

高阿娟, 刘子琦, 李渊, 等. 喀斯特峡谷区不同经济林地土壤水分变化特征: 以贵州花江示范区为例[J]. 中国岩溶, 2020, 39(6): 863-872.

DOI: 10.11932/karst20200607

喀斯特峡谷区不同经济林地土壤水分变化特征 ——以贵州花江示范区为例

高阿娟^{1,2}, 刘子琦^{1,2}, 李渊^{1,2}, 李开萍^{1,2}

(1. 贵州师范大学喀斯特研究院, 贵阳 550001;

2. 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001)

摘要:选择喀斯特高原峡谷关岭—贞丰花江示范区为研究对象,在2018年5—9月采用土壤水分传感器对0~40 cm土层的土壤含水率进行监测,以分析花椒地、金银花地、火龙果地3种不同经济林地土壤储水量的季节变化特征及土壤含水量的剖面变化特征。结果表明:(1)3种经济林地土壤储水量随着降雨的季节变化明显,与降水随时间的变化趋势一致,但在时间上滞后于降水量。在观测期内不同经济林地0~40 cm土层土壤储水量表现为火龙果地(478.97 mm) > 金银花地(372.64 mm) > 花椒地(322.15 mm);(2)随着土层的加深,含水率总体呈增加趋势,观测期火龙果地、金银花地、花椒地的土壤含水率分别为35.97%、27.36%、23.55%,整体变异系数分别为9.64%、19.53%、24.27%,火龙果地为弱变异,花椒地和金银花地为中等变异。火龙果地的持水效果最好,金银花地和花椒地次之,因此在贵州省花江喀斯特高原峡谷区的石漠化治理过程中可适量种植火龙果以达到生态恢复效果,并推动当地产业发展。

关键词:喀斯特峡谷区;经济林地;土壤储水量;土壤含水率;变异系数

中图分类号:S152.7 文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2020)06-0863-10 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

土壤水分是土壤、植被与大气之间相互联系的关键因子,是土壤系统中养分循环和能量循环的重要载体,直接影响土壤特性和植被生长分布,且间接影响区域内植被分布及生态系统小气候的变化^[1-3],因此研究土壤水分的变化具有重要现实意义。喀斯特地貌广泛存在于中国西南部地区,以贵州、云南、

广西为代表,该地区植被覆盖度低,基岩裸露,自然降水充足,地表地下的二元水文空间结构导致土壤保水能力差、土壤呈现贫瘠状态,以及可溶性岩石的渗透能力强等原因,使得水分亏缺成为该地区环境的主要问题^[4]。因而研究喀斯特地区土壤水分变化特征对于该区土地的合理利用与植被的生态恢复具有十分重要的意义^[5-6]。

国外学者 Darcy^[7]等自19世纪50年代对土壤水

基金项目:贵州省研究生教育创新计划项目“贵州省熊康宁喀斯特环境研究生导师工作室”(黔教研合GZS字[2016]04号);国家自然科学基金项目“石漠化地区二元水文结构水土—养分流失机制研究”(41761104);国家十三五重点研发计划课题“喀斯特高原石漠化综合治理与山地旅游产业技术与示范”(2016YFC0502606)

第一作者简介:高阿娟(1996—),女,硕士研究生,研究方向:喀斯特生态建设与区域经济。E-mail: 614821457@qq.com。

通信作者:刘子琦(1979—),女,副教授,从事喀斯特地貌演化、石漠化治理与监测评价研究。E-mail: 124294329@qq.com。

收稿日期:2020-03-04

分开展研究,是土壤水分研究的开端。国内对土壤水分的研究起步相对较晚,近年来,刘士余等^[8]采用小区试验的方法得出随季节变化不同地表作物对土壤水分的增减效应不同;缪凌等^[9]分析黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用类型对土壤深层水分环境的影响,得出不同土地利用类型剖面土壤水分均表现出上层变化较大、下层变化较小的特征;郑洪兵等^[10]通过连续监测不同耕作方式下土壤含水量,计算土壤贮水量、耗水量和作物水分利用效率等,得出土壤含水量随着土层深度的增加呈现递减且随季节波动较大;艾宁等^[11]分析陕北黄土区吴起县合沟流域不同深度浅沟土壤水分的空间分布特征,指出研究区浅沟土壤水分高于原状坡且变异系数较大;杜好田等^[12]在黄土丘陵区退耕草地连续定位观测自然恢复小区不同降雨梯度下7个月土壤水分的动态变化,以研究土壤水分变化特征及其对降水变化的响应,得出0~30 cm土层土壤含水量对降水的响应最为明显,随着土层深度的增加响应逐渐减弱。以上研究区域主要集中在非喀斯特地区,针对喀斯特地区的土壤水分研究也有一定成果。陈洪松等^[13]在分析西南喀斯特山区土壤水分生态环境特征和土壤水分研究现状的基础上,阐述了适宜西南喀斯特山区土壤水分的测定方法、入渗规律、空间变异性等;李安定等^[14]对喀斯特典型地区石沟、石槽、土面3种不同小生境的土壤物理性质和土壤水分动态变化规律进行了研究,得出石沟的水分状况相对优于土面和石槽;何贝贝等^[15]通过对石漠化迹地和次生林样地0~10 m深度土层的土壤含水率进行连续一年的测定,得出石漠化样地各土层含水量均显著高于次生林样地且差异较大;李春茂等^[16]对0~5 cm表层土壤的含水量进行定点测量,认为裸岩周围空间和梯田石坎周围空间的土壤含水量均随着与裸岩和梯田石坎的距离增大而减小,并且旱、雨季表层土壤含水量的空间相关性较强;颜蒙蒙等^[17]以贵阳市花溪区作为研究对象,以观测站的数据为基础,分析土壤水分的动态变化及土壤水分垂直变化特征;赵志猛等^[18]对现有研究成果进行总结,系统阐述喀斯特地区土壤水分监测技术、土壤水分的时空变异性、土壤水分特征,分析土壤水分的主要影响因素,提出应以岩石—土壤—植被系统为对象,深入研究三者之间的耦合关系。目前在喀斯特地区对于土壤水分的研究多是从整体区域、不同小生境等分析土壤含水量的时空变异特征及其规律,对于

喀斯特地区典型作物、不同经济林地的土壤水分变化特征的研究较少,该地区不同经济林地与土壤水分的相关关系尚不明确。

基于以上认识,本文在贵州喀斯特高原峡谷关岭—贞丰花江石漠化综合治理示范区,选取金银花地、花椒地和火龙果地3种经济林地为样地,以3种经济林地土壤水分长期定位监测以及降雨监测数据为基础,分析土壤水分动态变化特征,揭示不同经济林地对土壤剖面水分特征的影响及其动态变化过程,得出持水效果最优的作物物种,以期为喀斯特石漠化地区植被恢复及生态环境可持续发展提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于贵州省西南部,安顺市关岭县与黔西南自治州贞丰县交界处的北盘江峡谷花江段(简称“关岭—贞丰花江示范区”),喀斯特面积为45.39 km²,占总面积的87.92%,海拔在500~1 200 m,相对高差为700 m,地表裸露破碎,地势起伏大,是贵州典型的喀斯特高原峡谷区。区内主要为半亚热带季风湿润气候,冬春温暖干旱,夏秋湿热,光热资源丰富,年降水量为1 100 mm,时空分布不均,多暴雨,5~9月降水量占全年总降水量的83%。该示范区内土地被大量开垦,以林地和耕地为主。

由于人类活动破坏,研究区内森林覆盖率很低,基岩裸露,石漠化十分严重,土壤侵蚀强烈,制约着当地居民生存条件和经济发展。火龙果、花椒、金银花是该地区种植的典型经济作物。20世纪90年代,贞丰县推广顶坛花椒的种植以及引入金银花,形成了当地独具特色的石漠化治理模式^[19],为该地区居民带来了可观的经济收入,促进当地产业发展^[20-21]。

2 研究方法

2.1 土壤体积含水量的测定

在每块样地等距布设3个观测点,共9个观测点(表1);使用土壤水分传感器(EM50, Meter公司,美国)对土壤体积含水率进行连续定位监测;探头水平埋藏在距植被根系50 cm处,探头埋藏过程中,用挖出的湿润泥土将探头均匀包裹薄薄一层,以减少探头埋藏后与土壤之间的空隙,避免无效监测,探头位置分别位于土层的10 cm、25 cm、40 cm处。2018年

表 1 不同经济林地样地概况
Table 1 Information on different economic forest land plots

样地	土壤类型	经纬度	坡度/°	坡向	海拔/m	土壤容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	土壤总孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	土壤有机碳/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%
花椒地	石灰土	N25°39.797' E105°38.823'	25	NW	820	1.62	42.73	18.10	22.08	32.63	46.73	20.64
金银花地	石灰土	N25°39.329' E105°38.669'	26	NW	772	1.36	48.94	18.85	23.34	30.45	45.95	23.60
火龙果地	石灰土	N25°39.437' E105°38.583'	28	NW	658	1.30	52.46	20.57	25.27	28.36	46.85	24.79

5-9月历时5个月,9个观测点位每天24小时监测金银花地、火龙果地和花椒地3种不同经济林地土壤体积分含水率,以10分钟为间隔,记录土壤含水率变化。

2.2 降雨量的测定

降雨量数据由小气象观测站(ATMOS, Meter公司,美国)监测得出。

2.3 数据处理

基于降雨和土壤水分的连续动态监测,通过对土壤含水量的定量分析,探讨不同土地利用方式对土壤水分剖面变化特征和动态变化过程的影响。

2.3.1 土壤储水量

土壤储水量指一定土层深度的体积水分含量。计算公式^[22]如下:

$$W_i = h_i \times \theta_i$$

式中: W_i 为一定土层厚度的土壤储水量,mm; h_i 为对应的土层厚度,cm; θ_i 为土壤水分探头测得的各层土壤含水量,%。

2.3.2 变异系数

$$CV = SD/MN \times 100\%$$

式中: SD 为标准差; MN 为土壤含水量月均值; $CV > 100\%$ 时,属于强变异, CV 介于10%~100%时,为中等变异, $CV < 10\%$ 时,为弱变异。

使用Excel 2017对监测得到的土壤水分数据进行初步处理,使用SPSS 20.0对数据进行统计分析,利用单因素方差法进行显著性检验,使用Origin 8.5作图。

3 结果与分析

3.1 降雨特征

降雨是影响土壤水分变化的主要补给来源,土壤储水量的变化是降雨量、土壤蒸发量、植物蒸腾量共同作用的结果,其中主要受降雨量的影响。由气象站降雨数据统计,5-9月为研究区降雨量最多的月份,也是植被生长需水量较大的时期,期间累积降雨量为1 033.2 mm,各月降雨量分别为61.0 mm、376.2 mm、99.0 mm、350.2 mm、146.8 mm,分别占雨季降雨量的5.9%、36.4%、9.6%、33.9%、14.2%。

3.2 不同经济林地土壤储水量的时间变化特征

土壤水作为重要的水资源,尤其是在喀斯特地区,土壤储水量的大小在一定程度上决定着喀斯特地区植被的恢复与重建。观测期内降雨量和金银花地、火龙果地、花椒地土壤储水量的分布如图1、图2、图3所示,总体来看3种经济林地土壤储水量随着降雨的季节变化呈明显变化,并且在8月达到最大值。5-9月不同经济林地0~40 cm土层土壤储水量表现为:火龙果地(478.97 mm) > 金银花地(372.64 mm) > 花椒地(322.15 mm)。

观测期内火龙果地的土壤储水量最高,变化较为稳定,最高值出现在8月,最低值出现在5月,7月由于降雨量减少储水量较6月有所减少,9月份有所减少但总体呈增加趋势;金银花地的土壤储水量最高值出现在6月,最低值出现在9月,5月到6月储水量呈增长趋势,8月由于降雨量增加储水量有小幅上升,9月储水量下降;花椒地的土壤储水量在3种经济林地中最低,其最高值出现在6月,最低值出现在7

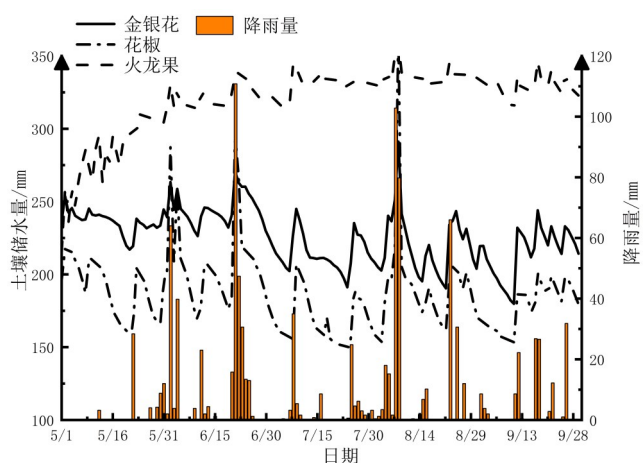


图1 0~10 cm³种经济林地土壤水分变化

Fig.1 Soil moisture variations of soil layer at 0-10 cm under three land use patterns

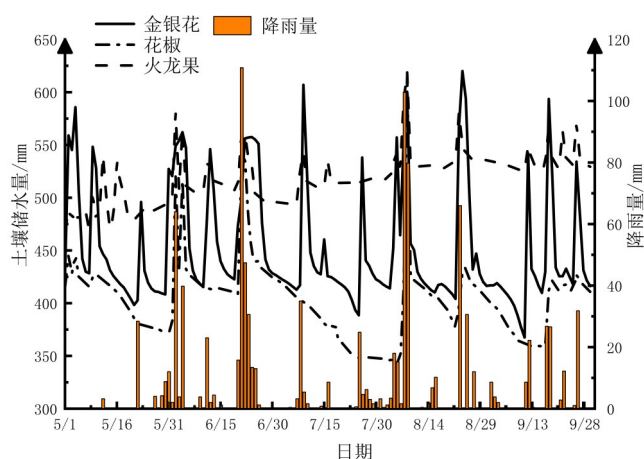


图3 25~40 cm³种经济林地土壤水分变化

Fig.3 Soil moisture variations of soil layer at 25-40 cm under three land use patterns

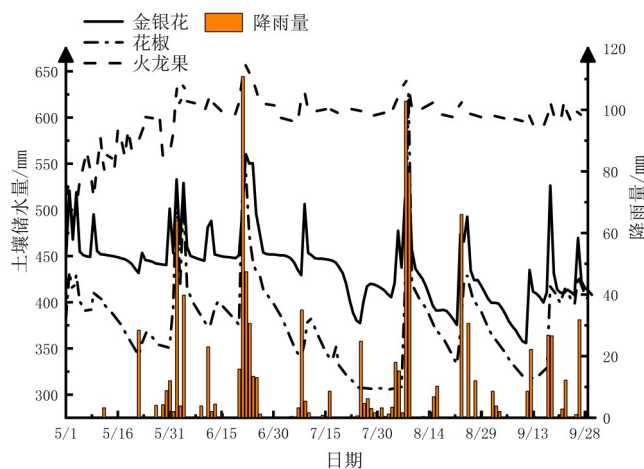


图2 10~25 cm³种经济林地土壤水分变化

Fig.2 Soil moisture variations of soil layer at 10-25 cm under three land use patterns

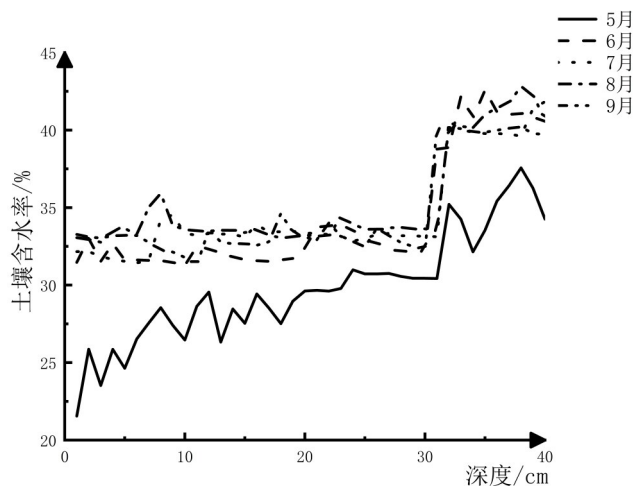


图4 火龙果地土壤含水率变化特征

Fig.4 Variation characteristics of soil moisture content in *Hylocereus undulatus* Britt field

月,从5月到6月储水量呈上升趋势,7月储水量降低至谷底,7月到8月储水量呈增加趋势,9月份有所下降。总体来看,3种土地利用方式在0~40 cm土层中总的土壤储水量表现出明显的季节变化特征,分别在6月、8月两次达到小高峰。

3.3 不同经济林地土壤含水率的垂直特征

图4、图5、图6为3种不同经济林地5~9月份土壤含水率垂直剖面分布特征,总体来看不同经济林地剖面的土壤含水率具有共同特征,即随着深度的加深含水率呈增加的趋势,且在10~25cm土层含水率随深度变化较小,0~10cm和25~40 cm土层含水率变化较大。火龙果地、金银花地、花椒地的土壤含水

率分别为35.97%、27.36%、23.55%,火龙果地的土壤水分含水率高于其他植被类型,花椒地土壤含水率最小。

观测期内火龙果地土壤含水率介于29.61%~43.81%,各月土壤含水率均高于其他两种利用方式,且各月土壤含水率的垂直变化特征较一致。金银花地土壤含水率介于17.98%~41.33%之间,各月份土壤含水率变化趋势基本一致;5月份0~10 cm处水分变化较为明显,在10~25 cm含水率变动幅度小,总体含水率呈增加趋势;5月份该地区进入雨季,降雨过后长期处于干旱状态的表层土壤得到降雨补给,表层土能够迅速吸收降雨,且受蒸发等影

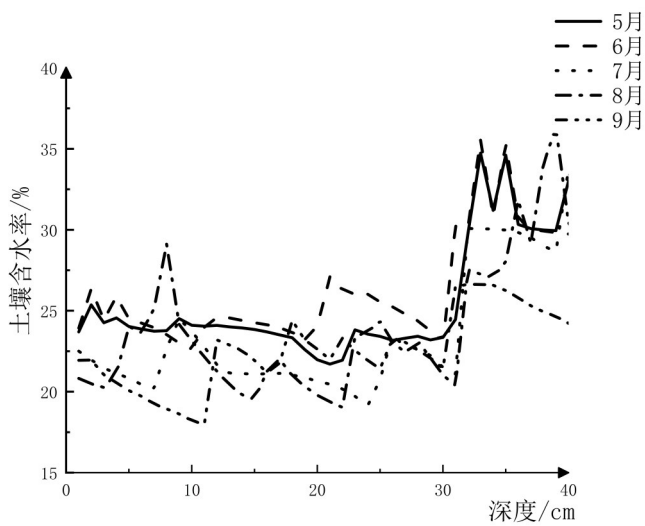


图5 金银花地土壤含水率变化特征

Fig.5 Variation characteristics of soil moisture content in *Lonicera japonica* Thunb field

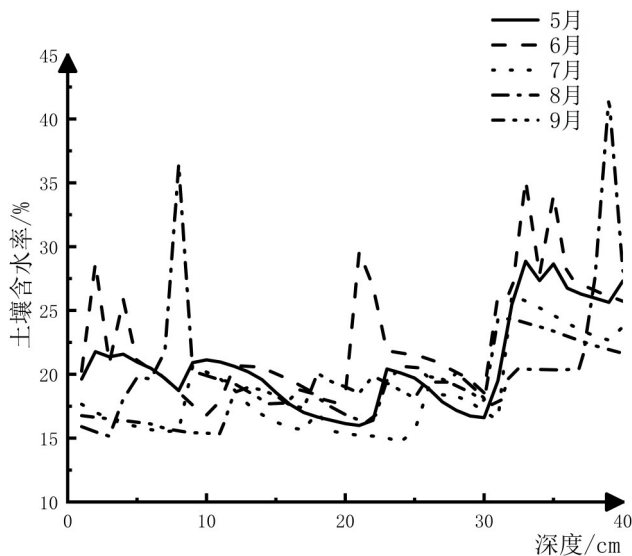


图6 花椒地土壤含水率变化特征

Fig.6 Variation characteristics of soil moisture content in *Zanthoxylum bungeanum* field

响,表层0~10 cm土壤含水率变化较大,10~25 cm各月份变化基本都呈增加趋势且变化幅度不大,在25~40 cm土壤含水率达到最大值。花椒地土壤含水率介于14.73%~41.78%,8月份含水率明显高于其他各月,这与降雨量的变化有直接关系,各月整体变化一致。

火龙果地、金银花地、花椒地土壤含水率整体变异系数分别为9.64%、19.53%、24.27%,火龙果地为弱变异,花椒地和金银花地为中等变异,表明火龙果

地土壤水分在雨季变化较为稳定,受降雨和蒸腾作用影响小。花椒地随着深度的增加变异系数逐渐变小,呈现出稳定状态,而金银花地随着深度增加变异系数增加。土壤水分垂直变化层次划分主要采用变异系数(C_v)^[22],即:速变层($C_v > 30%$)、活跃层($C_v = 20% \sim 30%$)、次活跃层($C_v = 10% \sim 20%$)和相对稳定层($C_v < 10%$),通过计算标准差和变异系数,得出3种经济林地的土壤水分含量只有相对稳定层和次活跃层。

4 讨论

4.1 不同经济林地土壤水分的时间变化

降雨量变化直接影响土壤储水量的变化。3种经济林地的土壤储水量表现出明显的季节性变化,表明该地区土壤水分的调节弱,受季节性降雨影响较大呈现明显的变化,但也与植被生长规律、在不同生长期内的耗水特点以及土壤蒸发等因素有关^[23]。

本研究中3种经济林地土壤储水量均具有明显的季节变化特征,与降雨事件发生的时间变化趋势一致,但在时间上具有滞后性,与以往研究基本一致^[24]。这主要是由于土壤水分的入渗、植物的生长蒸发所致,且土壤水分输送有一定距离,从而导致土壤水分的输送具有滞后效应。

对比3种经济林地的土壤储水量,其季节变化规律基本一致,火龙果地的各层土壤储水量均大于金银花地和花椒地,这与植被类型有关,火龙果属于仙人掌科,其根系对水分有一定的蓄存能力^[21],而花椒地各月份土壤储水量低于其他两种植被类型,这种现象是由于花椒在生长过程中需水量大,吸收土壤中水分较多,因此花椒地土壤含水量较低。

从5月植被逐渐开始进入生长季,植物需水量日渐增加,而气温逐渐升高使得土壤蒸发旺盛,加之降雨未达到最高,不能及时补充土壤蒸发等因素造成的土壤水分消耗;在7月因降雨量明显低于往年,3种经济林地土壤储水量有降低趋势,进一步佐证了土壤储水量与降雨变化趋势一致。从8月植被进入生长旺季,研究区处于喀斯特高原峡谷区,夏季雨热同期,植物蒸腾蒸发作用强烈,但8月降水量最大,降水补给大于蒸发强度,使得土壤储水量增

表2 5月不同土地利用方式土壤含水率差异

Table 2 Differences of soil moisture content under different land use patterns in May

植被类型	花椒地				金银花地				火龙果地			
	最大值	最小值	均值	变异系数	最大值	最小值	均值	变异系数	最大值	最小值	均值	变异系数
0~10 cm	21.77±0.84b	16.00±0.43b	19.00±0.50b	9.69	25.36±0.45c	21.70±1.02b	23.62±0.78b	3.23	30.99±1.34c	21.55±0.97b	28.28±0.37c	8.08
10~25 cm	28.86±1.04a	22.78±0.76a	25.30±0.03a	6.49	34.74±0.95b	28.78±0.74a	30.36±0.63a	4.84	40.36±0.90a	32.14±0.78a	37.30±0.56a	5.37
25~40 cm	29.77±0.71a	24.87±0.73a	26.92±0.32a	5.56	39.05±0.60a	26.56±0.38a	30.10±0.57a	11.89	35.96±0.84b	31.25±0.92a	32.68±0.52b	3.21

注:同列不同小写字母表示同一经济林地不同土层间差异显著($P<0.05$)。

表3 6月不同土地利用方式土壤含水率差异

Table 3 Differences of soil moisture content under different land use patterns in June

植被类型	花椒地				金银花地				火龙果地			
	最大值	最小值	均值	变异系数	最大值	最小值	均值	变异系数	最大值	最小值	均值	变异系数
0~10 cm	29.60±0.32b	16.82±0.56b	20.81±0.34b	14.71	27.09±0.56b	22.63±0.43b	24.51±0.45b	4.41	33.84±0.45c	31.27±0.36b	32.22±0.43b	2.35
10~25 cm	36.01±0.46a	24.62±0.67a	27.91±0.26a	11.17	37.35±0.32a	29.68±0.50a	31.52±0.37a	7.51	43.24±0.51a	38.88±0.56a	41.22±0.32a	2.50
25~40 cm	36.13±0.73a	24.92±0.23a	29.10±0.57a	8.96	37.48±0.64a	27.69±0.38a	32.29±0.49a	11.37	38.79±0.47b	33.10±0.35b	34.51±0.65b	4.35

注:同列不同小写字母表示同一经济林地不同土层间差异显著($P<0.05$)。

表4 7月不同土地利用方式土壤含水率差异

Table 4 Differences of soil moisture content under different land use patterns in July

植被类型	花椒地				金银花地				火龙果地			
	最大值	最小值	均值	变异系数	最大值	最小值	均值	变异系数	最大值	最小值	均值	变异系数
0~10 cm	20.63±0.34b	14.73±0.38b	16.84±0.45b	9.34	24.50±0.47c	19.12±0.36b	24.51±0.28b	5.51	34.54±0.56b	31.44±0.72b	33.01±0.54b	2.28
10~25 cm	26.19±0.45a	20.36±0.51a	22.74±0.39a	8.23	33.76±0.29b	25.16±0.56a	28.86±0.67a	5.88	41.84±0.97a	39.62±0.98a	40.40±0.82a	1.11
25~40 cm	28.19±0.32a	23.19±0.32a	25.32±0.41a	6.85	40.47±1.03a	25.90±0.69a	29.03±0.45a	9.99	36.16±0.69b	32.91±0.45b	34.12±0.72b	2.24

注:同列不同小写字母表示同一经济林地不同土层间差异显著($P<0.05$)。

表 5 8 月不同土地利用方式土壤含水率差异

Table 5 Differences of soil moisture content under different land use patterns in August

植被类型	花椒地				金银花地				火龙果地			
	最大值	最小值	均值	变异系数	最大值	最小值	均值	变异系数	最大值	最小值	均值	变异系数
0~10 cm	36.43±0.56b	15.15±0.45b	19.09±0.34c	18.61	29.12±0.38c	19.38±0.45b	21.98±0.43b	9.53	35.91±0.48b	32.77±0.33b	35.60±0.30b	1.79
10~25 cm	41.78±1.03a	20.34±0.37a	25.19±0.57b	15.82	36.32±0.54b	25.03±0.56a	28.49±0.29a	9.16	42.82±0.37a	40.00±0.79a	40.65±0.77a	1.65
25~40 cm	41.19±0.98a	22.83±0.67a	26.94±0.42a	11.89	41.34±0.78a	26.94±0.48a	30.53±0.53a	14.17	41.24±0.59a	34.48±0.64b	35.88±0.51b	3.90

注:同列不同小写字母表示同一经济林地不同土层间差异显著 ($P<0.05$)。

表 6 9 月不同土地利用方式土壤含水率差异

Table 6 Differences of soil moisture content under different land use patterns in September

植被类型	花椒地				金银花地				火龙果地			
	最大值	最小值	均值	变异系数	最大值	最小值	均值	变异系数	最大值	最小值	均值	变异系数
0~10 cm	20.08±0.32b	15.35±0.34b	17.80±0.19b	8.50	24.40±0.38c	17.98±0.56b	21.52±0.48b	7.61	34.62±0.78b	31.27±0.49c	32.91±0.50c	1.93
10~25 cm	27.02±0.35a	22.84±0.42a	24.93±0.24a	7.05	35.09±0.59b	23.73±0.45a	27.12±0.72a	7.91	41.19±0.85a	39.29±0.56a	39.93±0.87a	1.10
25~40 cm	28.43±0.57a	23.94±0.45a	26.10±0.37a	6.27	39.57±0.79a	24.50±0.62a	28.98±0.29a	11.39	38.06±0.56a	35.06±0.47b	35.70±0.64b	2.18

注:同列不同小写字母表示同一经济林地不同土层间差异显著 ($P<0.05$)。

加,在观测期内达到最大值。9月雨季逐渐减退,气温逐渐降低,土壤蒸发作用减弱,且植被进入生长末期,所需水分逐渐减少。因此,在9月之后,各土地利用方式的土壤储水量呈减少的趋势,但由于前几个月储水量的赋存累积使得9月的储水量高于未进入雨季前的储水量。

以上分析表明,3种土地利用方式在0~40 cm土层的土壤储水量具有明显的季节变化特征,且随时间的变化总体呈增长趋势。

4.2 不同经济林地土壤水分的垂直变化

喀斯特地区水热资源分布集中,地表、地下具有独特的二元结构,土壤贫瘠,水土流失严重,使得土壤含水量的垂直剖面变化与其他地区相比有明显的差异^[25]。

在0~10 cm土层土壤含水率受降雨影响较大,因为表层土壤对降雨的响应迅速,降雨后表层土壤含水率急剧增加,且植被凋落物截留下的雨水也能够被浅层土壤吸收,因而该层土壤含水率相比增加较高,但由于该层较浅,地表的蒸散作用以及植物的蒸腾作用对该层土壤水分也有影响,导致该层含水率总体变化比较大。在10~25 cm波动不大,该层没有与外部环境直接接触,受降雨和蒸发影响较低,降雨入渗作用减弱,且受蒸散作用的影响也较小,所以土壤含水率相对稳定^[26]。在25~40 cm随着土层深度的加深含水率迅速增加达到最大值,降雨发生后,一部分降水通过径流流失,一部分降水入渗到地下,且植物根系大多分布于该层,该层土壤含水量增加与岩石的渗漏及土壤的物理性质有关^[27]。

通过计算3种经济林地土壤含水率的均值和变异系数,得出研究区内3种经济林地的土壤含水率变化特征。花椒地土壤剖面含水率均随着深度增加逐渐增加,变异系数随着深度的增加逐渐减小,表明花椒地土壤含水率随着深度的增加趋于稳定状态;金银花地土壤剖面含水率均随着深度增加逐渐增加,变异系数随着深度的增加而增大,在金银花地40 cm深度附近已可看到基岩,推测是由于处于岩土界面具有扰动流以及较多的碎石块增加了土壤的入渗能力,使得水分向深处运移^[28]进而影响深层土壤含水率的变化;火龙果地土壤剖面含水率随深度增加先增加后减少,变异系数随着深度变化先减小后增大,这与该样地基岩裸露较多有关。地表出露的岩石在降雨来临时接收大量水,随后有一部分直接转移到附近土壤中,导致表层土壤含水率发生变化,一部分通过岩石裂隙供给到中间层土壤,使得中间层土壤含水率变化,深层土壤较深而不能直接供给,极大地影响了土壤水分的变化^[29]。

综合表2至表6,花椒地的变异系数相对金银花地和火龙果地较高,表明花椒地比其他两种经济林地更易受降雨影响。与黄土高原地区土壤水分垂直变化层次一般分为3~4层相比,喀斯特地区土壤水分垂直变化层次较少且没有速变层和活跃层,这可能与喀斯特地区降雨较为充足以及土层浅薄而黄土高原土层深厚但干旱缺少降雨有关^[30-31]。

颜蒙蒙等^[17]研究贵阳市花溪区土壤水分动态变化规律时得出,土壤剖面水分的垂直变化具有明显的层次,可分为活跃层(0~10 cm)、次活跃层(10~30 cm)和相对稳定层(30~100 cm),10~30 cm土层较能准确地反映出降雨和蒸发对土层的影响;张川等^[32]通过研究桂西北不同地质背景典型喀斯特峰丛洼地剖面(0~90 cm)土壤含水率的动态变化特征得出,洼地剖面土壤含水率总体较高,且随着深度的增加含水量逐渐增加,且具有明显的分层现象,从上到下依次为活跃层、次活跃层、相对稳定层,这与本研究结果不同,主要原因是本研究区样地石漠化程度严重,以坡改梯为主,0~40 cm为坡改梯的平均土层厚度,土层较浅,分层较少。

4.3 土壤水分与土壤孔隙度及物质组成

土壤孔隙大小及分布对土壤水分贮存数量和运动速度起着决定作用,孔隙度愈大,则土壤愈疏松,透水性愈好。非毛管孔隙度决定了土壤的贮水能

力,由表1样地概况可知,火龙果地总孔隙度与非毛管孔隙度均为最大,反映出火龙果地土壤持水能力优于花椒地和金银花地。火龙果地容重均小于花椒地和金银花地,这与坡位因素及造林密度有关,也可能与3种作物根系分布状况及枯落物的分解情况有关,符合单位体积下含水量越大,容重就减小,这与以往对土壤含水量与容重的研究结果一致^[33]。

土壤含水率还与土壤结构密切相关。土壤较小颗粒物质含量越多,土壤黏结性就越强,对水的吸附和固定能力也越强^[34],较大的砂粒对土壤水分的影响较小。在本研究中,火龙果地较金银花和花椒地土壤黏粒含量较高,提高了土壤对水分的吸附和固定能力,减少水分流失,因此火龙果地的土壤含水率高于其他两种经济林地。这与马生花等^[35]的结果一致。同时,也说明土壤含水率的影响因素在浅土层主要为降雨、地表蒸发、植被覆盖等,而在深土层主要为土壤的机械组成。

有机碳作为土壤的一项主要养分指标,可直接吸收水分,通过改良土壤结构能影响土壤水分含量^[36]。因此,有机碳含量较低的花椒地土壤含水量会因为外界环境因素的变化而产生变化,而有机碳含量较高的火龙果地,土壤孔隙结构搭配合理且机械组成较好,土壤含水量变异较小,这与吕娜^[37]、夏彬等^[38]的研究结果一致。

5 结 论

(1) 关岭一贞丰花江示范区3种经济林地土壤储水量随着降雨的季节变化明显,与降水随时间的变化趋势一致,但在时间上滞后于降水量,在8月达到最大值,观测期内不同经济林地0~40 cm土层土壤储水量表现为火龙果地(478.97 mm)>金银花地(372.64 mm)>花椒地(322.15 mm);

(2) 观测期内火龙果地、金银花地、花椒地的土壤含水率分别为35.97%、27.36%、23.55%,火龙果地土壤含水率高于其他经济林地,花椒地土壤含水率最小;其土壤含水率整体变异系数分别为9.64%、19.53%、24.27%,火龙果地为弱变异,花椒地和金银花地为中等变异。随着土层的加深,含水率总体呈增加的趋势,这也与喀斯特地区独特的二元异质性有关;

(3) 火龙果地的持水效果最好,金银花地和花椒地次之,这对该地区的水土保持功能提升具有重

要作用,因此,建议在贵州省花江喀斯特高原峡谷区石漠化治理过程中可适量种植火龙果,以达到生态恢复效果,并推动当地产业发展。

参考文献

- [1] 朱炜歆,牛俊杰,刘庚,等.植被类型对生长季黄土区土壤含水量的影响[J].干旱区资源与环境,2016,30(1):152-156.
- [2] 张北赢,徐学选,白晓华.黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分分析[J].干旱地区农业研究,2006,24(2):96-99.
- [3] Xiaofeng Liu, Xiaoming Feng, Bojie Fu. Changes in global terrestrial ecosystem water use efficiency are closely related to soil moisture [J]. Science of The Total Environment, 2020, 698: 134165.
- [4] 熊康宁,池永宽.中国南方喀斯特生态系统面临的问题及对策[J].生态经济,2015,31(1):23-30.
- [5] 蒋忠诚,曹建华,杨德生,等.西南岩溶石漠化区水土流失现状与综合防治对策[J].中国水土保持科学,2008,6(1):37-42.
- [6] 邓艳,曹建华,蒋忠诚,等.西南岩溶石漠化综合治理水土一土一植被关键技术进展与建议[J].中国岩溶,2016,35(5):476-485.
- [7] Sharp J M, Simmons C T. The Compleat Darcy: New lessons learned from the first english translation of Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon[J]. Groundwater, 2010, 43(3):457-460.
- [8] 刘士余,左长清,朱金兆.地被物对土壤水分动态和水量平衡的影响研究[J].自然资源学报,2007,22(3):424-433.
- [9] 缪凌,董建国,汪有科,等.黄土丘陵区不同土地利用类型下的深层土壤水分变化特征[J].水土保持研究,2016,23(2):13-18.
- [10] 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.
- [11] 艾宁,宗巧鱼,刘广全,等.陕北黄土区浅沟土壤水分空间分布特征[J].水土保持学报,2019,33(5):85-90.
- [12] 杜好田,焦峰,姚静,等.黄土丘陵区降水变化对退耕草地土壤水分特征的影响[J].水土保持研究,2019,26(5):81-88.
- [13] 陈洪松,王克林.西南喀斯特山区土壤水分研究[J].农业现代化研究,2008,29(6):734-738.
- [14] 李安定,卢永飞,韦小丽,等.花江喀斯特峡谷地区不同小生境土壤水分的动态研究[J].中国岩溶,2008,27(1):56-62.
- [15] 何贝贝,沈有信,朱习爱,等.滇石林石漠化与次生林的土壤含水率时空变化比较研究[J].中国岩溶,2018,37(4):555-561.
- [16] 李春茂,陈洪松,徐勤学,等.典型岩溶峰丛洼地坡面土壤水分空间变异性[J].中国岩溶,2018,37(2):159-167.
- [17] 颜蒙蒙,周洲,王济,等.喀斯特地区土壤水分随降雨的动态变化研究:以贵阳市花溪区为例[J].中国岩溶,2016,35(4):446-452.
- [18] 赵志猛,沈有信,朱习爱.西南岩溶地区土壤水分研究进展[J].湖北农业科学,2017,56(19):3603-3609.
- [19] 喻阳华,王璐,钟欣平,等.贵州喀斯特山区不同海拔花椒人工林土壤质量评价[J].生态学报,2018,38(21):7850-7858.
- [20] 李苇洁,汪廷梅,王桂萍,等.花江喀斯特峡谷区顶坛花椒林生态系统服务功能价值评估[J].中国岩溶,2010,29(2):152-154,161.
- [21] 鲍乾.几种生态经济型植物经营模式的土壤生态功能效应研究[D].贵阳:贵州大学,2017.
- [22] 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.
- [23] 马月存,秦红灵,高旺盛,等.农牧交错带不同耕作方式土壤水分动态变化特征[J].生态学报,2007,27(6):2523-2530.
- [24] 王景才,夏自强,彭兆然,等.淮北平原汉王实验站土壤水资源特征试验研究[J].排灌机械工程学报,2012,30(3):362-367.
- [25] 刘艳.喀斯特峰丛洼地不同土地利用方式下表层土壤水分的时空规律研究[D].南宁:广西大学,2016.
- [26] 袁吉有.桂西北典型峰丛洼地不同利用方式下的土壤水分动态研究[D].长沙:湖南农业大学,2005.
- [27] 李卓.土壤机械组成及容重对水分特征参数影响模拟试验研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2009.
- [28] Fu T, Chen H, Zhang W, et al. Spatial variability of surface soil saturated hydraulic conductivity in a small karst catchment of southwest China [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(3):2381-2391.
- [29] Dian-jie Wang, You-xin Shen, Jin Huang, et al. Rock outcrops redistribute water to nearby soil patches in karst landscapes [J]. Environmental Science & Pollution Research, 2016, 23(9):8610-8616.
- [30] 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,2018,38(10):3471-3481.
- [31] 邵臻,张富,陈瑾,等.陇中黄土丘陵沟壑区不同土地利用下土壤水分变化分析[J].干旱区资源与环境,2017,31(12):129-135.
- [32] 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.
- [33] 张川,陈洪松,张伟,等.喀斯特坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率的空间变异特征[J].应用生态学报,2014,25(6):1585-1591.
- [34] 侯喜禄,白岗栓,曹清玉.黄土丘陵区湾塌地乔灌林土壤水分动态监测[J].水土保持研究,1996,3(2):57-65.
- [35] 马生花,谢应忠,胡海英,等.荒漠草原2种典型群落类型下土壤含水量与土壤粒径分布的关系[J].中国水土保持,2019(7):61-65.
- [36] Western A W, Zhou S L, Grayson R B, et al. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relation to dominant spatial hydrological processes [J]. Journal of Hydrology,

- 2004, 286(1): 113-134.
- [37] 吕娜. 不同种植模式土壤有机碳和含水量变化特征研究[J]. 环境科学导刊, 2019, 38(4): 6-10.
- [38] 夏彬, 朱世硕, 郝旺林, 等. 黄土丘陵区土壤有机碳含量对侵蚀坡面表层土壤含水量时空变化的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 175-181.

Study on soil moisture variation characteristics of different economic forest lands in karst gorge area: A case study of Huajiang demonstration area in Guizhou Province

GAO Ajuan^{1,2}, LIU Ziqi^{1,2}, LI Yuan^{1,2}, LI Kaiping^{1,2}

(1.School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China; 2.State Engineering Technology Institute for Karst Rocky Desertification Control, Guizhou, Guiyang 550001, China)

Abstract The study area is located in the Guanling–Zhenfeng Huajiang demonstration area in the southwestern Guizhou Province. The total area of the study area is 51.62 km², with the karst area of 45.39 km², and the altitude is 500–1,200 m. It is a typical karst plateau gorge area in Guizhou with exposed and broken surface and undulating terrain. *Hylocereus undulatus* Britt, *Zanthoxylum bungeanum* and *Lonicera japonica* Thunb are typical economic plants in this area. In this study, this three economic forest lands were selected as the sampling plots to conduct a long-term monitoring on soil moisture and rainfall and to reveal the dynamic characteristics of the soil moisture and the influence of different economic plants on the dynamics of soil moistures along soil profile. This research is also to provide scientific basis for vegetation restoration and sustainable development of the ecological environment in karst rocky desertification area. Three observation points are equidistantly arranged in each plot with three probes installed in an observation point. A soil moisture sensor (EM 50, Meter Corporation, USA) was used to continuously monitor the volumetric soil water content. At each observation point, the probes were installed at the depth of 10 cm, 25 cm and 40 cm to the soil surface, respectively, which monitored the soil water content 24 hours a day and the monitoring was conducted in five month time from May to September, 2018. During the monitoring process, the soil moisture content was recorded at a 10-minute interval. In the meantime, the rainfall data is monitored by a small meteorological observatory (ATMOS, Meter Corporation, USA). Based on the monitoring data, the coefficient of variation of soil water storage and soil water content were calculated. SPSS 20.0 was used for statistical analysis of the data, and Origin 8.5 was used for mapping. The result showed that the variation of soil water storage in the three economic forest lands was consistent with rainfall in both quantity and time. The soil water content reached a maximum value in August and its fluctuation slightly lagged behind the precipitation. During the observation period, the soil water contents in the 40 cm deep soil layer showed a difference in the three types of land, which were *Hylocereus undulatus* Britt field (478.97 mm) > *Lonicera japonica* Thunb field (372.64 mm) > *Zanthoxylum bungeanum* field (322.15 mm), respectively, with the water contents of 35.97%, 27.36%, and 23.55%. In a conclusion, the *Hylocereus undulatus* Britt field has the best water holding effect, followed by *Lonicera japonica* Thunb field, and *Zanthoxylum bungeanum* field, which plays an important role in improving the water and soil conservation function of the area. Therefore, in the process of rocky desertification control in Huajiang karst plateau gorge of Guizhou Province, *Hylocereus undulatus* Britt will be helpful to be planted in an appropriate amount to achieve the effect of ecological restoration and promote the development of local industries.

Key words karst gorge area, economic forest land, soil water storage, soil moisture content, coefficient of variation

(编辑 黄晨晖)