

喀斯特峰丛洼地坡地橘园与梯田橘园土壤水分变化特征

刘宇杰^{1,2}, 敖利满^{1,2}, 李春茂^{1,2}, 徐勤学^{2,3}, 付智勇³, 陈洪松³

(1. 桂林理工大学广西环境污染控制理论与技术重点实验室科教结合科技创新基地,
广西 桂林 541004; 2. 桂林理工大学岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心,
广西 桂林 541004; 3. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西 环江 547100)

摘要: 为探明喀斯特坡地改为梯田后土壤水分的变化特征, 以典型喀斯特坡地橘园和梯田橘园为研究对象, 对不同深度土层(0—70 cm)土壤含水量进行 1 年(376 天)的连续监测。结果表明: (1) 梯田橘园平均土壤含水量(32.64%)与坡地橘园(33.05%)差异很小, 梯田橘园表层(0—10 cm)土壤含水量(43.35%)显著高于坡地橘园(34.24%), 两者土壤水分均呈现旱季变化相对平缓、雨季波动较为剧烈的变化规律, 梯田橘园表层土壤含水量与下层有明显差异, 而坡地橘园各土层土壤含水量差异较小。(2) 不同雨量的降雨事件中, 梯田橘园各土层含水量总体增长幅度较坡地橘园大; 停雨后 24 h 内, 梯田橘园表层土壤含水量的衰退速度较坡地橘园慢, 但停雨后 1 周内, 梯田橘园各土层含水量衰退速度总体较坡地橘园快。(3) 梯田橘园与坡地橘园的平均相对可利用水分分别为 0.37 与 0.38, 与非喀斯特地区相比, 梯田在喀斯特峰丛洼地的保水效果相对不明显。研究结果可为定量评价喀斯特地区坡改梯措施的保水效益提供一定的科学依据。

关键词: 喀斯特; 梯田橘园; 土壤水分; 保水效益; 相对可利用水分

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)03-0296-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2023.03.038

Variation Characteristics of Soil Moisture in Slope Citrus Orchard and Terraced Citrus Orchard in Karst Peak-Cluster Depression Area

LIU Yujie^{1,2}, AO Liman^{1,2}, LI Chunmao^{1,2}, XU Qinxue^{2,3}, FU Zhiyong³, CHEN Hongsong³

(1. Science and Technology Innovation Base of Guangxi Key Laboratory for Theory and Technology of Environmental Pollution Control in Guangxi, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004; 2. Guangxi Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004; 3. Huanjiang Karst Ecosystem Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100)

Abstract: In order to determine the variation characteristics of soil moisture after the transformation of karst slope land into the terraced field, the typical karst slope citrus orchard and terraced citrus orchard were taken as the research objects, and the soil water content of different depths soil layers (0—70 cm) was continuously monitored for one year (376 days). The results showed that: (1) The average soil water content of terraced citrus orchard (32.64%) was little different from that of sloping citrus orchard (33.05%). The soil water content (43.35%) in the surface layer (0—10 cm) of terraced orange orchard was significantly higher than that of sloping citrus orchard (34.24%). Both of them demonstrated a violent fluctuation in the rainy season and a relative gentle change in the dry season. In the terraced citrus orchard, there was a substantial difference in soil moisture between the surface soil and the lower layer, while there was no variation in the soil moisture among each soil layer in the sloping citrus orchard. (2) In the rainfall events with different rainfall amounts, the overall increase of soil water content in terraced citrus orchard was greater than that in sloping citrus orchard. Within 24 hours after the rain stopped, the decline rate of surface soil water content in the terraced orchard was slower than that in the sloping citrus orchard, but within a week, the water content of all soil layers in terraced orange orchard declined faster than that in sloping orange orchard. (3) The

收稿日期: 2022-09-24

资助项目: 广西自然科学基金面上项目(2020GXNSFAA297093); 广西重点研发计划项目(桂科 AB22035058); 国家重点研发计划项目(2016YFC0502403)

第一作者: 刘宇杰(1996—), 男, 湖南安化人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与农业生态研究。E-mail: 408217183@qq.com

通信作者: 徐勤学(1982—), 男, 湖南新宁人, 教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事水土保持与农业生态研究。E-mail: xqx@glut.edu.cn

average relative available water of the terraced citrus orchard and sloping citrus orchard was 0.37 and 0.38, respectively. Compared with the non-karst region, the water conservation effect of terraced fields in karst peak-cluster depressions was relatively insignificant. The results of this study could provide a scientific basis for the quantitative evaluation of water conservation benefits of slope-to-terrace measure in karst area.

Keywords: Karst; terrace citrus orchard; soil moisture; effect of water conservation; relative available water

土壤水分是土壤重要组成成分之一,也是影响生态恢复和植物生长的重要因素。我国西南喀斯特地区生态环境脆弱,土层浅薄且分布不连续,土壤总量少,不同深度土层土壤水分变化迅速,土壤层保水能力较差^[1]。同时,降水时空的不均匀分布与特殊的地表地下二元结构导致该地区土壤干旱频发^[2],即使降水充沛但仍存在较大土壤水分亏缺问题^[3]。研究喀斯特地区不同深度土层土壤水分变化特征,对进一步了解土壤干旱问题具有较大意义。

峰丛洼地是西南喀斯特地区面积最大的喀斯特地貌类型区^[4],该地区人多地少问题较严重,当地农户为扩大农业生产效益,扩充耕地面积,将大量坡地改造成梯田,改变原地形,土壤水分特征也随着微地形改变而变化^[5]。大量关于非喀斯特地区梯田土壤水分的研究^[6]表明,梯田能够有效改善土壤质地、涵养水源、防治水土流失,具有良好的保水能力。但喀斯特峰丛洼地土壤结构复杂,水文过程与其他地区差异较大,梯田在该地区保水效益有所不同,目前,已有部分学者对喀斯特梯田土壤水分展开研究。田涟祎等^[7]研究喀斯特峡谷区不同土地利用类型土壤理化性质发现,坡改梯地土壤持水能力较荒草地好;黄刚^[8]对比研究喀斯特山地坡改梯地与5°及10°坡耕地的土壤含水量大小发现,相同降雨条件下,坡改梯地与坡耕地土壤含水量相近;徐勤学等^[9]对喀斯特峰丛坡地的土壤水分入渗特征研究发现,梯田旱地入渗性能低于灌木林地。已有对喀斯特地区梯田土壤水分的研究主要通过分析土壤性质或浅层土壤含水量来判别保水能力大小,缺乏对梯田深层土壤水分变化的研究,喀斯特梯田土壤水分的变化特征和保水能力还需要进一步地研究。

近年来,喀斯特峰丛洼地地区为发展经济广泛发展柑橘种植业,喀斯特坡地橘园发展迅速且种植面积较广,部分学者对南方红壤地区柑橘林地的土壤水分特征开展研究,朱丽琴等^[10]研究发现,土壤含水量随土层深度增加而降低;李玲等^[11]研究桂西北新建柑橘园土壤水分变化特征表明,砂页岩成土母质的梯田橘园保水性能较差。喀斯特峰丛洼地地区柑橘果园的土壤水分变化特征研究,对促进该地区橘园发展具有重要的现实意义,但该地区的相关研究仍较少。基于此,对喀斯特峰丛洼地梯田橘园与坡地橘园土壤剖

面的土壤水分进行连续监测,结合1年(376天)自然降雨数据,对其土壤水分动态变化特征进行研究,对比坡地和梯田土壤水分动态变化的差异,探讨喀斯特橘园土壤水分变化,以及梯田在喀斯特峰丛洼地的保水效果,以期为喀斯特地区坡改梯措施保水效益的定量评价提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验样地位于广西壮族自治区环江县大才乡新坡村(108°18′57″—108°19′58″E, 24°43′59″—24°44′49″N),地貌类型属于典型喀斯特峰丛洼地。属于亚热带季风气候区,多年平均气温19.6℃,雨热同期,无霜期329天,雨季(4—9月)降雨量可达到全年降水量75%以上,以6—7月间最多,10月到翌年3月一般为旱季,年均降水量为1389mm^[12]。样地土壤为白云岩发育而成的石灰土,地表多碎石覆盖(>2mm),土壤质地为黏土和黏壤土,土壤有机质含量为2.1%~10.1%,土壤pH为中性至微碱性,土层较为浅薄,坡地、洼地平均基岩裸露率分别为30%和15%,相应的土层深度分别为10—50,20—160cm。

样地位于坡中部分,梯田为2013年由自然坡地改造而成的土坎梯田,其上均为同期种植的柑橘树,橘树品种为3年生桂西北沃柑,每棵橘树间距约为3m。坡地橘园和梯田橘园均有裸岩出露。在坡地橘园中部选择40m左右宽度的样方,从样方边缘开始呈曲线型布设5个样点,各样点间隔为7~8m;梯田橘园共布设5个样点,每阶层设置1个样点,也呈曲线型分布。

1.2 试验方法

试验观测时间为2018年3月19日至2019年3月30日。土壤含水量长期监测采用三针式TDR传感器测定。在选定的梯田橘园开挖70—80cm的土壤剖面,分别在埋深10,30,50,70cm土层将TDR探头水平插入土壤中,埋深最深的探头接近风化层。坡地橘园土层较浅薄,在选定样点处沿垂直方向开挖到50cm即到风化层,所以,坡地橘园所测土层仅分为10,30,50cm。将水分传感器与DTU(数据采集传输单元)连接,土壤水分的采样间隔为30min。在每次降雨事件结束后,及时采集数据,并分析土壤体积含水量的变化。

用容积 100 cm³ 的环刀采集不同土层的土样,散土采用铝盒收集,用环刀法测定土壤容重及孔隙度,称重法测定碎石含量,油浴法测定有机质含量,定水头法测定饱和导水率,鲍氏比重计法测定土壤机械组成^[13]。降雨量的监测采用自记式雨量计实时观测,流量计放置在研究区的空旷地,无遮挡水平气泡居中,记录降雨时间和降雨强度。

1.3 数据处理与分析

采用 Excel 2016 软件对土壤含水量以及土壤理化性质数据进行基本的统计分析,利用 SPSS 18.0 软件对不同土层土壤含水量进行差异显著性检验,通过 Origin 2019 软件绘制图表。

通过拟合线性方程,分析固定时段内土壤水分衰退过程,计算相同环境条件下,两地土壤水分平均衰退速率,用以评价土壤保水能力。将土壤含水量从峰值开始减少后的时段(t)内土壤含水量随时间的衰退过程拟合为线性方程,得到的方程斜率(a)即为各土层 1 周之内的衰退率值。线性方程为:

$$y = ax + b \quad (1)$$

式中: y 为土壤含水量(%); x 为时间(h); a 为斜率(无量纲); b 为截距(无量纲)。

应用相对可利用水分(REW)动态变化分析土壤干旱情况,由实测土壤体积含水量计算相对可利用水分,REW 可反映土壤水分状况,以及土壤含水量对作物生长的影响,计算公式为:

$$REW = \frac{(\theta - \theta_{\min})}{(\theta_{\max} - \theta_{\min})} \quad (2)$$

式中: θ 为 TDR 所测土壤体积含水量(%); $\theta_{\max}$ 为试验期间实测的最高土壤含水量(%); $\theta_{\min}$ 为试验期间实测的最低土壤含水量(%). REW 的取值范围为 0~1,当 0.1<REW<0.4 时,土壤水分条件为中等胁迫,REW>0.4 时,土壤水分条件为非水分胁迫^[14]。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

由表 1 可知,梯田与坡地橘园的土壤容重均随土层深度增加呈先减小后增大的趋势。梯田与坡地橘园各土层毛管孔隙度变化均无明显规律,而两地非毛管孔隙度均随土层深度的增加逐渐减小。梯田橘园与坡地橘园饱和导水率也呈现随埋深增加而递减趋势,梯田橘园表层土壤(10 cm 土层)饱和导水率为坡地橘园的 4.21 倍,差异较大。梯田橘园与坡地橘园 10,30,50 cm 深度的碎石含量均随土层深度增加而减少,但梯田橘园 70 cm 土层碎石含量却明显增加,显著高于其他土层。坡地橘园平均有机质含量为梯田橘园的 2.52 倍,坡地橘园 10,30 cm 土层土壤有机质含量显著高于 50 cm 土层,梯田橘园表层土壤有机质含量显著高于下层土壤。土壤机械组成方面,梯田橘园不同于坡地橘园,随土层深度增加黏粒含量增加砂粒含量减少;与 10,30 cm 土层相比,50,70 cm 土层黏粒减少,砂粒增多。

表 1 土壤基本理化性质

样地	土层深度/cm	容重/ (g·cm ⁻³)	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	饱和导水率/ (mm·min ⁻¹)	碎石含量/%	有机质/ (g·kg ⁻¹)	机械组成/%		
								黏粒	粉粒	砂粒
坡地橘园	10	1.02±0.16b	55.09±5.56a	6.25±3.07a	1.12±0.49b	4.34±3.66c	32.16a	11.89±1.05b	50.61±3.81a	37.50±4.85a
	30	1.01±0.07b	55.31±1.68a	5.79±4.04b	0.64±0.89b	2.31±1.36c	21.83a	17.17±1.21ab	50.78±0.96a	32.05±2.10a
	50	1.22±0.06a	54.47±3.94a	4.17±2.85c	0.09±0.11c	0.57±0.12c	13.54b	24.81±7.72a	49.10±1.09a	26.09±8.31a
梯田橘园	10	1.07±0.05b	56.75±1.67a	6.75±2.50a	4.72±5.03a	11.78±1.79b	14.92b	20.03±2.86ab	45.09±10.16a	34.87±8.70a
	30	1.03±0.07b	55.20±2.61a	6.19±1.60a	0.73±0.85b	4.50±2.70c	8.65c	20.58±6.71ab	41.72±17.05a	37.70±23.39a
	50	1.18±0.06a	55.65±1.23a	4.87±1.72c	0.05±0.06c	2.55±2.19c	6.43c	14.97±2.35ab	36.02±18.74a	49.01±20.86a
	70	1.20±0.12a	53.23±1.73b	4.74±3.36c	0.04±0.03c	18.00±6.11a	5.67c	13.44±4.15b	42.53±4.65a	44.03±7.99a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同土层深度间差异显著($p<0.05$)。下同。

2.2 土壤含水量时空变化特征

对比坡地橘园与梯田橘园 1 年的土壤含水量特征(表 2),坡地橘园表层 10 cm 平均土壤含水量(34.24%)显著低于梯田橘园(43.45%),但坡地橘园整体平均土壤含水量(33.05%)显著高于梯田橘园(32.64%)。从变异性来看,坡地橘园土壤含水量平均变异系数(4.38)低于梯田橘园(5.16)。旱雨季之间,旱季梯田橘园平均土壤含水量(32.65%)略高于坡地橘园(32.63%)。在雨季,梯田橘园平均土壤含水量(32.55%)

显著低于坡地橘园(33.78%)。梯田橘园雨季含水量平均变异系数较早季增大 27.09%,坡地橘园雨季含水量平均变异系数较早季增大 16.92%。

坡地橘园各土层含水量差异不明显,梯田橘园表层土壤含水量明显大于下层土壤。各土层之间,坡地橘园各土层的平均含水量从表层到下层土壤分别为 34.24%,31.09%,33.82%,相差不明显,含水量最大值 47.12%出现在 50 cm 土层;平均变异系数则随土层的深入而减小,分别为 5.46%,4.92%,2.63%。梯田橘园各土

层含水量差异较大,表层平均含水量相对 30,50,70 cm (55.46%)出现在表层;平均变异系数随土层深度增加呈土层分别提高 52.16%,41.76%,54.93%,含水量最大值 减小趋势,分别为 10.04%,3.44%,3.09%,3.93%。

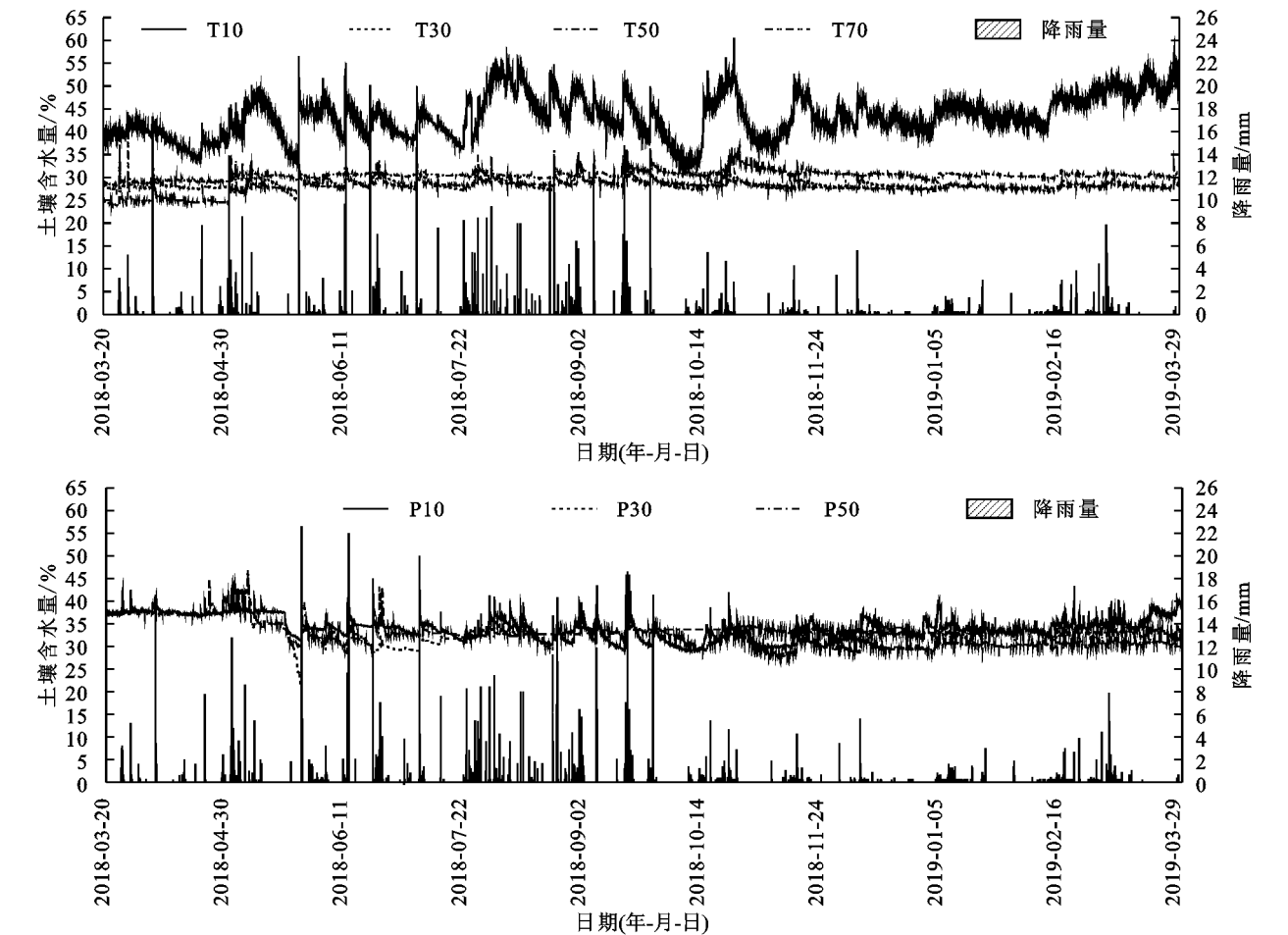
表 2 不同土层土壤含水量的统计分析

样地	土层 深度/cm	雨季(4—9月)				旱季(10月至翌年3月)				全年 平均值/%
		最大值/%	最小值/%	平均值/%	变异系数/%	最大值/%	最小值/%	平均值/%	变异系数/%	
梯田橘园	10	55.46	33.26	42.81±4.51a	9.62	52.92	32.80	43.87±4.50a	10.46	43.35±4.53a
	30	34.92	24.93	28.89±1.29f	4.49	32.58	27.31	28.11±0.65f	2.39	28.49±1.09f
	50	36.47	28.26	30.46±0.88e	2.91	31.21	29.44	30.69±0.94e	3.27	30.58±0.92e
	70	39.39	23.91	28.04±1.61g	6.04	29.64	27.32	27.92±1.00g	1.82	27.98±1.33g
	平均值	41.57	27.59	32.55±6.49C	5.77	36.58	29.22	32.65±6.99B	4.54	32.64±5.51B
坡地橘园	10	46.55	29.23	34.63±2.56b	4.57	41.92	29.03	33.87±2.37b	6.35	34.24±2.49b
	30	37.04	21.08	32.10±1.95d	5.91	33.47	27.49	30.36±0.96d	3.93	31.09±1.70d
	50	47.12	29.78	34.14±2.77c	3.48	35.15	31.21	33.51±1.21c	1.77	33.82±2.14c
	平均值	43.58	26.70	33.78±2.70A	4.73	36.85	29.24	32.63±2.26BC	4.02	33.05±5.33A

注:不同大写字母表示不同橘园间差异显著($p<0.05$)。下同。

梯田橘园土壤含水量在旱雨季变化比坡地橘园剧烈(图 1)。进入 5 月后,雨季降雨事件密集且雨量大,梯田橘园与坡地橘园土壤含水量因降雨频繁补给出现剧烈波动,呈现升高趋势;10 月进入旱季后,降雨事件减少且雨量少,梯田橘园与坡地橘园土壤含水量逐渐回落,平均含水量比雨季小。梯田橘园表层土壤含水量受降雨影响明显,在短时间内出现较大降雨

事件时(05/27/18)迅速增高,在降雨量较小但持续的时段(08/16/18)则逐渐增高,30,50,70 cm 土层土壤含水量则均在 30%波动。坡地橘园 10,30 cm 土层含水量在较大降雨事件出现时,均出现明显增高,但 50 cm 土层含水量变化幅度较小,进入 5 月后,土壤含水量逐渐减小,仅 7 月初有 1 次明显增高,而后含水量变化持续平缓。



注: T10、T30、T50、T70 分别为梯田 10、30、50、70 cm 土层土壤含水量; P10、P30、P50 分别为坡地 10、30、50 cm 土层土壤含水量。

图 1 土壤含水量动态变化

2.3 土壤水分对降雨的响应

由表 3 可知,为研究土壤水分对不同量级降雨的响应,选取小雨(7 月 8 日)、中雨(7 月 27 日)、大雨(9 月 26 日)、暴雨(9 月 7 日)共 4 场典型降雨事件,分析降雨事件发生后 24 h 内坡地与梯田橘园土壤水分变化特征。随着土层深度增加,梯田与坡地橘园土壤含水量增长幅度均呈减小趋势,梯田橘园各土层含水量总体较坡地橘园增幅更大。坡地橘园表层土壤含水量随降雨量增大而增大,大雨和暴雨事件时增幅最高;30 cm 土层含水量除小雨事件增幅较低,在中雨、大雨、暴雨事件中的增幅均为 6%~7%,较表层土壤明显降低;50 cm 土层增长幅度均未超过 1%,小雨事件中甚至下降。在不同降雨事件中,梯田橘园不同土层土壤含水量增幅变化规律较复杂,整体而言呈下降趋势。梯田橘园表层含水量增幅在小雨和中雨时较坡地橘园高,大雨和暴雨时较坡地橘园低,暴雨事件时,梯田与坡地表层含水量增幅分别为 15.4%和 41.7%,差异最大;梯田橘园 30 cm 以下深度土层土壤含水量增幅均较坡地橘园大,在大雨和暴雨事件中,30 cm 土层含水量增幅比坡地橘园高 10%~12%。

观察大雨和暴雨事件发生后土壤含水量衰退过程(图 2),梯田橘园 24 h 内表层土壤水分比坡地橘园衰退得更慢,1 周内平均土壤水分比坡地橘园衰退得更快。大雨和暴雨事件发生后 24 h 内,坡地橘园表层

含水量分别从 41.32%,43.44%下降到 33.68%,34.58%,梯田橘园表层含水量分别从 49.93%,48.95%下降到 44.60%,45.87%,坡地橘园 24 h 内,表层土壤水分衰退率明显高于梯田橘园。但降雨 24 h 后,坡地橘园表层土壤水分衰退率迅速降低,梯田橘园表层土壤水分则呈波动下降。1 周内的衰退过程中除暴雨后梯田橘园表层土壤外,梯田橘园其他土层水分的衰退率均大于坡地橘园。大雨事件后,梯田橘园表层土壤水分衰退率(5.35%)大于坡地橘园(2.86%),梯田橘园 30,50 cm 土层土壤水分衰退率均大于坡地橘园。暴雨事件后,梯田和坡地橘园表层土壤水分衰退率分别为 3.47%和 3.77%,但梯田橘园 30,50 cm 土层土壤水分衰退率均大于坡地橘园。

表 3 不同降雨事件下土壤含水量增幅

样地	土层深度/cm	土壤含水量增幅/%			
		7.80 (6.20 mm)	7.27 (13.00 mm)	9.26 (28.80 mm)	9.70 (40.20 mm)
梯田橘园	10	7.40	17.08	32.54	15.43
	30	1.25	7.44	16.59	18.89
	50	1.38	1.54	17.07	7.19
	70	-1.69	0.11	14.77	6.98
坡地橘园	10	3.65	10.27	37.82	41.71
	30	1.07	6.79	6.07	6.80
	50	-3.18	0.78	0.72	—

注:—表示数据缺失。

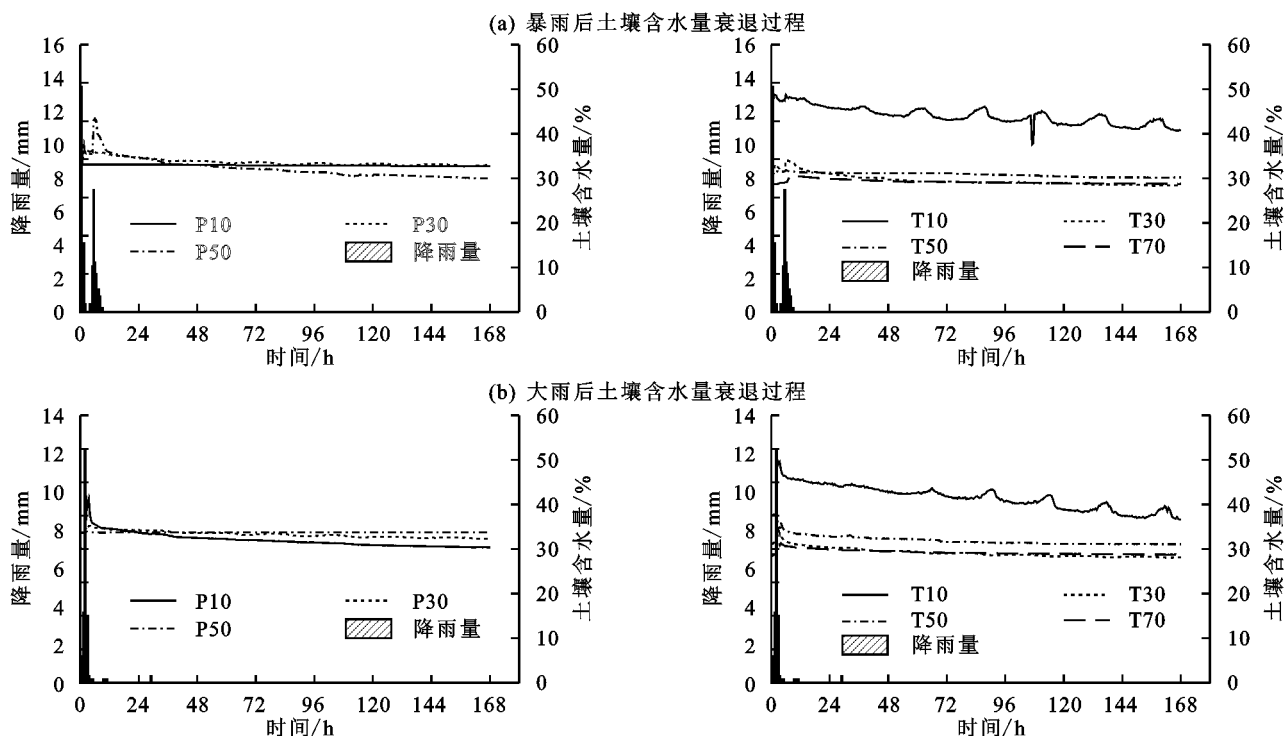


图 2 典型降雨事件下土壤含水量衰退过程

2.4 土壤相对可利用水分动态变化

对梯田与坡地橘园 10,30,50 cm 土层的相对可利用水分(REW)进行分析(表 4),观测期内梯田橘园平均

土壤相对可利用水分(0.37)显著低于坡地橘园(0.38),整体呈水分胁迫状态。随土层深度增加,坡地橘园 REW 呈先增加后减小的趋势,梯田橘园 REW 呈逐

渐减小趋势。雨季和旱季,梯田橘园平均 REW(0.35, 0.33)均显著低于坡地橘园(0.39, 0.34),雨季的平均 REW 高于旱季。梯田橘园 $REW < 0.4$ 的时段主要集中在 11 月到 4 月(旱季),坡地 $REW < 0.4$ 的时段主要集中在 10 月至翌年 2 月(旱季),说明旱季时梯田橘园与坡地橘园均更易受到水分胁迫。

由图 3 可知,梯田与坡地橘园表层 REW 全年均剧烈波动,坡地橘园表层 REW 长时间处于 0.4 以下水平(278.8 天),梯田橘园表层 REW 处于 0.4 以下水平时间较短(146.8 天)。坡地橘园 30 cm 土层长时间处于 0.4 以上水平(310.6 天)且平均 REW 最高(0.63),梯田橘园 30 cm 土层长时间处于 0.4 以下水平(271.6 天)。梯田橘园与坡地橘园 50 cm 土层 REW 基本处于 0.4 以下水平,全年水分亏缺时长分别为 339.5、320.9 天。

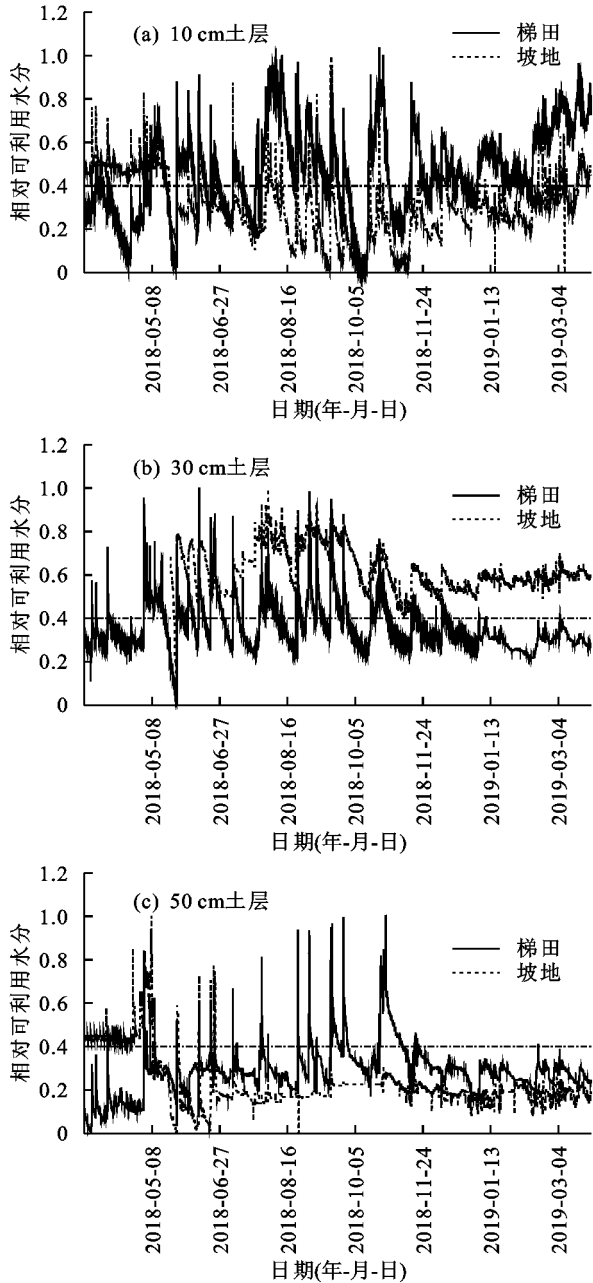


图 3 相对可利用水分 (REW) 的变化

3 讨论

3.1 土壤水分时空变化特征

梯田橘园表层 10 cm 土壤平均含水量显著高于坡地橘园,与已有研究^[15]结果一致,但梯田橘园平均土壤含水量(32.64%)显著低于坡地橘园(33.05%)。原因是梯田橘园表层饱和和导水率显著高于坡地橘园表层,且两者 30 cm 土层饱和和导水率均较小,梯田橘园表层与下层土壤饱和和导水率差异较大,土层之间易形成壤中流使下层土壤含水量减少。由表 2 可知,梯田橘园下层土壤含水量较小,使梯田橘园平均含水量略低于坡地橘园。造成饱和和导水率差异较大的重要因素可能是土壤中的碎石,碎石含量增大一定程度上可以增大土壤入渗率^[16],梯田橘园表层土壤的碎石含量约是坡地橘园的 3 倍。

梯田与坡地橘园土壤水分均在雨季波动剧烈,在旱季变化相对平缓,且各土层含水量在旱雨季的变异程度基本为弱变异,平均土壤含水量季节变化较小,与曾锐等^[17]研究结果一致。梯田橘园表层含水量明显大于下层,坡地橘园各土层土壤含水量差异则不明显。与程谅等^[18]在不同整地措施梯田果园土壤水分研究中得到的 0—20 cm 土层土壤含水量结果不一致,可能有多方面原因。土壤性质对土壤含水量有较大影响,梯田橘园在修建时受到扰动,10、30 cm 土层黏粒含量较多下层较少,梁福源等^[19]在石林地区的研究指出,土壤含水量与土壤黏粒含量呈正相关。此外,徐勤学等^[9]在喀斯特梯田旱地的研究中发现,喀斯特梯田土壤可能存在入渗隔层,对水分入渗产生显著的阻碍作用。本研究中,梯田橘园表层饱和和导水率与 30 cm 土层存在显著差异(表 1),水分入渗明显受到阻碍。梯田橘园各土层的毛管孔隙度无显著差异,深层土壤水分通过毛管上升蒸发,橘园土壤植物根系较多,通过水力提升作用使深层土壤水分向上层运移^[20],从而造成上下层的差异。

表 4 不同土层平均相对可利用水分的统计分析

样地	土层	雨季(4—9月)		旱季(10月至翌年3月)	全年
	深度/cm	平均值/%		平均值/%	平均值/%
梯田橘园	10	0.44±0.20b		0.44±0.17b	0.47±0.20b
	30	0.40±0.13c		0.32±0.07c	0.36±0.11c
	50	0.27±0.11e		0.30±0.12d	0.29±0.11e
	70	0.27±0.10f		0.25±0.07e	0.26±0.09f
	平均值	0.35±0.16B		0.33±0.14C	0.37±0.11
坡地橘园	10	0.32±0.15d		0.25±0.13e	0.30±0.14d
	30	0.69±0.12a		0.57±0.06a	0.63±0.11a
	50	0.25±0.16g		0.22±0.07f	0.23±0.12g
	平均值	0.39±0.23A		0.34±0.18B	0.38±0.08

3.2 土壤水分的补给与衰退特征

梯田橘园较坡地橘园更易受到降雨补给,降雨后 1 周内衰退得更多。小雨事件(6.20 mm)能够补给坡地橘园地表至 30 cm 土层的土壤水分,对梯田橘园土壤水分的补给能达到 50 cm 土层深度;中雨事件(13.00 mm)能够补给到梯田与坡地橘园的最底层,但对最底层土壤水分的补给较少,仅提升 0.11% 和 0.78%;大雨事件(28.80 mm)和暴雨事件(40.20 mm)对梯田橘园所有土层土壤水分均有明显提升作用,但对坡地橘园 50 cm 土层的补给较少。与前期含水量的影响有关^[21],前期含水量最高的梯田表层土壤在大雨和暴雨事件后增幅明显低于坡地橘园,梯田橘园 30 cm 及以下土层前期含水量均低于坡地橘园各土层含水量,降雨后较坡地橘园相同土层增长明显。坡地橘园 50 cm 土层土壤含水量在 4 场典型降雨事件中均无明显增长,可能是该土层容重较大、黏粒较多,土壤入渗能力较差^[22],且前期土壤含水量较高,降雨量较小时无法接受补给,降雨量增大但补给作用不明显。蒸发作用的不同影响降雨后土壤水分的衰退率^[23],梯田橘园修建时,受到坡面重塑的干扰,土壤结构和植被受到破坏,底层土壤被掀翻^[24],温度较高时土壤易开裂,长期来看,土壤水分蒸发作用比坡地橘园更明显。

3.3 梯田橘园与坡地橘园的保水效果

坡地橘园平均 REW(0.38)显著高于梯田橘园(0.37),与 Zhang 等^[25]研究结果不一致,可能是喀斯特地区虽然全年降雨量较多,但地下岩溶裂隙发达,土壤水分通过裂隙下渗漏失较严重^[26],梯田橘园受人为扰动、蒸发作用等因素影响较大^[27],也易发生干旱现象。此外,梯田主要起到拦截地表径流,促进水分入渗的作用,因此,坡改梯后梯田土壤含水量增加,然而,由于喀斯特地区较难形成地表径流^[28],相比非喀斯特地区梯田可拦截的地表径流较少,降雨更易直接入渗,导致梯田橘园与坡地橘园的平均土壤水分并无较大差异。REW 主要与实测最大与最小含水量有关,土壤含水量越接近最大含水量,REW 越高。各土层中坡地橘园 30 cm 土层 REW(0.63)最高,因为该土层平均含水量相对其他土层更接近实测含水量最大值,但由于旱季 2 个月的土壤含水量数据缺乏,也导致该深度 REW 水平偏高。梯田橘园各土层平均值更接近最小值,主要是梯田橘园土壤对降雨补给响应较快,土壤含水量快速补充与衰退,长时间干旱后又跌回较低水平;坡地橘园土壤对降雨补给响应较慢持水性能较强,土壤含水量在连续干旱时能维持相对较高水平。但对 10,30,50 cm 的 3 个深度土层

总体进行比较,除 30 cm 深度外,梯田橘园其他土层 REW 水平平均高于坡地橘园,说明梯田橘园对坡地土壤水分状况有改善,但是与其他非喀斯特地区相比,保水效果相对不明显。

4 结论

(1)梯田橘园平均土壤含水量(32.64%)低于坡地橘园(33.05%),但梯田橘园的表层土壤含水量显著高于坡地橘园。梯田与坡地橘园土壤水分均具有明显的季节特征与垂直差异,其中,梯田橘园表层土壤水分显著高于下层,且较下层土壤水分变化剧烈。

(2)降雨对梯田橘园的补给更明显,但梯田橘园的保水能力低于坡地橘园。梯田橘园各土层含水量的增长幅度总体较坡地橘园更大,梯田橘园土壤水分的衰退速度在降雨 24 h 内较坡地橘园慢,但在降雨后 1 周内比坡地橘园快。

(3)梯田在喀斯特峰丛洼地改善土壤水分的效果相比其他地区不太明显。旱季水分亏缺问题较雨季严重,下层水分亏缺问题较上层严重。总体而言,梯田与坡地橘园均处于水分胁迫状态。

参考文献:

- [1] Wang S, Fu Z Y, Chen H S, et al. Mechanisms of surface and subsurface runoff generation in subtropical soil-epikarst systems: Implications of rainfall simulation experiments on karst slope[J]. Journal of Hydrology, 2020, 580: e124370.
- [2] 黄荣辉,刘永,王林,等.2009 年秋至 2010 年春我国西南地区严重干旱的成因分析[J].大气科学,2012,36(3): 443-457.
- [3] Chen H S, Zhang W, Wang K, et al. Soil moisture dynamics under different land uses on karst hillslope in northwest Guangxi, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 61(6): 1105-1111.
- [4] 张雪梅,祁向坤,岳跃民,等.喀斯特峰丛洼地石漠化治理自然地域分区[J].生态学报,2020,40(16): 5490-5501.
- [5] 沈哈悦,信忠保,王志杰.北京山区侧柏林坡面土壤水分时空动态及其影响因素[J].生态学报,2021,41(7): 2676-2686.
- [6] Widmski M K. Terracing as a measure of soil erosion control and its effect on improvement of infiltration in eroded environment[J]. Soil Erosion Issues in Agriculture, 2011(10): 315-334.
- [7] 田涟祎,周忠发,闫利会.人为干预下喀斯特峡谷区不同土地利用类型对土壤理化性质的影响[J].水土保持通报,2015,35(6): 92-96.
- [8] 黄刚.重庆市喀斯特山地农耕区水土流失特征及其影响

- 因素分析[D].重庆:西南大学,2009.
- [9] 徐勤学,李春茂,陈洪松,等.喀斯特峰丛坡地灌木林地与梯田旱地土壤水分入渗特征[J].农业工程学报,2018,34(8):124-131.
- [10] 朱丽琴,黄荣珍,李凤,等.红壤侵蚀地植被恢复后土壤水分特征及其凋落物碳归还模式[J].水土保持通报,2015,35(5):1-6.
- [11] 李玲,肖润林,黄宇,等.桂西北新建柑橘园土壤水分变化及其水分管理[J].农业环境保护,2001,20(2):88-90.
- [12] 胡可,陈洪松,聂云鹏,等.桂西北喀斯特峰丛洼地降水氢氧稳定同位素的季节变化特征[J].农业工程学报,2013,29(5):53-62.
- [13] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978.
- [14] Bréda N, Huc R, Granier A, et al. Temperate forest trees and stands under severe drought: A review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences[J]. Annals of Forest Science, 2006,63(6):625-644.
- [15] 唐敏,赵西宁,高晓东,等.黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分变化特征[J].应用生态学报,2018,29(3):765-774.
- [16] 党宏宇,陈洪松,邵明安.喀斯特地区不同层次土石混合介质对土壤水分入渗过程的影响[J].农业工程学报,2012,28(8):38-43.
- [17] 曾锐,张陶,蒲俊兵,等.岩溶断陷盆地不同地貌部位土壤水时空分布规律及其影响因素[J].水土保持研究,2021,28(1):50-57.
- [18] 程谅,焦雄,邸涵悦,等.不同整地措施坡面土壤水分时空分布特征[J].土壤学报,2021,58(6):1423-1435.
- [19] 梁福源,宋林华,唐涛.石林地区土壤性质与喀斯特洼地发育[J].地理研究,2004,23(3):321-328.
- [20] Oliveira R S, Bezerra L, Davidson E A, et al. Deep root function in soil water dynamics in cerrado savannas of central Brazil[J]. Functional Ecology, 2005,19(4):574-581.
- [21] 刘西刚,王勇辉,焦黎.夏尔希里自然保护区典型植被土壤水源涵养功能探究[J].水土保持学报,2019,33(3):121-128.
- [22] Bolotov A G, Shein E V, Makarychev S V. Water retention capacity of soils in the altai region[J]. Eurasian Soil Science, 2019(2):212-219.
- [23] 王鸣远,杨素堂.沙地灌木林群落土壤水分平衡关系的研究[J].水土保持学报,2004,18(6):171-174.
- [24] Deng C X, Zhang G Y, Liu Y J, et al. Advantages and disadvantages of terracing: A comprehensive review [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2021,9(3):344-359.
- [25] Zhang H D, Wei W, Chen L D, et al. Effects of terracing on soil water and canopy transpiration of *Pinus tabulaeformis* in the Loess Plateau of China[J]. Ecological Engineering, 2017,102:557-564.
- [26] Wang J X, Zou B P, Liu Y, et al. Erosion-creep-collapse mechanism of underground soil loss for the karst rocky desertification in Chenqi village, Puding county, Guizhou, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2014,72(8):2751-2764.
- [27] 秦颖萍,刘泽彬,郭建斌,等.环境和冠层结构对华北落叶松林树干液流的影响[J].应用生态学报,2021,32(5):1681-1689.
- [28] 彭韬,王世杰,张信宝,等.喀斯特坡地地表径流系数监测初报[J].地球与环境,2008,36(2):125-129.