

文章编号: 1008-2786-(2019)1-053-09

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000398

龙潭喀斯特槽谷倾坡土壤水分变异性研究

游贤慧^{1,2}, 杨 琰^{1,2*}, 徐 刚^{1,2}, 邹晓岗^{1,2}, 曾朱周³

(1. 西南大学 地理科学学院 岩溶环境重庆市重点实验室, 重庆 400715; 2. 自然资源部岩溶生态环境—重庆南川野外基地, 重庆 408435; 3. 重庆和信农业发展有限公司, 重庆 409800)

摘 要: 保水保土是石漠化治理的关键, 掌握石漠化区土壤水分的变化规律对石漠化治理有重要的作用。2017 年 6 月—2018 年 11 月在重庆酉阳县龙潭槽谷两侧顺、逆倾坡(典型石漠化治理区)选择 4 个土壤剖面分 15 cm、30 cm 土层深度埋设探头, 开展高分辨率土壤水分和土壤温度的动态监测。结果表明: (1) 季节尺度上, 土壤水分与降雨量的关系较大, 与土温的关系较小; 顺倾坡土壤水分高于逆倾坡, 且多雨季节比少雨季节明显; 多雨季节, 裸岩出露影响降雨的再分配: 顺倾坡得到双重补给, 即降雨补给、裸岩地表径流补给。(2) 降雨间歇期, 顺倾坡失水量较逆倾坡少, 这主要与坡面坡度和土壤质地的差异有关。(3) 降雨期间, 降雨强度较小时, 土壤水分随土层深度的增加而增加; 但降雨强度较大时, 顺倾坡土壤监测点出现表层土壤水分大于底层土壤水分的现象, 这主要与强降雨引起坡面的超渗产流有关。(4) 受龙潭槽谷顺、逆倾坡空间差异的影响, 槽谷两侧裸岩出露率、土层厚度、土壤有机质等自然要素差别明显, 进而对该区土壤水分的时空分布有重要影响, 因此在石漠化治理过程中应采取不同的保水保土措施。

关键词: 石漠化; 喀斯特槽谷; 顺、逆坡面; 土壤水分; 重庆酉阳

中图分类号: S152.7

文献标志码: A

我国南方喀斯特(Karst, 岩溶)槽谷区存在独特的地表地下双层空间结构, 在强降雨、高温、干旱等极端事件及人类活动的影响下, 植被破坏率、土壤侵蚀率显著提高^[1-2], 土壤水分存在与其他类型区不同的规律和特点^[3]。当某地的气候条件和植物种类一定时, 喀斯特区域的植物耗水便主要取决于土壤水分含量^[4], 植被反过来也影响着土壤水分的分布, 植被条件较好的地方, 一般土壤水分也较好。土壤水分的高低也间接影响着喀斯特槽谷的水土流失, 是土壤流失的重要作用因子^[5]; 越高的降雨强度, 越易造成水土流失^[6]。因此土壤和水的保护是石漠化治理的基础^[7]。

土壤水分有其时空变化规律。一方面土壤水分随季节变化而变化, 另一方面土壤水分随土层深度和水平位置的变化而变化。针对喀斯特地区土壤水分的时空变异性及其影响因素, 国内外学者已进行了大量研究^[8-9]。然而, 大部分研究均是采用定期传统采样方法(土钻法), 缺乏时间上高分辨率的监测; 虽然也有学者利用高分辨仪器对土壤水分进行持续监测^[10-14], 但大部分的研究是国外学者针对喀斯特区裸岩开展的。例如, Canton Y 等^[10]发现: 干旱时, 地中海区域喀斯特坡地土壤水分主要受土壤质地的影响; 湿季时, 土壤水分分布主要受裸岩分布的影响。国内只有颜蒙蒙、郭小娇等^[15-16]学者对喀

收稿日期(Received date): 2018-03-20; 改回日期(Accepted date): 2019-01-20

基金项目(Foundation item): 国家重点研发计划(2016YFC050230205); 国家自然科学基金项目(41672160)。[National Key Research and Development Program of China(2016YFC050230205); National Natural Science Foundation of China(41672160)]

作者简介(Biography): 游贤慧(1994-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为岩溶环境变化。[YOU Xianhui(1994-), female, M. Sc. candidate, research on karst environment change] E-mail: y19940427@email.swu.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): 杨琰(1976-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为全球变化。[YANG Yan(1976-), male, Ph. D., associate professor, research on global change] E-mail: yy2954@gmail.com

斯特区土壤剖面随降雨的动态变化进行持续监测,而喀斯特槽谷石漠化区不同坡面影响下的土壤水分的动态变化规律及影响因素的时间上高分辨率研究还有待进一步深入。

本文的研究区重庆酉阳龙潭喀斯特槽谷是国家重点研发计划(2016YFC050230205)——“喀斯特槽谷区土地石漠化过程及综合治理技术研发与示范”的一个典型示范点^[17]。本文选择在龙潭喀斯特槽谷两侧顺、逆倾坡上开展不同坡面土壤水分高分辨率动态监测,研究不同坡面上土壤水分在季节、降雨间歇期、降雨下的动态变化规律,并探究其影响因素,从而加深对石漠化区不同坡面土壤水分变化规律的认识,加深对喀斯特区地表产流条件以及土壤水分下渗机制的认识^[18-19],以期为区域石漠化的分类治理、流域石漠化治理提供理论支撑。

1 研究区概况

研究区位于重庆市酉阳县龙潭槽谷内,槽谷流域面积为 1677 km²,其中喀斯特面积为 1273 km²,石漠化面积为 183 km²,分别占流域面积的 76% 和 11%。龙潭槽谷位于酉阳县桐麻岭背斜的东南翼中,呈东北—西南走向,槽谷两侧岩层倾向一致,坡向相反,出现坡向和岩层倾向一致的顺倾坡(位于龙潭槽谷的西侧)、坡向和岩层倾向相反的逆倾坡(位于龙潭槽谷的东侧);顺、逆倾坡呈东北—西南走向,其中,逆倾坡为阳坡,顺倾坡为阴坡(图 1)。桐麻岭背斜轴部以寒武系的白云岩和奥陶系灰岩为主,背斜两翼分别为志留系的砂页岩和二叠、三叠系

的灰岩,砂页岩的出现为龙潭槽谷底部土壤发育提供重要的物质来源(图 2)。龙潭槽谷底部宽约 1~4 km,海拔 300~500 m,东西两翼山体海拔 900~1100 m,高差为 400~800 m,坡度一般为 15~30°。本区属亚热带季风性湿润气候,年降水量为 1200 mm 左右,4—10 月降水充沛,其中 5—6 月、9—10 月为降水的集中期,年均气温为 14.6℃;植被以次生灌木、藤本、蕨类以及零稀的乔木为主,原生植被破坏殆尽;槽谷两侧地区土层较薄,发育土壤为黄色石灰土,顺倾坡裸岩出露率较逆倾坡高,坡麓岗地断续分布,多为土石质坡地,为正在耕种或弃耕的中低产旱地。本区人口密度较大,为 270 人/km²,陡坡开垦严重,水土流失严重,石漠化面积持续扩大。

2 研究方法

2.1 土壤水分与降雨量监测

本文监测点(108°57'E, 29°00'N)位于龙潭槽谷两侧顺、逆倾坡的坡面上,在逆倾坡选择两块典型的剖面作为逆倾坡的监测点,即图中的逆 1、逆 2;在顺倾坡选择两块典型的剖面作为顺倾坡的监测点,即图中的顺 1、顺 2。分别在逆 1、逆 2 土下 15 cm、30 cm 处安装了一个 AV-EC5 型土壤湿度传感器、一个 AV-10T 型土壤温度传感器,8 个传感器的信号统一汇集到附近的 RR1016 型数据采集器中(北京雨根科技有限公司);在顺 1、顺 2 处安装了一套与逆倾坡相同的土壤温度、湿度监测装置。顺、逆倾坡土壤温度传感器的量程为 -40℃~140℃,精度为读数的 ±0.1℃;土壤湿度传感器量程为 0~100%,精度

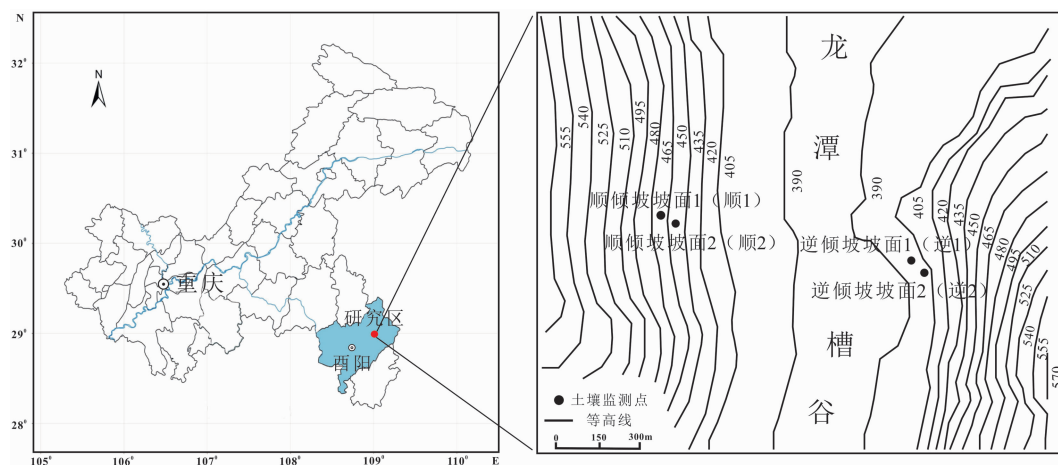


图 1 龙潭槽谷及土壤监测点位置图

Fig. 1 The Longtan Valley and soil monitoring sites, Chongqing, China

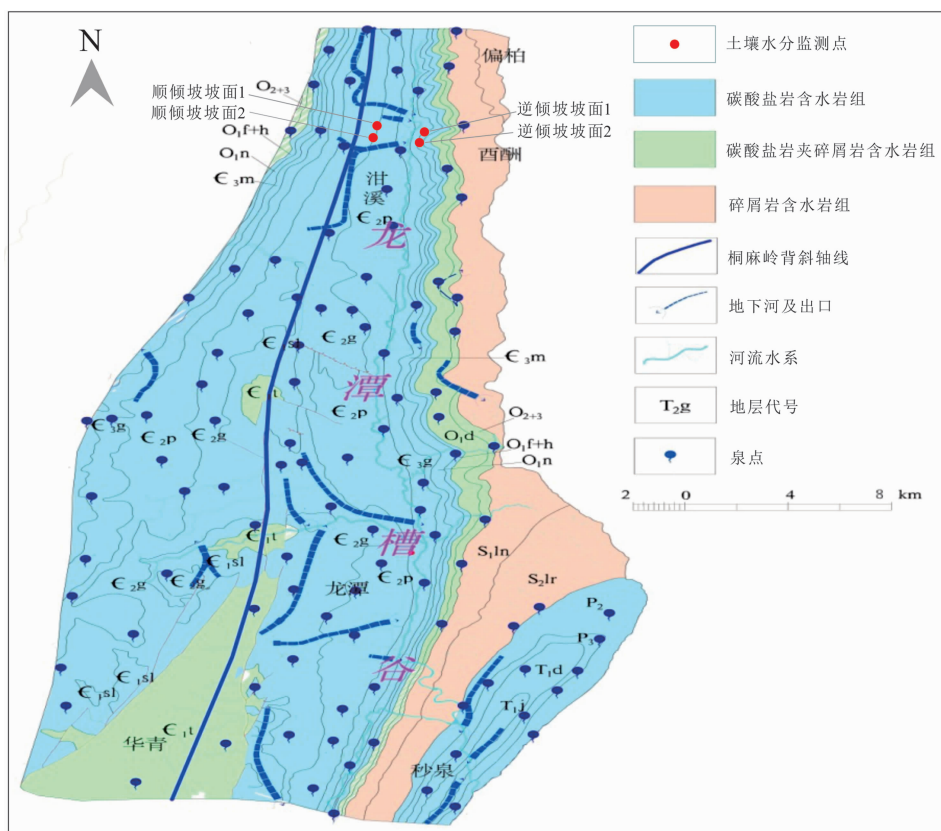


图2 龙潭槽谷水文地质图

Fig. 2 Hydrogeological map of the Longtan Valley, China

为读数的 $\pm 0.1\%$, 其单位为 cm^3/cm^3 (体积含水率)。同时, 在各层土壤水分监测点定期取原状土带回实验室, 立即测定各土层的含水率 (烘干法, $105\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘 10 h), 用于对体积含水量探头测量值的校正。4 个监测点中, 在逆 1、逆 2 土壤监测点坡面汇流区域内, 裸岩呈零星分布、裸岩出露率较低, 土壤剖面最大厚度分别约为 40 cm 、 60 cm ; 顺 1、顺 2 附近裸岩出露率较高, 在顺 1、顺 2 土壤监测点坡面汇流区域内, 裸岩出露区域长 120 m , 宽 32 m , 面积为 3840 m^2 ; 其中, 距离顺 1 土壤监测点西侧 0.5 m 处有一块长 1.2 m 、宽 0.6 m 、高 1.7 m 的裸岩出露, 距离顺 2 土壤监测点西侧 0.6 m 处有一块长 0.7 m 、宽 0.6 m 、高 1.2 m 的裸岩出露, 以及一些体积较小的裸岩出露, 土壤剖面最大厚度分别约为 40 cm 、 60 cm ; 逆 1 的坡度为 8° , 其余 3 块坡面坡度均为 0° 。降雨量采用美国 Onset 公司生产的 HOBO RG3-M 自计式雨量筒进行记录。所有仪器记录时间间隔均为 15 min 。

2.2 土壤理化性质

在不破坏实验用地情况下,用环刀在土壤监测

点 0 ~ 5 cm、15 ~ 20 cm、25 ~ 30 cm 处取原状土,带回实验室,用环刀法测土壤容重,并计算其土壤孔隙度;在相应土层另取原土 50 g,带回实验室,自然风干后磨碎,用比重计法测土壤机械组成、用油浴 - 重铬酸钾容量法测土壤有机质。样地土壤理化性质如表 1 所示。

3 结果与讨论

3.1 土壤水分含量的季节变化

由于研究区是亚热带季风性湿润气候,气温、降水在一年中分布不均,为探明不同土壤剖面在不同水热条件下土壤湿度的变化特征,本研究选取 2017 年 6 月—2018 年 11 月各月份土壤水分数据进行讨论,为排除降水的影响,所选时段前三天无降水事件。

从图3得知,土壤水分与降雨量的关系较大,与土温的关系较小。从平均值上看(所有坡面):多雨季节(4—10月)15 cm处的土壤水分约为30%,少雨季节(11月至次年4月)仅仅只有24%;多雨季

表 1 龙潭槽谷两侧监测点土壤剖面(0~30 cm)主要理化性质
Tab. 1 Properties of the soil profile (0~30 cm) in both sides of the Longtan Valley

坡向	监测点地貌部位	土壤剖面 /cm	有机质 /(g·kg ⁻¹)	容重 /(g·cm ⁻³)	总孔隙度 /%	土壤机械组成/%		
						粘粒	粉粒	砂粒
逆倾坡	逆 1	0~5	35.60	1.41	0.47	29.01	58.01	13.02
		15~20	26.41	1.34	0.50	31.03	57.02	12.01
		25~30	22.29	1.39	0.48	37.02	51.00	12.00
	逆 2	0~5	33.77	1.40	0.47	27.61	59.41	13.01
		15~20	28.76	1.33	0.50	29.80	59.21	11.03
		25~30	14.96	1.31	0.50	32.02	61.02	7.02
顺倾坡	顺 1	0~5	30.99	1.36	0.49	24.61	65.41	10.01
		15~20	28.79	1.30	0.22	25.61	63.42	11.02
		25~30	16.70	1.30	0.51	25.00	64.01	11.01
	顺 2	0~5	31.35	1.40	0.47	24.02	66.01	10.03
		15~20	27.29	1.32	0.50	27.61	63.40	9.02
		25~30	9.11	1.29	0.52	22.01	70.01	8.01

节 30 cm 处的土壤水分约为 33%,少雨季节约为 27%;少雨季节的土壤水分值明显低于多雨季节。从 2017 年 6 月—2018 年 11 月,在多雨和少雨季节中,15 cm、30 cm 土层处,顺 1、顺 2 的土壤水分值总体上均高于逆 1、逆 2,不过多雨季节较少雨季节明显;垂向上,各坡面的土壤水分均表现出随土层深度的增加而增加的趋势;在多雨季节,与其他坡面(15 cm、30 cm)相比,顺 1 处 15 cm、30 cm 的土壤水分值均为最高值,逆 1 的土壤水分值在 15 cm、30 cm 处均为最小值;土壤水分的空间变化规律在季节尺度上来看是一致的。通过观察发现,这主要与顺 1、顺 2 和逆 1、逆 2 裸岩出露差异导致其产、汇流机制不同有关,顺 1、顺 2 位于顺倾坡,顺倾坡山体坡向和岩层倾向一致,岩层对土壤的阻挡作用小,土壤易顺着岩层流失,导致顺倾坡裸岩出露率较高;而逆 1、逆 2 位于逆倾坡,山体坡向和岩层倾向相反,岩层对土壤起阻挡作用,土壤流失较少,裸岩出露率较低,因此在以上大的地质地貌环境的影响下,顺、逆倾坡的裸岩出露、土壤环境有较大的差异,从而引起顺、逆倾坡土壤水分的时空差异;顺 1 土壤监测点西侧紧邻着大量裸岩,降雨期间裸岩汇集雨水形成径流不断对顺 1 附近土壤进行补给,导致顺 1 表层土壤水分迅速增加。有研究表明,裸岩含大量节理能吸收和吸附部分降雨,且裸岩的截留汇流作用降低了地表径流速度^[20-21],降雨期间,雨水降落在裸岩上,降雨资源化程度较高。因此,在多雨季节,出露

裸岩改变降水的再分配,并汇集雨水补充周围地区的土壤水分^[22-23],这就导致在多雨季节顺 1、顺 2 的土壤水分含量明显地高于逆 1、逆 2。

3.2 降雨间歇期土壤水分动态变化

2017 年 7 月 1—7 日连续 7 个晴天内对不同坡面土壤水分连续动态监测,结果表明(图 4),随着晴天的延长,逆 1、逆 2 和顺 1、顺 2 土壤温度均呈缓慢上升的趋势、土壤水分呈逐渐减小的趋势,从表 2 得知,30 cm 土层处土壤水分与土温的相关性总体上较 15 cm 土层处强,顺、逆倾坡土壤水分与土温的相关系数差异较小。逆 1、逆 2 和顺 1、顺 2 的 15 cm 处失水量分别为 6%、3.2%、2.7%、7.5%,即顺 2>逆 1>逆 2>顺 1;逆 1、逆 2 和顺 1、顺 2 的 30 cm 处失水量分别为 3.2%、—、1.3%、0.7%,即逆 1>顺 1>顺 2(图 4)。4 种坡面中,总体上,顺 1、顺 2 失水量小于逆 1、逆 2(顺 2 监测点 15 cm 除外),土壤水分含量大于逆 1、逆 2;从图 4 得知,顺 1、顺 2 15 cm、30 cm 的土温均高于逆 1、逆 2,说明在降雨间歇期,裸岩对土壤有加热效应,如果只考虑裸岩加热效应的影响,顺 1、顺 2 土壤水分应该低于逆 1、逆 2;但实际上,顺 1、顺 2 土壤水分含量高于逆 1、逆 2,说明土壤水分含量受裸岩加热效应的影响小,受其他因素的影响大;通过观察发现,逆 1 15 cm 和 30 cm 失水量较大,主要与其坡面坡度较大导致其保水能力弱有关。顺 1、顺 2 失水量较低,主要是因为顺 1、顺 2 地势平坦,保水能力强;但顺 2 的 15 cm 处失水

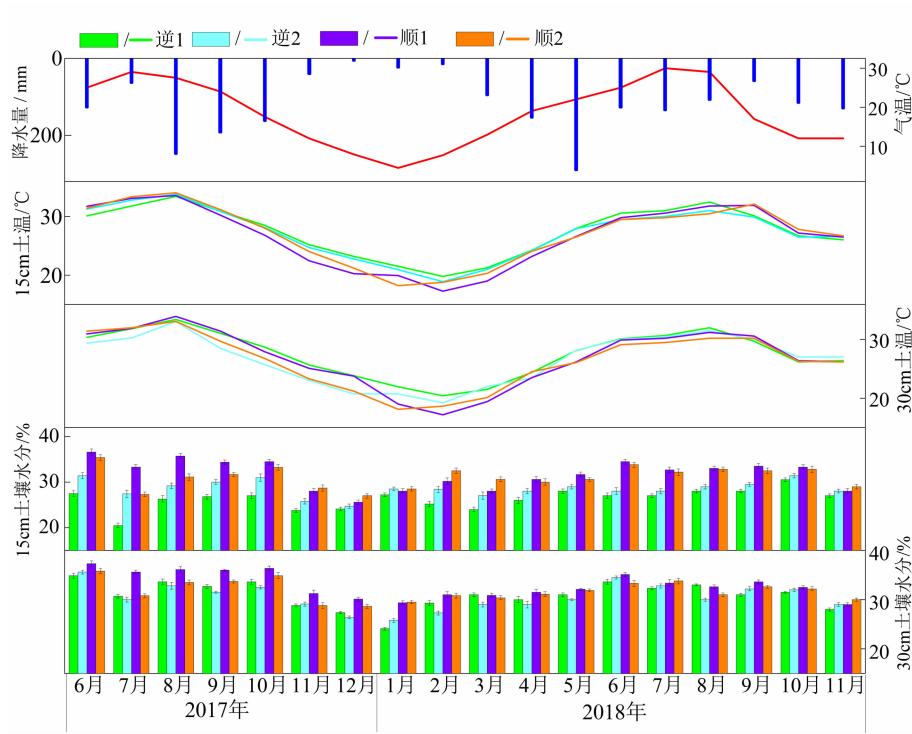


图 3 降水量、气温、土温、土壤水分的季节变化

Fig. 3 Seasonal change in precipitation, temperature, soil temperature and soil moisture

表 2 降雨间歇期土壤水分与土壤温度的相关分析

Tab. 2 Correlationship of soil moisture and temperature

土层 深度	逆 1			逆 2			顺 1			顺 2		
	回归方程	R^2	P	回归方程	R^2	P	回归方程	R^2	P	回归方程	R^2	P
15 cm	$y = -0.16x + 36$	0.22	-0.47	$y = -0.27x + 40$	0.17	-0.42	$y = -0.22x + 42$	0.07	-0.27	$y = -1.27x + 73$	0.19	-0.44
30 cm	$y = -0.5x + 47$	0.57	-0.76	—	—	—	$y = -0.47x + 50$	0.65	-0.81	$y = -0.06x + 38$	0.03	-0.17

注：“—”表示数据丢失

量大,从表 1 可知,这主要受到土壤质地的影响,该处粘粒含量较少,保水能力较弱^[24-27]。4 块坡面中,15 cm 失水量均高于 30 cm,15 cm 处各坡面土壤水分的空间差异较 30 cm 大,这主要是受土温差异引起的蒸发量差异的影响,15 cm 土温较 30 cm 高,且各坡面 15 cm 土温的空间差异较 30 cm 大,造成 15 cm 的失水量和空间差异较 30 cm 大,30 cm 较 15 cm 处土壤水分含量稳定^[28],土壤水分的空间变异性随土层深度的增加而减小。因此,在降雨间歇期,裸岩对土壤有加热效应,但裸岩加热效应对土壤水分含量的影响并不明显,各坡面土壤水分受坡面坡度和土壤质地的影响较大。

3.3 降雨期间土壤水分动态变化

从图 5 可知,在 2017 年 7 月 7—9 日的降雨期

间,土壤水分随降雨的开始而迅速上升,土壤水分含量在 0 ~ 30 cm 范围内随土层深度的增加而增加^[29-31],15 cm、30 cm 处土壤水分几乎随降雨的开始同时上升,说明 30 cm 处有优先流补给;RIES 等^[32]研究发现,强降雨后,土岩界面比表层土壤先达到饱和状态,但在本研究中该现象并不明显。2017 年 7 月 7—9 日,15 cm 处,逆 1、逆 2 和顺 1、顺 2 的最大补给量分别为 14.1%、11.1%、5.9%、9.9%,即逆 1 > 逆 2 > 顺 2 > 顺 1;30 cm 处,逆 1、逆 2 和顺 1、顺 2 的最大补给量分别为 12.9%、—、7.3%、5.2%,即逆 1 > 顺 1 > 顺 2;15 cm 处,逆 1、逆 2 和顺 1、顺 2 的平均值分别为 22.8%、28.6%、35.2%、30.9%,即顺 1 > 顺 2 > 逆 2 > 逆 1;30 cm 处,逆 1、逆 2 和顺 1、顺 2 的平均值分别为

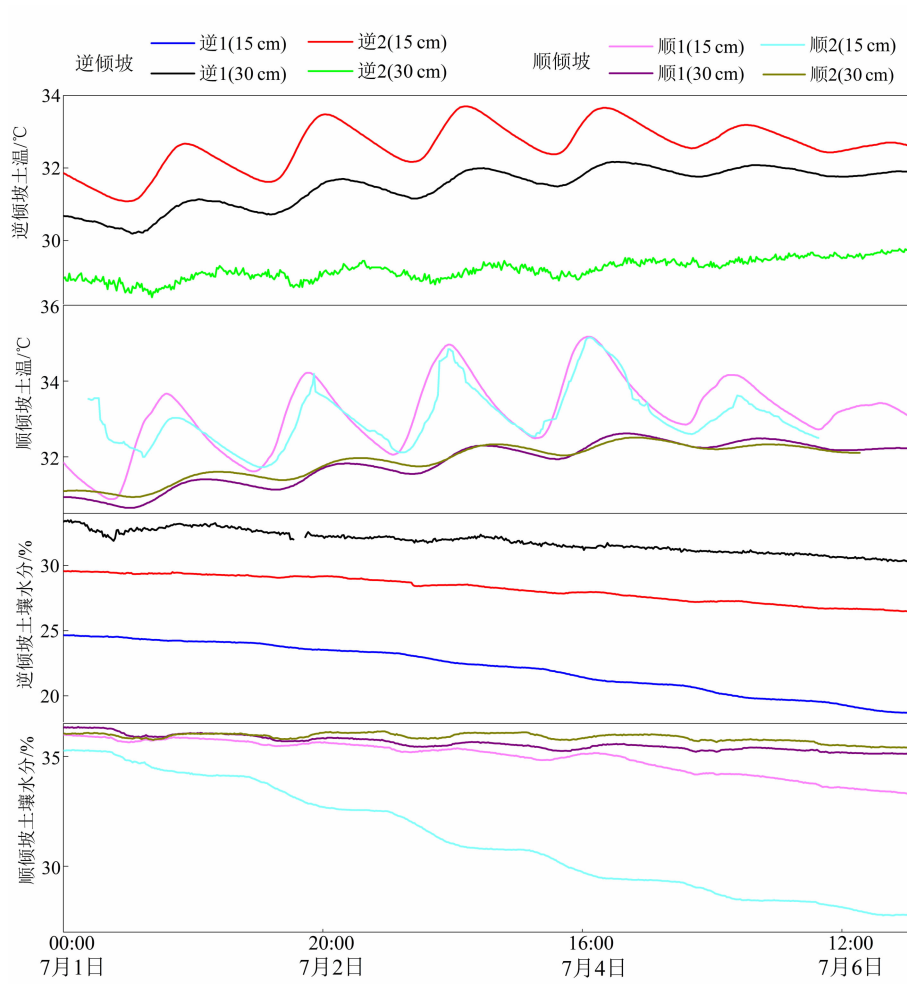


图4 降雨间歇期各坡面土壤水分的变化

Fig. 4 Change in the soil moisture of each flat land on continuous sunny days

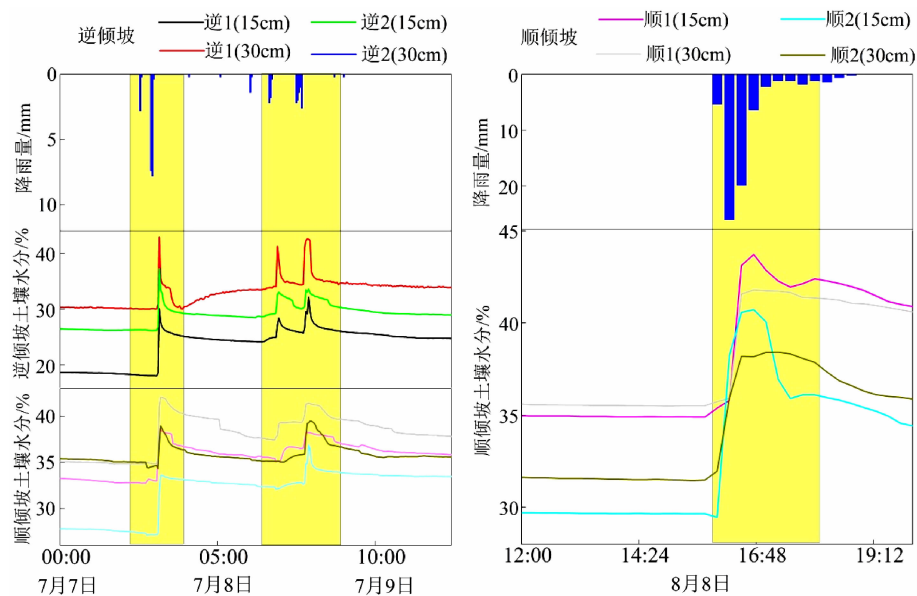


图5 土壤水分对7月7—9日、8月8日降雨期间的响应过程

Fig. 5 Response processes of soil moisture to heavy rainfall events in July 7–9 and August 8

32.4%、—、37.7%、35.7%，即顺1>顺2>逆1；以上表明，逆1、逆2的最大补给量较顺1、顺2大，但逆1、逆2的土壤水分值较顺1、顺2小，说明，降雨期间，土壤水分值的大小不仅取决于当时降雨对其的最大补给量，还受前期土壤含水量和土壤持水能力大小的影响。顺1、顺2的前期土壤含水量较逆1、逆2大，因此，当强降雨到来，顺1、顺2处土壤水分最大补给量虽然较逆1、逆2小，但实际顺1、顺2土壤水分含量较逆1、逆2大。

2017年8月8日的集中强降雨共历时大约1 h，总降雨量为55.6 mm，在此次强降雨下，顺1、顺2的15 cm处土壤水分含量迅速升高并高于30 cm处土壤水分含量，出现表层土壤水分高于底层的现象。对集中强降雨期(2017年8月8日16:00—17:00)，顺1、顺2 15 cm、30 cm处土壤水分含量取平均值发现，顺1、顺2的15 cm处土壤水分含量相比30 cm高2%，说明强降雨下，在0~30 cm范围内，土壤水分随土层深度的增加而降低。通过分析得知，这主要与超渗产流机制下，槽谷两侧快速出现地表径流，不利于雨水的下渗有关。另外，从图5可看出，顺2土壤水分随土层深度的增加而降低的现象在强降雨结束后迅速结束，而顺1则在强降雨结束后继续持续了一段时间。通过观察发现，这主要与顺1附近的大量裸岩有关，降雨期间，裸岩汇聚大量雨水形成径流对顺1进行补充^[13]。因此，以上特征反映出，降雨期间，土壤水分的高低不仅取决于土壤水的最大补给量，还受前期土壤含水量、土壤持水能力的影响；无降雨或降雨强度较小，裸岩附近的土壤水分随土层深度的增加而增加，但在高强度降雨下，受裸岩汇聚雨水的补给，会出现表层土壤水分高于底层土壤水分的现象。

4 结论

(1)季节尺度上，顺倾坡在多雨和少雨季节的土壤水分值均高于逆倾坡；且多雨季节比少雨季节明显，这主要与顺、逆倾坡裸岩出露差异导致其产、汇流机制不同有关；在多雨季节，裸岩影响降雨的再分配，顺倾坡可得到双重补给，即：降雨补给、裸岩地表径流补给。

(2)降雨间歇期，随晴天日数的延长，顺、逆倾坡土壤水分均呈逐渐减小的趋势；裸岩较多的顺倾

坡的失水量总体上没有裸岩较少的逆倾坡失水量多，表明裸岩加热效应对土壤水分的影响较小，而坡面坡度和土壤质地对土壤水分的影响较大。

(3)降雨期间，当降雨强度较小时，土壤水分随土层深度的增加而增加；但当降雨强度较大时，顺倾坡出现表层土壤水分大于底层土壤水分的现象，这主要与强降雨引起的坡面超渗产流有关。

(4)受龙潭槽谷顺、逆倾坡空间差异的影响，龙潭槽谷两侧裸岩出露率、土层厚度、土壤有机质等自然要素差别明显，这对该区土壤水分的时空变化有重要影响，在石漠化治理过程中应采取不同的保水保土措施。

致谢：感谢西南大学地理科学学院吕玉香博士提供的龙潭槽谷水文地质图，感谢西南大学地理科学学院刘九缠、何志立、田宁、梁沙在采样和实验方面提供的帮助，同时感谢重庆市酉阳县泔溪镇泉孔村田景宏先生在采样期间的帮助。

参考文献(References)

- [1] ZHANG J Y, DAI M H, WANG L C, et al. The challenge and future of rocky desertification control in karst areas in Southwest China [J]. *Solid Earth Discussions*, 2016, **7**(4): 3271–3292.
- [2] LIAN Y, YOU J Y, LIN K, et al. Characteristics of climate change in Southwest China karst region and their potential environmental impacts [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **74**(2): 937–944.
- [3] 李安定, 卢永飞, 韦小丽, 等. 花江喀斯特峡谷地区不同坡面土壤水分的动态研究[J]. *中国岩溶*, 2008, **27**(1): 56–62 [LI Anding, LU Yongfei, WEI Xiaoli, et al. Studies on the regime of soil moisture under different microhabitats in Huajiang karst valley [J]. *Carsologica Sinica*, 2008, **27**(1): 56–62]
- [4] 何永涛, 李文华, 李贵才, 等. 黄土高原地区森林植被生态需水研究[J]. *环境科学*, 2004, **25**(3): 35–39 [HE Yongtao, LI Wenhua, LI Guicai, et al. Ecological water requirement of forests in Loess Plateau [J]. *Environmental Science*, 2004, **25**(3): 35–39]
- [5] 程星, 於芳. 喀斯特土壤水分变化研究[J]. *地球与环境*, 2005, **33**(s1): 139–143 [CHENG Xin, YU Fang. The studies of soil moisture change in the karst area [J]. *Earth and Environment*, 2005, **33**(s1): 139–143]
- [6] 袁道先. 西南岩溶石山地区重大环境地质问题及对策研究[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 12–15 [YUAN Daoxian. A study of significant environmental geological problems in Southwest karst areas in China [M]. Beijing: Science Press, 2014: 12–15]
- [7] THOMAS D, JOHANNES K, DAVID K, et al. Impacts of management and climate change on nitrate leaching in a forested karst area [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, **165**(2): 243.

- [8] 张川, 张伟, 陈洪松, 等. 喀斯特典型坡地旱季表层土壤水分时空变异性[J]. 生态学报, 2015, **35**(19): 6326 – 6334 [ZHANG Chuan, ZHANG Wei, CHEN Hongsong, et al. Temporal and spatial variation in surface soil moisture content of karst slopes in the dry season [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(19): 6326 – 6334]
- [9] 张继光, 陈洪松, 苏以荣, 等. 喀斯特山区洼地表层土壤水分的时空变异[J]. 生态学报, 2008, **28**(12): 6334 – 6343 [ZHANG Jiguang, CHEN Hongsong, SU Yirong, et al. Spatial and temporal variability of surface soil moisture in the depression area of karst hilly region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, **28**(12): 6334 – 6343]
- [10] CANTON Y, RODRIGUEZCABALLERO E, CONTRERAS S, et al. Vertical and lateral soil moisture patterns on a Mediterranean karst hillslope [J]. Journal of Hydrology & Hydromechanics, 2016, **64**(3): 209 – 217.
- [11] LI S, BIRK S, XUE L, et al. Seasonal changes in the soil moisture distribution around bare rock outcrops within a karst rocky desertification area (Fuyuan County, Yunnan Province, China) [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, **75**(23): 1482 – 1492.
- [12] SOHRT J, RIES F, SAUTER M, et al. Significance of preferential flow at the rock soil interface in a semi-arid karst environment [J]. Catena, 2014, **123**(7): 1 – 10.
- [13] WANG D J, SHEN Y X, HUANG J, et al. Rock outcrops redistribute water to nearby soil patches in karst landscapes [J]. Environmental Science & Pollution Research International, 2016, **23**(9): 8610 – 8616.
- [14] 贾金田, 付智勇, 陈洪松, 等. 喀斯特坡地基岩起伏对土壤剖面水分格局的影响[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(6): 1708 – 1714 [JIA Jintian, FU Zhiyong, CHEN Hongsong, et al. Effect of irregular bedrock topography on the soil profile pattern of water content in a Karsthillslope [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, **27**(6): 1708 – 1714]
- [15] 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 [YAN Mengmeng, ZHOU Zhou, WANG Ji, et al. Study on the dynamic change of soil moisture in karst area: A case of Huaxi district in Guiyang City [J]. Carsologica Sinica, 2016, **35**(4): 446 – 452]
- [16] 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 [GUO Xiaojiao, GONG Xiaoping, TANG Qingjia, et al. The response processes of moisture at soil profile to precipitation in typical karst hillslope [J]. Carsologica Sinica, 2016, **35**(6): 629 – 638]
- [17] 蒋勇军, 刘秀明, 何师意, 等. 喀斯特槽谷区土地石漠化与综合治理技术研发[J]. 生态学报, 2016, **36**(22): 7092 – 7097 [JIANG Yongjun, LIU Xiuming, HE Shiyi, et al. Research and development of comprehensive rehabilitation measures for land rocky desertification in karst trough valley area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(22): 7092 – 7097]
- [18] HEATHMAN G C, LAROSE M, COSH M H, et al. Surface and profile soil moisture spatio-temporal analysis during an excessive rainfall period in the Southern Great Plains [J]. Catena, 2009, **78**(2): 159 – 169.
- [19] JASPER K, CALANCA P, FUHRER J. Changes in summertime soil water patterns in complex terrain due to climatic change [J]. Journal of Hydrology, 2006, **327**(3–4): 550 – 563.
- [20] 王济, 蔡雄飞, 雷丽, 等. 不同裸岩率下我国西南喀斯特山区土壤侵蚀的室内模拟[J]. 中国岩溶, 2010, **29**(1): 1 – 5 [WANG Ji, CAI Xiongfei, LEI Li, et al. Laboratory simulation on soil erosion under different bedrock outcrop rate in Southwest karst area, China [J]. Carsologica Sinica, 2010, **29**(1): 1 – 5]
- [21] KHEIR R B, ABDALLH C, KHAWLIE M. Assessing soil erosion in Mediterranean karst landscapes of Lebanon using remote sensing and GIS [J]. Engineering Geology, 2008, **99**(3–4): 239 – 254.
- [22] 冯天骄, 卫伟, 陈利顶, 等. 黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性[J]. 环境科学, 2017, **38**(9): 3860 – 3870 [FENG Tianjiao, WEI Wei, CHEN Liding, et al. Comparison of soil hydraulic characteristics under the conditions of long term land preparation and natural slope in long tan Catchment of the Loess hilly region [J]. Environmental Science, 2017, **38**(9): 3860 – 3870]
- [23] LI S, REN H D, XUE L, et al. Influence of bare rocks on surrounding soil moisture in the karst rocky desertification regions under drought conditions [J]. Catena, 2014, **116**(3): 157 – 162.
- [24] MEERVELD T V, MCDONNELL J J. On the interrelations between topography, soil depth, soil moisture, transpiration rates and species distribution at the hillslope scale [J]. Advances in Water Resources, 2006, **29**(2): 293 – 310.
- [25] 张继光, 苏以荣, 陈洪松, 等. 桂西北喀斯特区域土壤水分动态变化研究[J]. 水土保持通报, 2007, **27**(5): 32 – 36 [ZHANG Jiguang, SU Yirong, CHEN Hongsong, et al. Dynamic change of soil moisture in karst region of Northwest Guangxi province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, **27**(5): 32 – 36]
- [26] 耿增超, 戴伟. 土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 64 – 72 [GENG Zengchao, DAI Wei. Pedology [M]. Beijing: Science Press, 2011: 64 – 72]
- [27] ENGLISH N B, WELTZIN J F, FRAVOLINI A, et al. The influence of soil texture and vegetation on soil moisture under rainout shelters in a semi-desert grassland [J]. Journal of Arid Environments, 2005, **63**(1): 324 – 343.
- [28] JAWSON S D, NIEMANN J D. Spatial patterns from EOF analysis of soil moisture at a large scale and their dependence on soil, land-use, and topographic properties [J]. Advances in Water Resources, 2007, **30**(3): 366 – 381.
- [29] 张志才, 陈喜, 石朋, 等. 贵州喀斯特峰丛山体土壤水分分布特征及其影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2008, **17**(5): 803 – 807 [ZHANG Zhicai, CHEN Xi, SHI Peng, et al.

- Influences of rock on soil moisture distribution in the karst cluster-peach mountains [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, **17**(5): 803–807]
- [30] 张笑楠, 王克林, 张伟, 等. 桂西北喀斯特峰丛洼地坡面土地利用对土壤水分的影响[J]. *土壤通报*, 2009, **40**(6): 1250–1254 [ZHANG Xiaonan, WANG Kelin, ZHANG Wei, et al. Effect of land use on soil moisture on hillslope in karst peak-cluster depression areas of Northwest Guangxi [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, **40**(6): 1250–1254]
- [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. [ZHANG Chuan, CHEN Hongsong, NIE Yunpeng, et al. Dynamics of soil profile water content in peak-cluster depression areas in karst region [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, **21**(10): 1225–1232]
- [32] RIES F, LANGE J, SCHMIDT S, et al. Recharge estimation and soil moisture dynamics in a Mediterranean, semi-arid karst region [J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2015, **19**(3): 1439–1456.

Comparison of the Soil Moisture Variations of Inclined Slope in Longtan Karst Trough Valley, Chongqing, China

YOU Xianhui^{1,2}, YANG Yan^{1,2*}, XU Gang^{1,2}, ZOU Xiaogang^{1,2}, ZENG Zhuzhou³

(1. *Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China*; 2. *Field Scientific Observation & Research Base of Karst Eco-environments at Nanchuan in Chongqing, Ministry of Land and Resources of China, Chongqing 408435, China*; 3. *Harmo Trust Agriculture Development Co., Ltd, Chongqing 409800, China*)

Abstract: Soil and water conservation is the key to controlling rock desertification. Understanding the pattern of changes in soil moisture in rocky desertification areas plays an important role in rock desertification control. In this study, a high-resolution positioning for the dynamic monitoring of soil moisture and temperature was applied to four slope lands with 15 and 30 cm depths. This research was conducted from June 2017 to November 2018 in sloping and reversed slopes on both sides of Longtan karst trough valley (typical rock desertification control area), Youyang, Chongqing City. Results showed the following: (1) On a seasonal scale, soil moisture was closely related to rainfall, and slightly associated with soil temperature. The soil moisture levels of sloping slope were higher than those of reversed slope, and this phenomenon was more evident on rainy season than on less rainy season. On rainy season, rock outcrops affected the redistribution of rainfall. The sloping slope obtained double replenishment, that is, rainfall recharge and runoff recharge of the bare rock surface. (2) On continuous sunny days, the soil moisture loss of sloping slope was lower than that of reversed slope. This occurrence was mainly related to the difference between slope and soil texture. (3) At a low rainfall intensity, the soil moisture increased with the soil depth. At a high rainfall intensity, the soil moisture of the sloping slope at the surface (15 cm) was greater than that in the deep layer (30 cm). This phenomenon was mainly associated with the slope ultra-fluidity mechanism. (4) Influenced by the spatial difference in the Longtan trough valley, natural elements, such as rock outcrops, soil thickness, and soil organic matter, on both sides of the valley evidently differed. Moreover, the spatial difference has an important influence on the spatial and temporal changes of soil moisture. Thus, different water and soil conservation measures should be implemented in rock desertification control.

Key words: rocky desertification; karst trough valley; sloping slope and reversed slope; soil moisture; Youyang, Chongqing City