图形绘制,采用 Surfer 11.0 软件对土体剖面逐日含水量进行 Kriging(克里格)局部插值。数据经正态分布检验和数据转换后,计算平均值和标准差,用方差分析进行差异显著性检验,用

Duncan 法进行多重比较,显著水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 研究区降雨特征

表 2 为研究区 2019 年雨季 6~9 月降雨情况,共发生降雨 57 次,累计降雨量为 906.7 mm,其中 6、7、8、9 月降雨量分别为 240.6、350.7、133.1、182.8 mm,占雨季总降雨量的 26.5%、38.7%、14.6% 和 20.2%。依据我国气象局分类标准^[20],24 h 降雨量在 10 mm 以下称为小雨,10~24.9 mm 称为中雨,25~49.9 mm 为大雨,超过 50 mm 为暴雨。研究区 2019 年雨季 6~9 月小雨发生 32 次,中雨 15 次,大雨 6 次,暴雨 4 次,对应降雨总量分别为 133.9 mm、250 mm、205.8 mm、317 mm,占雨季总降雨量的 14.8%、27.6%、22.7%、35.0%,研究区 2019 年雨季小雨发生频率高,但雨量较小,大雨和暴雨发生频率低,但雨量比重较大,且超过一半的降雨以大雨和暴雨的形式发生。

表 2 降雨事件特征

Table 2 The characteristics of rainfall events

月份 Month	降雨次数 Rainfall times					降雨量(mm) Rainfall				
	小雨	中雨	大雨	暴雨	所有雨型	小雨	中雨	大雨	暴雨	所有雨型
	Light rain	Moderate rain	Heavy rain	Rainstorm	Rainfall events	Light rain	Moderate rain	Heavy rain	Rainstorm	Rainfall events
6月	8	4	1	1	14	23	65.8	40	111.8	240.6
7月	12	6	4	1	23	56.3	109.7	132.4	51.8	350.7
8月	6	2	0	1	9	33.8	27.1	0	72.2	133.1
9月	6	3	1	1	11	20.8	47.4	33.4	81.2	182.8
6~9月累计	32	15	6	4	57	133.9	250	205.8	317	906.7

2.2 紫色土坡耕地土壤水分时间变化特征

图 2 为不同坡度土壤含水量随着土壤深度和时间变化的等值线图。图中颜色越黑,土壤含水量越高;等值线越密集,表示土壤含水量变化越快^[21]。从图 2 可以看出,6 个坡度的土壤含水量随着时间的变化规律具有相似性,可划分为四个阶段。(1)6 月初至 6 月底为土壤水分恢复期,为无雨旱季,6 月初 0~60 cm 土层土壤含水量基本均低于 7%,随着降雨的发生,土壤含水量逐渐升高,但由于前期含水量较低,0~60 cm 土层土壤含水量仅维持在 3.10%~11.24%;(2)7 月初至 8 月中旬为土壤水分快速补充期,7 月降水充沛,累计降雨量达 350.7 mm,各层土壤含水量均显著升高;(3)8 月中旬至 8 月底为土壤水分消耗期,这个时期气温较

高且降水较少,各土层土壤含水量均快速降低。同时,植物进入生长旺期,蒸腾和蒸发作用较强,10~30 cm 土层含水量降低至萎蔫系数;(4)9 月初至 9 月底为土壤水分回升期,进入 9 月后,气温和日照时长均降低,土壤水分蒸发减弱,同时 9 月降雨量大于 8 月,各土层土壤含水量升高。

不同深度土壤含水量随时间的变化不同,0~10 cm 土壤水分等值线密集,表明 0~10 cm 土壤含水量对降雨的响应速度最快,表现为骤升骤降的脉冲式特点,土壤含水量在 7 月 22 日左右达到最大值,介于 12.60%~31.23%。10~30 cm 土壤含水量波动相对较小,较长时间维持在 5%~13% 左右。30~60 cm 土壤含水量等值线稀疏,表明 30~60 cm 土层土壤含水量变化较慢,表现为缓慢上升的特点,土

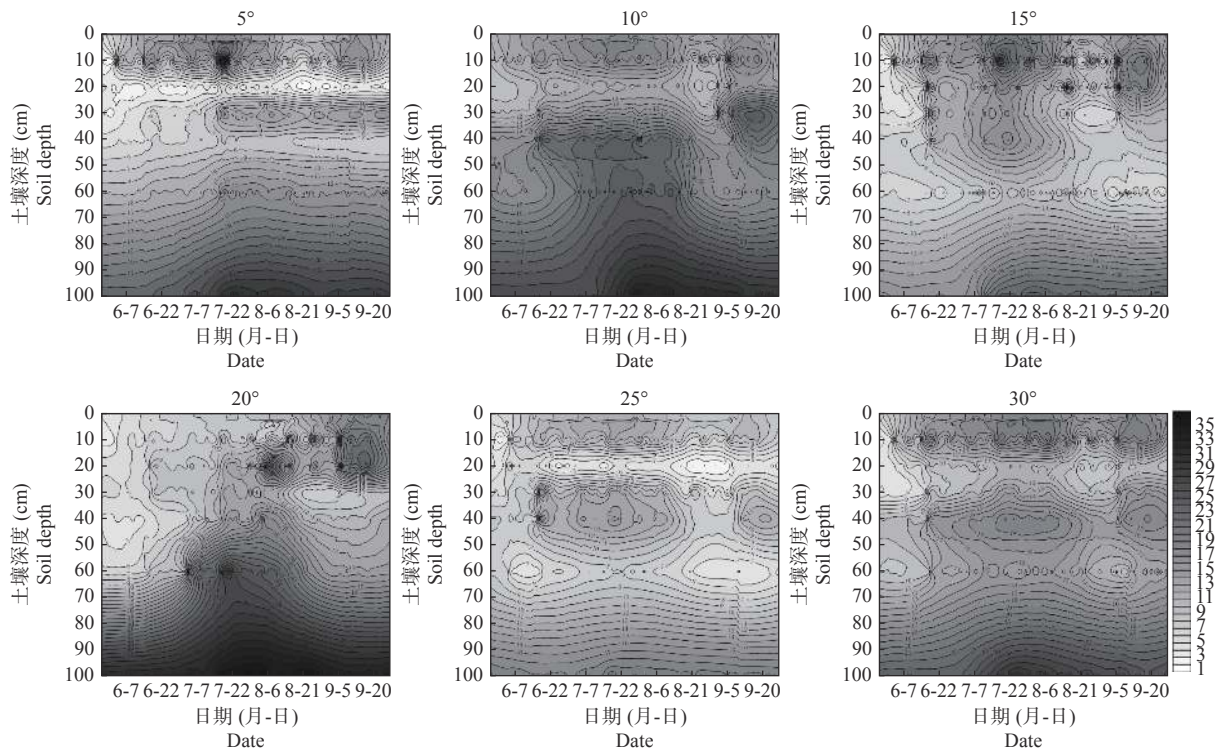


图2 紫色土坡耕地剖面土壤含水量等值线
Fig.2 Contour map of soil moisture content at different slopes

壤含水量介于 10%~21%。60~100 cm 土壤含水量对降雨的响应有滞后现象,土壤含水量在 7 月 20 日左右开始逐渐增加。

2.3 紫色土坡耕地土壤水分垂直变化特征

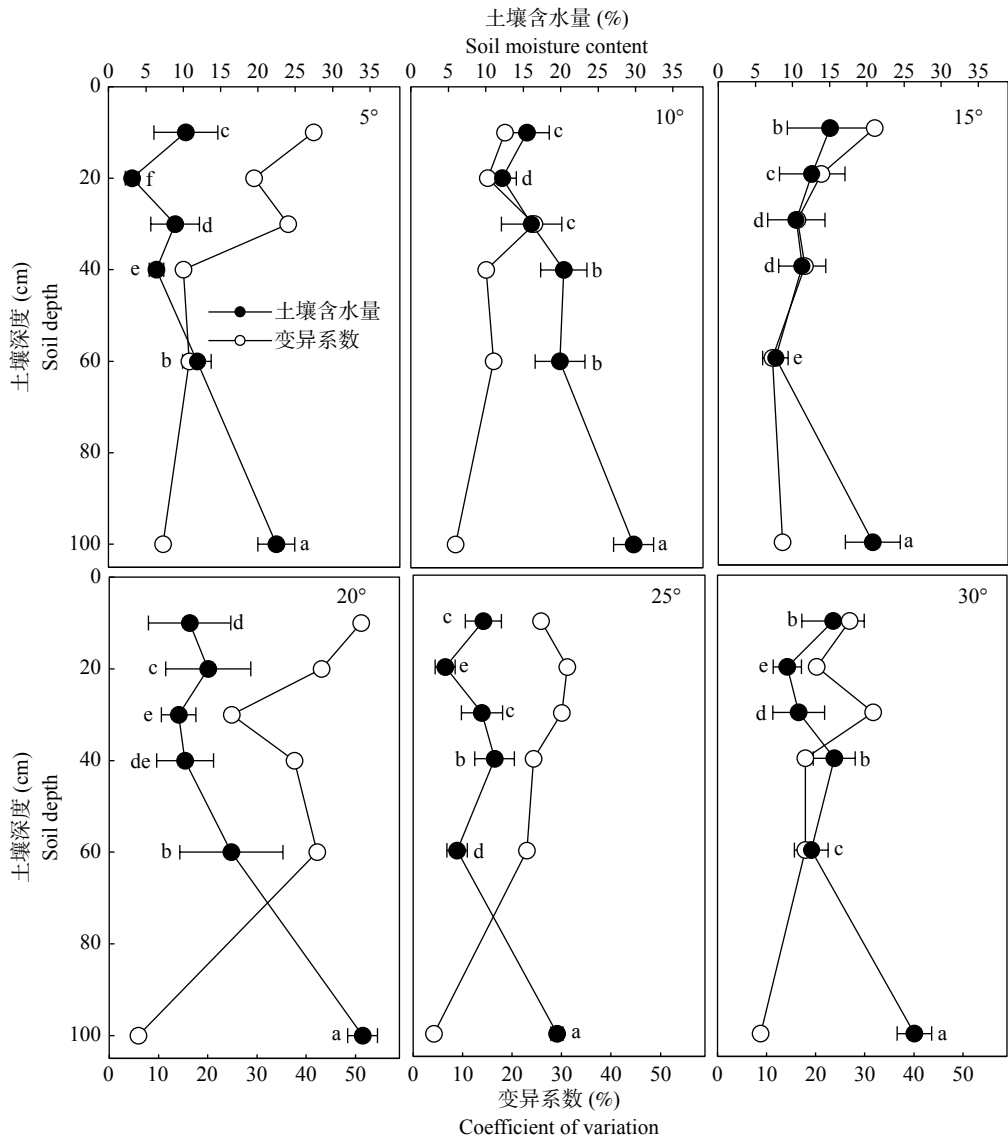
从图 3 可看出,自上而下,6 个监测点观测期平均土壤含水量的垂直变化表现出 2 种变化趋势。一为土壤含水量随土壤深度的增加而增加,包括 5°、10°和 20°坡面监测点,最大含水量均出现在 100 cm 处,分别为 22.21%、29.62%、33.82%,5°、10°坡面最小值出现在 20 cm 处,分别为 3.07%和 11.71%,20°坡面最小值出现在 10 cm 处,为 12.72%。二为土壤含水量随土壤深度增加呈 C 型波动增加,包括 15°、25°和 30°坡面监测点,100 cm 深度处土壤含水量达到最大,分别为 20.59%、19.67%、26.39%,25°和 30°坡面 20 cm 处最小,分别为 4.11%和 9.19%,15°坡面 60 cm 处最小,为 7.72%。6 个监测点不同土层土壤含水量之间均存在显著性差异,6 个监测点 100 cm 处土壤含水量均显著高于其他土层,介于 19.67%~33.82%。

变异系数是表征土壤含水量变化幅度的指标,变异系数越大,土壤含水量变化越剧烈,变异系数越小,土壤含水量越稳定^[7]。由图 3 可知,6 个坡度土壤含水量的时间变异系数均随着土壤深度的增加

而减小,10 cm 土层土壤含水量的变异系数均最大,介于 19.01%~51.17%,100 cm 土层最小,介于 5.88%~11.04%。表明越到下层,土壤含水量的变化越小,这主要与土壤水分的蒸发作用自上而下逐渐减弱有关^[1,22]。5°、10°、20°和 25°坡面 60 cm 深度处变异系数分别为 16.33%、16.67%、42.23%和 31.38%,均高于对应的 40 cm 土层的变异系数,分别为 15.17%、15.15%、37.57%和 24.34%。

2.4 紫色土坡耕地土壤水分水平变化特征

如图 4 所示,同一土层深度下不同坡度土壤含水量之间存在显著差异。对于 10 cm 土层(图 4a),土壤含水量总体表现为随着坡度的增大而减小。土壤最高含水量出现在 10°,为 15.55%,土壤最低含水量出现在 25°,为 9.37%,且显著低于其他坡度。而 30°坡面 10 cm 土层土壤含水量显著高于 25°,这可能与 30°监测点位于坡脚处有关,地表径流在坡脚汇集,因此土壤含水量较大。对于 20、30 和 40 cm 土层,土壤含水量受土壤剖面结构异质性的影响很大,减弱了坡度对土壤含水量的影响。其中 20 cm 土层(图 4b),土壤最低含水量出现在 5°,为 3.14%,且显著低于其他坡度,这与 5°监测点的土体剖面结构有关,5°监测点 20 cm 深度处存在泥岩夹层,透水性较差,因此土壤含水量极低。10°、15°和 20°



注:不同的小写字母表示同一坡度下不同土层平均土壤含水量之间在 0.05 水平上存在显著差异。

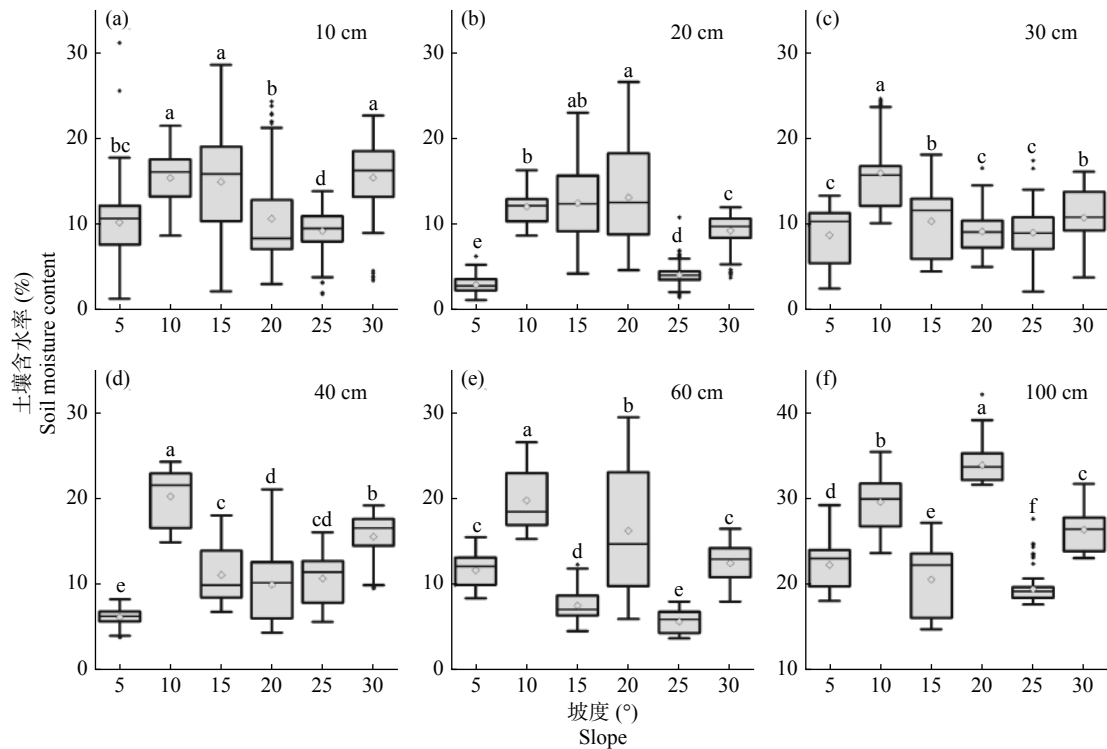
图 3 紫色土耕地土壤剖面含水量及其变异系数
Fig.3 Moisture content and its coefficient of variation in Purple Soil profile

的 20 cm 土层土壤含水量显著高于其他坡度, 介于 12.20% ~ 13.28%。30 cm 和 40 cm 土层 (图 4c、图 4d), 10°坡面土壤含水量最高, 分别为 16.11% 和 20.40%; 5°最低, 分别为 8.90% 和 6.39%, 这是因为 5°坡面 20 cm 深度处的泥岩夹层水分入渗率低, 阻止了上方降雨入渗, 导致泥岩夹层以下土壤含水量均较低。60 cm 土层 (图 4e), 土壤含水量总体上也随着坡度的增大而减小。10°坡面土壤含水量最高, 为 19.90%, 25°坡面土壤含水量最低, 为 5.87%。20°坡面土壤含水量的变异系数较高, 为 42.22%, 这可能是因为 20°坡面 60 cm 深度处易形成壤中流。100 cm 土层 (图 4f), 土壤含水量受坡度的影响较小。20°土壤含水量最高, 为 34.00%, 且显著高于其

他坡度, 可能是因为 20°坡面 60 cm 深度以下的泥岩夹层存在大量裂隙, 形成壤中流后土壤水分沿裂隙快速下渗, 加上 100 cm 深度处土壤水分难以蒸发, 因此土壤含水量接近饱和。

2.5 降雨和土壤深度对紫色土坡耕地土壤水分的影响

6 个监测点 0 ~ 100 cm 土层每日土壤含水量与日降水量数据进行相关性分析, 相关性分析结果见表 3。由表 3 可见, 紫色土坡面 0 ~ 30 cm 的土壤含水量与降水量极显著相关 ($P < 0.01$), 相关性随着土层深度的增加而逐渐减小。30 cm 处土壤含水量与降雨量的相关系数 ($r = 0.127$) 大于 20 cm 处 ($r = 0.108$), 这可能与土壤孔隙结构、植物根系分布、植物生长



注:不同的小写字母表示同一土层下不同坡度之间在 0.05 水平上存在显著差异。

图 4 不同坡度同一深度土层土壤含水量的差异

Fig.4 The difference in moisture content at the same soil layer among different slopes

情况等有关^[11-13]。根据不同深度土壤含水量之间的相关系数可以看出(表 3),所有的土层之间土壤含水量都是极显著相关,表明不同深度的土壤水分在垂直分布上虽然有显著性的差异,但并非完全独立无关联,各层之间存在明显的连续性。相邻两个土层之间的相关系数为最高,随土层间隔的增加,土层

之间相关性系数减小,相关性越差,与杨凯悦等^[23]人在高寒沙区典型人工林的研究结果一致。20 cm 深度处土壤含水量与 40 cm 和 100 cm 处土壤含水量的相关系数较高,分别为 0.52 和 0.55,这可能是因为 20 cm 深度存在介孔、大孔等孔隙结构,产生了优先流^[24-25]。

表 3 不同坡度紫色土耕地不同深度土壤含水量相关系数

Table 3 Correlation coefficient of soil moisture content at different depths of Purple Soil

土壤深度 (cm) Soil depth	相关系数 Correlation coefficient						
	降雨量 Rainfall	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	60 cm	100 cm
10	0.263**	1	0.636**	0.581**	0.576**	0.269**	0.200**
20	0.108**	0.636**	1	0.480**	0.521**	0.440**	0.545**
30	0.127**	0.581**	0.480**	1	0.766**	0.520**	0.329**
40	0.057	0.576**	0.521**	0.766**	1	0.598**	0.363**
60	0.012	0.269**	0.440**	0.520**	0.598**	1	0.738**
100	-0.014	0.200**	0.545**	0.329**	0.363**	0.738**	1

注: *显著性水平为 $P < 0.05$; **显著性水平为 $P < 0.01$ 。

3 讨论

3.1 紫色土坡耕地土壤水分时间变化特征

降雨是坡耕地土壤水分的主要补给来源,降雨分配及其有效性直接影响土壤水分动态^[16]。由于降水的季节变异性,土壤剖面水分也具有典型的季节变

化特征。研究表明,土壤水分除了与降水量有关,还与作物在不同生育期内的耗水特点、土壤蒸发等因素有关^[17],本研究中,6个土壤剖面水分动态变化具有明显的季节性变化特征,土壤水分表现为6月最低,7月最高,8月略有降低,9月回升,与降水

分配规律密切相关,这一结果与冯伟等^[26]人在毛乌素沙地的研究结果相同。除此之外,本研究还发现不同深度土壤含水量随时间的动态变化规律不同,0~10 cm 土壤水分受降雨的影响较大,表现为骤升骤降的脉冲式特点,这是因为降雨时雨水首先渗入表层,使表层土壤水分急剧增加,雨后由于作物耗水和土壤蒸发,土壤水分快速减小,因此表层土壤水分受降雨的影响较大^[16,27]。10~30 cm 土壤含水量波动相对较小,造成此现象的原因可能是10~30 cm 土层为植被根系的主要分布范围,根系对土壤水分的消耗比较大,降雨对土壤水分的补充不明显^[28],这与艾宁等^[29]人在半干旱黄土丘陵区的研究结论一致。30 cm 以下土层土壤含水量变化较慢,且对降雨的响应有滞后现象,这与 He 等^[30]人在西北祁连山区的研究结论一致,这可能是由于土壤水分输送的距离较长,从而导致土壤水分变化具有明显的滞后现象^[15],因此深层土壤水分变化较慢。

3.2 紫色土坡耕地土壤水分变化特征

土壤水分在垂直方向上的变化主要受土壤性质、气候条件、根系分布、地形地貌^[6]等因素控制,因此不同学者的研究结果不一致。马婧怡等^[15]人对黄土丘陵区土壤水分特征的研究表明随着土层深度的增加,土壤含水量呈先增加后减小的趋势,具有明显的垂直变异特征,而本研究结果表明土壤含水量总体上随着土壤深度的增加呈现显著升高的趋势,且100 cm 深度处土壤含水量最大。张川等^[31]人对喀斯特地区洼地剖面土壤含水量特征的研究结果表明,土壤水分含量在垂直剖面方向表现出随深度增加,土壤水分含量呈增加趋势;刘希林等^[22]人对崩岗土体剖面水分分布特征的研究结果表明,最大含水量一般出现在土体剖面的最下层,即地表以下100 cm,均与本文研究结果一致,主要原因是水分不断下渗,同时深层土壤水分受外界影响较小,较难蒸发,因此深层土壤含水量较高。同时6个坡面土壤水分的变异系数均随着土层深度的增加而不断减小,这与陈洪松等^[32]和苏莹等^[33]的研究结果相似,主要是因为表层土壤水分受光照辐射、降雨量变化以及土壤蒸散发等外界环境因素的影响较大。本研究中,60 cm 深度处变异系数较高,且高于40 cm 深度处,这与陈国富等^[27]和郭小娇^[34]等人的研究结果一致,本文可能与紫色土特殊的水文过程有关,5°、10°、20°和25°坡面在60 cm 深度处可能形成了壤中流,

因此土壤含水量的变异系数较高^[25]。

坡度对土壤水分有重要影响,主要通过影响坡面的承雨面积、径流量以及侵蚀量等方面来影响降雨时坡面水分入渗。其次不同坡度还会产生不同的太阳光照角度,影响坡面接受辐射量的多少,从而影响雨后坡面水分的蒸发^[35]。水平方向上,不同坡度同一土层土壤含水量之间存在显著差异。土壤含水量随着坡度的增加总体上呈减小趋势。对于0~60 cm 土层,10°土壤含水量都高于其他坡度,介于12.20%~20.40%。对于0~100 cm 土层,25°土壤含水量较低,介于4.28%~19.22%之间。这与李增尧等^[36]人的研究结果一致,主要是因为坡度可调节降雨形成地表径流和土壤水的比例,10°坡度较缓,不易产生地表径流,降雨就地入渗,因此土壤含水量较高。25°坡度较陡,降雨大部分以地表径流的方式流失,土壤水分入渗量少,因此土壤含水量较低。对于20 cm 土层,10°、15°和20°土壤含水量介于12.20%~13.28%,且三个坡度之间土壤含水量无显著差异,可能是因为植物根系主要从该层吸收土壤水分和土壤剖面结构的异质性,减弱了坡度对土壤含水量的影响,这与姚雪玲等^[37]人的研究结果一致,当土壤含水量较高时,水分分布主要由坡度和坡位决定,而含水量较低时,土壤水分主要受植被根系分布的影响,植物根系吸水会减弱坡度对土壤水分的影响。

4 结论

(1) 土壤含水量随着时间的变化特征总体可划分为四个阶段:土壤水分恢复期、土壤水分快速补充期、土壤水分消耗期和土壤水分回升期。不同深度的土壤含水量时间变化规律存在差异:0~10 cm 土壤含水量表现为骤升骤降的脉冲式特点;10~30 cm 土壤含水量波动相对较小,较长时间维持在5%~13%左右;30~60 cm 土壤含水量表现为缓慢上升的特点;60~100 cm 土层土壤含水量对降雨的响应滞后。

(2) 土体剖面含水量自上而下呈现逐渐增加的趋势,且各层深度都具有显著的差异性和相关性,相关性随着距离的增大而减小。土壤含水量变异系数自上而下逐渐降低,土壤含水量越到下层变化越小。

(3) 同一土层深度下不同坡度土壤含水量之间存在显著差异。对于10 cm 土层,土壤含水量总体

表现为随着坡度的增大而减小。对于 20、30 和 40 cm 土层, 土壤含水量受土壤剖面结构和植被的影响很大, 减弱了坡度对土壤含水量的影响。60 cm 土层, 土壤含水量总体上随着坡度的增大而减小。100 cm 土层, 土壤含水量受坡度的影响较小。

参考文献:

- [1] 邱野, 王瑄. 耕作模式对坡耕地土壤水分和大豆产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(22): 128 – 137.
- [2] 王帅兵, 王克勤, 宋娅丽, 等. 不同时间尺度反坡台阶红壤坡耕地土壤水分动态变化规律[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(8): 195 – 205.
- [3] Tayfur G, Zucco G, Brocca L, et al. Coupling soil moisture and precipitation observations for predicting hourly runoff at small catchment scale[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 510: 363 – 371.
- [4] Yang L, Chen L, Wei W, et al. Comparison of deep soil moisture in two re-vegetation watersheds in semi-arid regions[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 513: 314 – 321.
- [5] 柴宗新, 范建容. 金沙江下游侵蚀强烈原因探讨[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(5): 14 – 17.
- [6] 何其华, 何永华, 包维楷. 干旱半干旱区山地土壤水分动态变化[J]. *山地学报*, 2003, 21(2): 149 – 156.
- [7] Bonacci O, Pipan T, Culver C D. A framework for karst ecohydrology[J]. *Environmental Geology*, 2009, 56(5): 891 – 900.
- [8] 王小燕, 李朝霞, 蔡崇法. 砾石覆盖紫色土坡耕地水文过程[J]. *水科学进展*, 2012, 23(1): 38 – 45.
- [9] 李雪银, 李朝霞, 王天巍, 等. 紫色土中砾石夹层对土壤水分入渗的影响[J]. *水科学进展*, 2016, 27(5): 662 – 669.
- [10] 李馨欣, 王小燕, 蔡崇法, 等. 紫色土水分和壤中流对降雨强度的响应[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5): 25 – 31.
- [11] 刘刚才. 紫色土坡耕地的降雨产流机制及产流后土壤水分的变化特征[D]. 成都: 四川大学, 2002.
- [12] 李军健, 吕刚, 黄建国. 紫色土旱坡地土壤水分时空分布特征[J]. *西南农业大学学报(自然科学版)*, 2006, 28(1): 161 – 164.
- [13] 程训强, 唐家良, 高美荣, 等. TDR系统在紫色土坡耕地径流小区土壤水分自动监测中的应用[J]. *中国水土保持*, 2010, (10): 27 – 29.
- [14] 吴汉, 熊东红, 张宝军, 等. 金沙江干热河谷冲沟发育区不同部位土壤水分的时空变化特征[J]. *西南农业学报*, 2018, 31(2): 384 – 392.
- [15] 马婧怡, 贾宁凤, 程曼. 黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分变化特征[J]. *生态学报*, 2017, 38(10): 3471 – 3481.
- [16] 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*, 2013, 35(15): 5168 – 5174.
- [17] 徐志尧, 张钦弟, 杨磊. 半干旱黄土丘陵区土壤水分生长季动态分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(3): 145 – 151.
- [18] 刘德春, 张锡洲. 凉山州耕地资源的利用特征与生态保护[J]. *四川农业大学学报*, 2004, 22(1): 49 – 52.
- [19] 王向东, 高旭彪, 李贵宝. 水土保持标准剖析与标准体系完善建议[J]. *水利水电技术*, 2009, 40(4): 54 – 56.
- [20] 王延平, 韩明玉, 张林森, 等. 洛川苹果园土壤水分变化特征[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(3): 731 – 738.
- [21] 杨开宝. 黄土丘陵区不同农业技术措施的土壤水分效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [22] 刘希林, 张大林. 崩岗土体剖面水分分布特征及变化规律——以广东五华县莲塘崩岗为例[J]. *热带地理*, 2015, 35(3): 291 – 297.
- [23] 杨凯悦, 贾志清, 张立恒, 等. 高寒沙区典型人工林土壤水分空间分布特征研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(5): 87 – 94.
- [24] 王伟. 三峡库区紫色砂岩林地土壤优先流特征及其形成机理[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [25] 王红兰, 蒋舜媛, 崔俊芳, 等. 紫色土坡耕地土壤大孔隙流的定量评价[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(22): 167 – 174.
- [26] 冯伟, 杨文斌, 党宏忠, 等. 毛乌素沙地流动沙丘土壤水分对降雨的响应[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(2): 400 – 406.
- [27] 陈国富, 姜光辉, 周文亮, 等. 岩溶石山区坡地土壤剖面水分与蒸发特征[J]. *中国岩溶*, 2013, 32(1): 73 – 78.
- [28] 赵忠, 李鹏. 渭北黄土高原主要造林树种根系分布特征及抗旱性研究[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(1): 96 – 99+107.
- [29] 艾宁, 强方方, 朱清科, 等. 半干旱黄土丘陵区雨季土壤水分动态分析[J]. *土壤通报*, 2017, 48(2): 326 – 334.
- [30] He Z, Zhao W, Liu H, et al. The response of soil moisture to rainfall event size in subalpine grassland and meadows in a semi-arid mountain range: A case study in northwestern China's Qilian Mountains[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 420: 183 – 190.
- [31] 张川, 陈洪松, 聂云鹏, 等. 喀斯特地区洼地剖面土壤含水率的动态变化规律[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(10): 1225 – 1232.
- [32] 陈洪松, 邵明安, 王克林. 黄土区荒草地和裸地土壤水分的循环特征[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(10): 1853 – 1857.
- [33] 苏莹, 陈林, 李月飞, 等. 荒漠草原不同类型土壤水分时空变化特征[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(6): 1308 – 1316.
- [34] 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): 629 – 638.
- [35] Qiu Y, Fu B, Wang J, et al. Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2001, 49(4): 723 – 750.
- [36] 李增尧, 赵兴凯, 朱清科. 陕北黄土区陡坡坡面因子对土壤水分的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2017, 35(9): 798 – 805.
- [37] 姚雪玲, 傅伯杰, 吕一河. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子[J]. *生态学报*, 2012, 32(16): 4961 – 4968.

Moisture Characteristics of Purple Soil in a Seasonal Arid Area in the Lower Reaches of the Jinsha River

XU Lu^{1,2}, ZHANG Dan^{1*}, XIANG Yu-guo^{1,2}, CHEN Fan³, CHEN Yu-lan³, HUANG Tian-fang⁴

(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3. *Tobacco Company of Liangshan, Xichang 615000, China*; 4. *Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China*)

Abstract: Soil water is the limiting factor for agricultural production in seasonal arid area, so the study of moisture characteristics of Purple Soil can help solve the eco-hydrological drought problem of cultivated slope land. Taking the Purple Soil of cultivated slope land in a seasonal arid area as the research object, the PR2/6 soil profile moisture analyzer was used to monitor soil moisture contents within 0-100 cm depths at 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30° slopes in a rainy season. The characteristics of soil moisture were investigated. The change of soil moisture content with time was divided into four stages: soil moisture recovery period (from the beginning of June to the end of June), soil moisture rapid replenishment period (from the beginning of July to the middle of August), soil moisture consumption period (from the middle of August to the end of August) and soil moisture raise period (from the beginning of September to the end of September). Soil moisture content was increased with the increase of soil depths. The soil moisture content had a significant difference and correlation among different depths. The soil moisture content in six sites all appeared the maximum at 100 cm depth with the range of 19.67%-33.82%, while the minimum mostly occurred at 20 cm depth, ranging from 3.07% to 11.71%. The coefficient of variation (C.V.) of soil moisture content decreased with the increase of soil depths. The C.V. was the largest at 10 cm depth, ranging from 8.67% to 56.28%, but was the lowest at 100 cm depth, ranging from 0.68% to 14.76%. The soil moisture content generally decreases with the increase of slope. The soil moisture contents within 0-60 cm depths were higher at the 10° slope than those at the other slopes, ranging from 12.20% to 20.40%; the soil moisture contents within 0-100 cm depth were relatively low at 25° slope, ranging from 4.28% to 19.22%. Both rainfall and slope have significant influence on soil moisture content. With the increase of soil depth, the influence of both rainfall and slope on soil moisture content decreased. These results were of great significance for the efficient use of water resources and the improvement of agricultural productivity of cultivated slope land in seasonal arid areas.

Key words: Rainfall; Soil moisture content; Purple Soil; Seasonal arid area

[责任编辑: 韩春兰]