

# 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

曾锐<sup>1,2</sup>, 张陶<sup>1</sup>, 蒲俊兵<sup>1</sup>, 李建鸿<sup>1</sup>, 王赛男<sup>1,2</sup>, 陈金珂<sup>1,2</sup>

(1.中国地质科学院 岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004;

2.重庆市岩溶环境学重点实验室, 西南大学 地理科学学院, 重庆 400715)

**摘要:**云南蒙自岩溶断陷盆地作为典型的石漠化地区,对其土壤水文过程及其影响因素的揭示是土壤保护和植被恢复的必要条件。通过在盆地、坡面、高原面设置高分辨率长期监测站,探讨云南蒙自岩溶断陷盆地不同地貌部位不同深度土壤水分的时空动态及其影响因素。结果显示:(1) 研究区土壤水分含量的空间分布有两大趋势,一是随着海拔升高而增加,二是随着土层深度增加而降低;(2) 土壤含水量雨季高于旱季,但土壤水变异程度的年内季节差异较小,属于弱变异及中等程度变异,表明研究区土壤水分的年内波动较为和缓,对植被的生长恢复有利。(3) 盆地土壤水受前期土壤水分条件影响,在全年的变异程度强于坡面及高原面。同时受土壤质地及孔隙度等影响,盆地及高原面的下层土壤水分变异低于上层土壤。(4) 各监测点土壤水分含量变化与降水变化的一致性较高,说明降水是影响该区土壤水分含量变化的重要因素,但由于土壤质地、植被、裸岩等因素的差异,盆地与降水之间的一致性要优于坡面及高原面。总之,云南蒙自岩溶断陷盆地不同地貌部位的土壤水分在土壤质地、植被及降水环境的综合影响下具有显著且规律的时空变化,这将有助于指导盆地的植被复建以及水资源调配工作,为岩溶断陷盆地的石漠化治理提供依据。

**关键词:**土壤水; 时空异质性; 土壤质地; 降水; 植被; 裸岩

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)01-0050-08

## Spatiotemporal Dynamics of Soil Water and Its Influencing Factors Along Transect of Landform in Karst Graben Basin, Southwestern China

ZENG Rui<sup>1,2</sup>, ZHANG Tao<sup>1</sup>, PU Junbing<sup>1</sup>, LI Jianhong<sup>1</sup>, WANG Sainan<sup>1,2</sup>, CHEN Jinke<sup>1,2</sup>

(1.Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi 541004, China; 2.Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, School of Geography Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** The hydrological process of soil moisture and its influence factors are the limitation for soil protection and vegetation restoration in the typical rocky desertification area. To explore the dynamic distribution and its influence factors of soil moisture in different slope positions and different depths, high-resolution and long-term monitoring stations were set up in basin, transitional slope, and mountainous area of the Mengzi karst basin in Yunnan Province. The results show that: (1) two major trends in the spatial distribution of soil moisture include that soil moisture increases with the elevation and decreases with the depth of the soil layer; (2) the soil moisture of the fault depression basin in the wet season is much higher than that in the dry season, but the seasonal difference of soil moisture variation is little and changes from weak to moderate variability, which is beneficial to the growth of vegetation; (3) with respect to spatial pattern, the soil moisture variation degree in the basin is higher than that of the slope and mountainous area in the whole year because the initial soil moisture condition; additionally, the soil moisture variation of lower subsoil in the basin and the mountainous area is lower than that in the upper soil due to the soil texture and porosity; (4) the soil moisture changes with precipitation in the three monitoring points, which indicates that precipitation is an important factor affecting soil water variation, and this homogeneity between soil water and precipitation in the basin is better than that of the slope and mountainous area due to soil texture, vegetation

收稿日期:2020-07-03

修回日期:2020-09-23

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502501);广西自然科学基金资助项目(2017GXNSFFA198006)

第一作者:曾锐(1995—),女,四川泸州人,硕士研究生,研究方向:岩溶环境与全球变化。E-mail:15228720535@163.com

通信作者:张陶(1989—),男,河北石家庄人,助理研究员,博士,研究方向:岩溶环境、岩溶水文地球化学等。E-mail:zhangtao@karst.ac.cn

and bare rock. The soil moisture exhibits significant and regular spatiotemporal variations and is controlled by the combined influence of soil texture, vegetation and precipitation environment in the Mengzi karst graben basin, Yunnan, which will play the important roles in improving the vegetation restoration and water resources management, and provide the basic data for the control of rocky desertification in karst depression basins.

**Keywords:** soil water; spatiotemporal heterogeneity; soil texture; precipitation; vegetation; bare rock

土壤水是陆地水文循环中必不可少的组成部分,它不仅是大气、地下、地表、植物相互联系的纽带<sup>[1-2]</sup>,也是土壤—植物—空气系统中物质和能量传输的驱动因素。在地形、气候、土壤性质和植被等复杂的环境因素影响下,表现出复杂的时空动态。研究土壤水的时空动态是生态、水文和环境研究的前提,有利于水土保持、土壤养分和水管理以及生态恢复<sup>[1,3]</sup>。岩溶石漠化地区所具有的土壤覆盖不连续,土层薄,持水能力较低的特点是植物生长、土壤保持和水分平衡的主要限制因素<sup>[4-8]</sup>。因此,了解不同时空尺度下土壤水的动态及其控制因素是管理土壤水资源和控制土壤侵蚀及石漠化的必要条件<sup>[5-6]</sup>。

当前关于岩溶地区的研究大多都集中在土壤水动态方面,认为土壤水是岩溶生态系统的主要限制因素<sup>[5]</sup>。岩溶区土壤水受地形、气候、土壤性质、植被覆盖和岩石碎片的影响<sup>[4,9-13]</sup>,通常表现出较高的时空异质性。对地中海岩溶丘陵区 3 个坡地土壤水的连续监测发现,土壤水的空间变化主要受土壤性质和地表覆盖差异性的影响<sup>[10]</sup>。而在意大利中部地中海半湿润气候下的一项土壤水研究表明,地形在土壤水分空间变化中发挥重要作用<sup>[9]</sup>。Hasselquist 等则认为植被类型和冠层覆盖可以通过蒸腾、降水再分配、截留和土壤渗透对土壤水分动态产生影响<sup>[14]</sup>。陈洪松等<sup>[4]</sup>通过对岩溶峰丛地区不同土地用途下 0—10 cm 深度土壤水的时间动态观测,指出土壤水在天然灌丛中较高,在经济林地中较低,表明不同的植物覆盖也会对土壤水含量造成影响。同时,岩溶洼地土壤水的时间动态主要受降水和土地利用的影响<sup>[13]</sup>,且浅层土壤水的时空动态具有均匀和稳定的特征<sup>[12]</sup>。此外,岩石裂隙也控制土壤水分分布、运动和入渗。这主要是由于岩石裂隙对降水具有收集功能,即水分在岩石—土壤界面的择优流动,导致降水入渗的增加<sup>[15-18]</sup>。另外,也有研究发现贵州和广西岩溶洼地土壤含水量与土层深度呈正相关关系<sup>[19-20]</sup>。综上,由于影响因素复杂,岩溶区土壤水总是具有显著时空差异性的。

我国西南地区是世界岩溶分布最为典型的地区之一,生态环境脆弱而特殊<sup>[6,21]</sup>。自 20 世纪以来,由于西南地区人类活动愈发强烈且不合理,水土流失和森林砍伐严重<sup>[6]</sup>,岩溶石漠化成为西南地区最严重的

生态问题之一。为控制水土流失和生态退化,自 20 世纪 90 年代末以来,中央和地方政府一直在实施大规模的退耕还林工程和岩溶石漠化修复工程<sup>[6]</sup>。

云南省裸露碳酸盐岩面积为 9.34 万 km<sup>2</sup>,2016 年石岩溶沙化面积为 2.35 万 km<sup>2</sup>,面临着严重的生态恢复任务<sup>[22]</sup>。作为云南省东部岩溶高原上最为主要的岩溶地貌类型,岩溶断陷盆地的石漠化主要发生在岩溶高原以及由盆地到高原的过渡山坡上<sup>[23]</sup>,岩溶石漠化治理任务艰巨。因此了解盆地—坡面—高原山区不同位置的土壤水动态,揭示其时空特征和控制因素,有利于生态恢复的实施。本研究选择在盆地、坡地和高原山区 3 个地貌部位布设高分辨率长期监测点探讨不同地貌部位土壤水的动态变化规律。目的是(1) 探讨岩溶断陷盆地土壤水的时空动态及影响因素;(2) 了解西南岩溶断陷盆地横向地形过渡带在土壤水时空动态中发挥的作用,对合理处理当地石漠化防治中的水土关系具有科学意义。

## 1 研究区概况及研究方法

### 1.1 研究区概况

蒙自岩溶断陷盆地位于云南东南部(图 1),覆盖蒙自、开远两市,是新生代高原隆升引起的断陷差异及侵蚀和溶蚀共同作用形成的山间盆地<sup>[24]</sup>。总体上,蒙自岩溶断陷盆地的地形可分为 3 类:山地岩溶区(高原面)、平坦岩溶盆地(盆地)和过渡带(坡面)<sup>[25]</sup>。蒙自断陷盆地大致呈南北走向,盆地(平均海拔 1 250 m)和高原面(平均海拔 2 200 m)的海拔差异明显<sup>[25-26]</sup>。盆地区多为第三系、第四系沉积物(以黏土,泥灰岩和泥岩为主),沉积厚度大(100~800 m),而裸露的碳酸盐岩主要分布在山坡和岩溶高原,总面积约 950 km<sup>2</sup>。岩溶高原是一个典型的岩溶地区,呈现溶丘—洼地地貌,多石林,岩溶山丘,落水洞等地貌。但是,由于强烈的水土流失和广泛暴露的可溶性岩石,岩溶石漠化程度严重。

蒙自岩溶断陷盆地整体属于亚热带季风气候,年平均降水在 832 mm 左右,年均气温为 19.5℃,降水多集中在 6—9 月,占全年降水量的 70%。主要有 5 种土地利用类型:林地、草地、耕地、水体和建设用地(城镇和其他城市化地区),在高原面上主要的土地利用类型为草地和耕地<sup>[25]</sup>。根据该地区的水文地质调

查,盆地和高原没有地表溪流<sup>[26]</sup>。区内坡面、裸岩面汇集的雨水多数通过石沟、石缝和岩土界面快速进入岩溶含水层,使得该地区多呈干旱缺水状态,且雨水为土壤水的唯一补给来源。

## 1.2 研究方法

1.2.1 样点设置及数据选择 为了更好地了解蒙自岩溶断陷盆地不同位置土壤水的特征,本研究选择盆地—坡面—岩溶高原剖面沿线的 3 个监测点,对土壤含

水量和气象参数进行长期定点监测(图 1)。3 个监测点分别是:盆地大洼子站(103°23'47"E,23°28'22"N,海拔 1 363 m,后文简称盆地),为撂荒地,多茅草和桉树;坡面朵古村站(103°26'13"E,23°27'43"N,海拔 1 846 m,后文简称坡面),为果园地,植被多为应季农作物和苹果树;高原山区牛耳坡站(103°27'09"E,23°27'08"N,海拔 2 086 m,后文简称高原面),位于苹果园中。这 3 个地点都位于蒙自岩溶断陷盆地的岩溶石漠化地区。

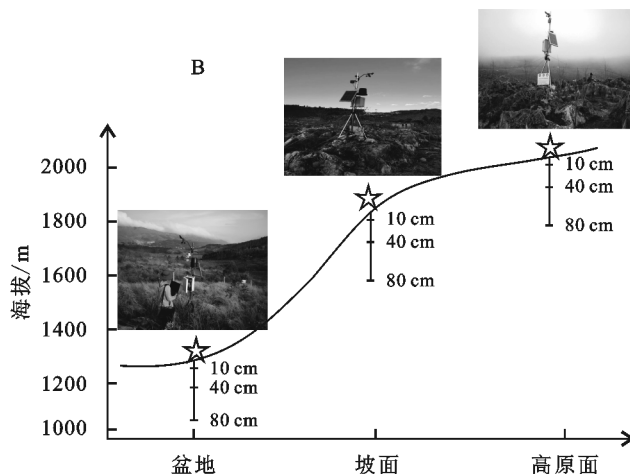
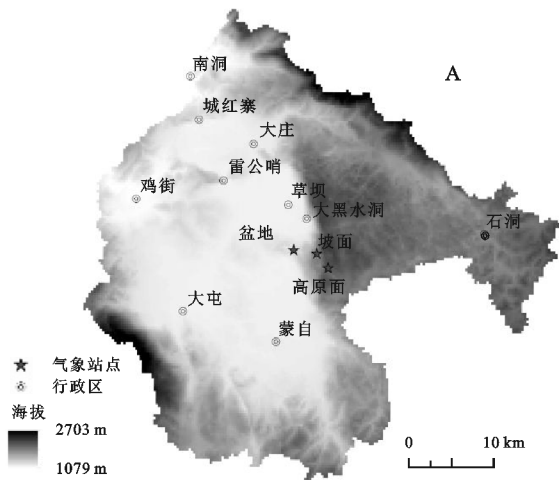


图 1 研究区位置(A)以及监测点分布(B)

在 3 个监测点处利用 Campbell 公司的 CR800 自动气象站收集气象数据,每 30 min 记录一次气温、湿度、降水等气象数据,分辨率分别为 0.02℃,0.1%,0.2 mm。对于土壤含水量数据的采集,则是在气象数据采集器上搭接 MT-5 型号土壤水分、温度传感器,根据监测点周围土壤垂直分布情况,设计 MT-5 传感器埋深分别为 10 cm,40 cm 和 80 cm,30 min 记录一次数据。按监测得到的数据情况,选择 2017 年 7 月到 2019 年 12 月的气象和土壤水分含量数据作为分析基础。在设置采样点的同时,采集每个监测点土壤表层样品,用于测量表层土壤粒径分配、孔隙度、饱和电导率以及土壤容重。

1.2.2 数据分析方法 通过 Microsoft Excel 2010 对 2017 年 7 月至 2019 年 12 月 30 min 间隔的气象和土壤水分数据进行处理,以获得每日数据集。以逐日气象数据作为基础,进行下列分析:首先采用时间序列方法<sup>[27]</sup>,即选用典型降水事件中降水与不同监测点各土层土壤含水量之间的协方差相关系数( $d_{xy}$ )来描述降水与土壤含水量之间的相关性,计算公式如下:

$$d_{xy} = \frac{|S_{xy}(h)|}{\sqrt{S_{xx}S_{yy}}} = \frac{|S_{xy}(h)|}{e_x e_y} \quad (1)$$

式中: $h$  为降水后过去的天数, $h=0,1,2,3,\dots,n$ ;  $d_{xy}$  为滞后  $h$  天时降水与土壤含水量之间的协方差相关系数; $S_{xx}$ ,  $S_{yy}$  分别降水和土壤含水量的方差; $e_{xx}$ ,

$e_{yy}$  分别是降水和土壤含水量的标准差; $S_{xy}(h)$  是滞后时间  $h$  天时降水和土壤含水量的协方差,它的计算公式如下:

$$S_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-h} (x_i - \bar{x})(y_i + h - \bar{y}) \quad (2)$$

式中: $n$  是观测数据的数目,本文  $n=31$ ,表示一个月逐日土壤含水量与降水数据。 $x_i, y_i$  分别是滞后时间为  $h$  天时的降水与土壤含水量数据; $\bar{x}, \bar{y}$  分别为降水和土壤含水量在月时间段内的平均值。由于研究区小降水事件(5~10 mm/d)的频率很高,在一年内主导了降水事件<sup>[23]</sup>,很难通过入渗改变整个土壤中的土壤含水量,也很难捕捉土壤水对降水事件的响应,且以往的许多研究发现,当岩溶地区的降水强度为中等或重度时,土壤水对降水变化有明显的响应<sup>[11,13,28]</sup>。因此,本研究选择 2017 年 8 月初在 3 个监测点发生的降水事件(>30 mm/d),分析其土壤含水量和降水的协方差相关系数( $d_{xy}$ )。

此外,由于安装在监测点的仪器在 2018 年进行过维护,为避免维护仪器这一人类行为对土壤含水量产生的影响,特选取 2019 年整年内逐日的降水与各坡位不同深度土壤水分数据在 Origin 2017 中进行绘图分析,以得到最接近自然状态下的土壤水分时间动态变化。再利用 Microsoft Excel 2010 对 2019 年整年的土壤水分数据进行数学分析,得到旱雨季不同地貌部位不同深度土层的最大土壤水分含量、最小土壤水分含量、平均土壤水



分含量、标准差、变异系数等指标,并基于这些指标,对不同深度土层进行划分,得到研究区土壤水分的空间动态变化。最后结合土壤属性、监测点地形以及气候因素,探讨影响本区土壤水分的时空动态因素。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤物理属性

在盆地的土壤黏粒含量和容重显著高于坡面和高原面( $p<0.05$ ),而盆地的饱和电导率、粉土颗粒含量和土壤孔隙度显著低于坡面和高原面( $p<0.05$ )。土壤砂粒含量在高原面较高,坡面较低,表现出不同的空间差异。根据表 1 所示的土壤粒径特征和图 2<sup>[29]</sup>中 USDA 土壤质地三角形的分布,蒙自岩溶断陷盆地 3 个监测点的土壤质地可分为两组,高原面和坡面的土壤属于粉质黏壤土,而盆地的土壤属于粉质黏土。

表 1 各监测点表层土壤属性数据

地点	土壤容重/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	孔隙度/ %	黏粒 含量/%	粉粒 含量/%	砂粒 含量/%	饱和电导率/ ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )
盆地	1.30	50.77	45.4	38.9	15.7	16.9
坡面	1.15	56.53	28.8	58.3	12.9	31.32
高原面	1.02	61.68	28.6	54.7	16.7	83.2

### 2.2 土壤含水量的时间动态

如上所述,雨水是蒙自岩溶断陷盆地土壤水的唯一来源。亚热带季风气候控制着蒙自岩溶断陷盆地的降水分布,表现出明显的雨季(6—9 月)和旱季(10 月—次年 5 月)。3 个监测地点的土壤含水量在雨季较高,旱季较低(表 3),与季节性降水变化相吻合(图

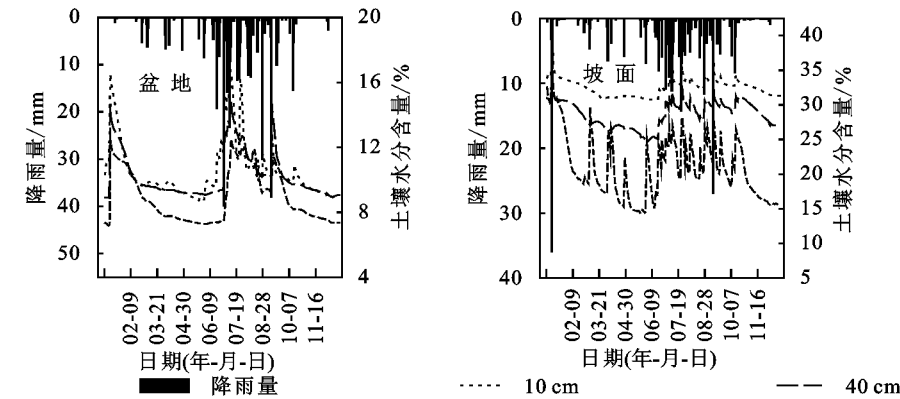


图 3 各监测点不同土层土壤湿度在 2019 年 1 月至 2019 年 12 月的时间变化

### 2.3 土壤含水量的空间动态

在研究期间,通过比较各监测点土壤含水量的平均值和最大最小值,可以发现盆地各土层深度的土壤含水量远低于坡面和高原面的土壤含水量( $p<0.05$ ),反映了盆地和岩溶山区之间的巨大空间对比,以及土壤含水量随岩溶盆地海拔高度的增加而增加的趋势(图 4)。从土壤的平均含水量来看,盆地和坡面的土壤含水量是随土层的加深而不断减少,高原面则表现出倒“V”型,在 40 cm 土层处表现出较高的水分含量。

3)。此外,3 个地点不同深度的土壤含水量曲线随雨季降水的发生而呈现出较大且频繁的波动,而旱季波动较小且不明显。这表明土壤含水量对蒙自岩溶断陷盆地岩溶高原到盆地的季节性降水变化有积极的响应。曲线波动可以直观地显示土壤含水量对外界降水变化的响应程度。一般情况下,雨季盆地 3 个深度的土层在降水事件后,其土壤含水量随降水变动而产生的变化快速而明显(图 3),这意味着盆地土壤水在降水事件下比坡面和高原面更敏感。这也表明蒙自岩溶断陷盆地的盆地—坡面—山区剖面沿线的土壤含水量具有明显的空间异质性。

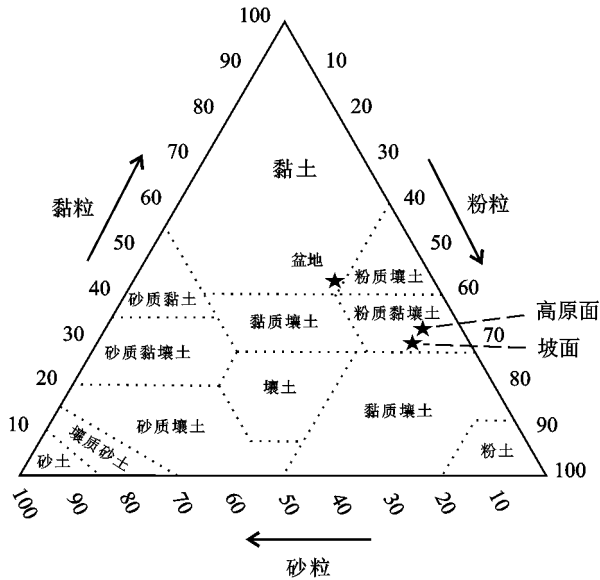
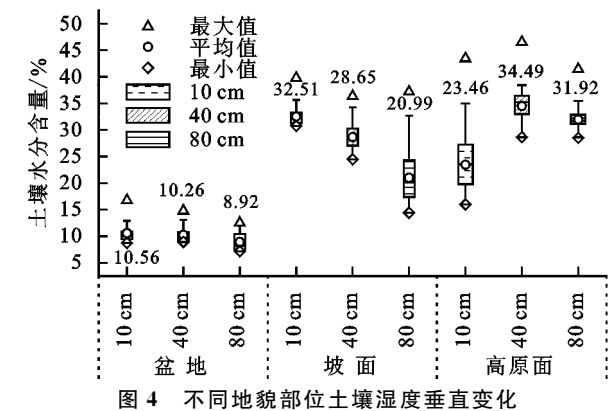


图 2 研究区土壤质地图

表 2 显示了各监测点不同土层在 2019 年全年的土壤含水量分析结果。总体来看,全年各监测点不同深度土层的变异系数值大致处于 3%~25%,属于弱变异( $1\%<CV<10\%$ )和中等程度变异( $10\%<CV<100\%$ )<sup>[4]</sup>。其中,盆地各土层、坡面 80 cm 深度土层及高原面 10 cm 深度土层的土壤含水量变化程度均属于中等程度变异,而坡面 10 cm,40 cm 深度、高原面 40 cm,80 cm 深度的土层属于弱变异。同时,根据表 2 中的标准偏差(SD)和变异系数(CV)值可

知,高原面和盆地的土壤含水量基本上表现出随着土层深度的加深而不断减小的现象,而坡面则是随着土层深度的加深变化逐渐增大。



从表 3 中可以看出,就土壤含水量平均值而言,3 个监测点的同一土层在雨季的土壤含水量均高于旱季(除高原面 80 cm 深度土层外)。此外,盆地各土层及高原面 80 cm 深度土层的变异系数表现出雨季大于旱季的特点,说明雨季的大量降水对这些土层的影响较大。而在坡面各土层及高原面 10 cm,40 cm 土

层的变异系数却大致表现出旱季稍大于雨季的特点,表明这些土层的土壤含水量在旱季的波动较雨季更为剧烈。最后,从整体的变异情况来看,旱季不同地貌部位各土层的变异系数均处于弱变异和中等程度变异,相互之间差距较小,而雨季各监测点不同土层的变异情况相差较大,特别是在高原面的 80 cm 深度土层甚至存在强变异( $CV>100\%$ ),说明在整个雨季本区土壤受降水影响土壤含水量变化较大,各土层之间差距也较大。

表 2 不同地貌部位各土层土壤湿度在 2019 年的统计特征

地点	土层深度/cm	平均值/ %	最大值/ %	最小值/ %	标准差/ %	变异 系数/%
盆地	10	10.57	16.26	8.71	1.79	16.93
	40	10.26	14.78	8.91	1.42	13.84
	80	8.92	12.51	7.19	1.6	17.94
坡面	10	32.51	39.78	30.75	1.28	3.94
	40	28.65	36.34	24.46	1.93	6.74
	80	20.99	37.16	14.42	4.55	21.68
高原面	10	23.46	43.45	15.96	4.32	18.41
	40	34.49	46.51	28.63	2.74	7.94
	80	31.95	41.42	28.50	1.65	5.16

表 3 不同地貌部位各土层旱雨季土壤湿度统计特征

地点	土层深度/cm	雨季					旱季				
		平均值/ %	最大值/ %	最小值/ %	标准差/ %	变异 系数/%	平均值/ %	最大值/ %	最小值/ %	标准差/ %	变异 系数/%
盆地	10	11.57	16.26	9.2	1.92	16.59	10.02	16.54	8.71	1.46	14.57
	40	11.14	14.78	9.07	1.59	14.27	9.8	14.7	8.91	1.08	11.02
	80	9.87	12.51	7.29	1.7	17.22	8.43	12.42	7.19	1.31	15.54
坡面	10	32.89	37.19	30.25	1.18	3.59	32.31	39.78	30.79	1.29	3.99
	40	29.06	34.28	24.46	1.97	6.78	28.44	36.34	24.67	1.87	6.58
	80	22.41	28.24	15.18	2.9	12.94	20.25	37.16	14.42	5.05	24.94
高原面	10	25.79	35.00	16.19	3.63	14.08	22.24	43.45	15.96	4.15	18.66
	40	34.57	42.56	28.63	2.61	7.55	34.45	46.51	28.63	2.81	8.16
	80	31.64	41.42	28.50	1.96	119.51	32.10	36.76	28.67	1.44	4.49

根据 Chen<sup>[4]</sup>、Yang<sup>[11]</sup> 等对于土壤分层的研究,结合本区实际,我们将具有不同标准偏差和变异系数的土层分为 4 种层次:相对稳定层( $CV\leq 10\%$ ,  $SD\leq 2\%$ );亚活跃层( $10\%<CV\leq 20\%$ ,  $2\%<SD\leq 3\%$ );活跃层( $20\%<CV\leq 30\%$ ,  $3\%<SD\leq 4\%$ );快速变化层( $CV>30\%$ ,  $SD>4\%$ )。因此,盆地各深度的土壤水分变化在雨季和旱季属于亚活跃层,坡面和高原面的 10 cm 和 40 cm 深度则属于相对稳定层。坡面 80 cm 深度的土壤水分变化在雨季属于亚活性层,在旱季属于活跃层。高原面 80 cm 深度的土壤水分变化在雨季属于快速变化层,旱季为相对稳定层。

### 3 讨论

#### 3.1 土壤含水量与降水的一致性分析

降水是研究区土壤水分的唯一来源。本研究选择了一个集中降水期(2017 年 8 月),讨论了土壤水分动态

与降水事件的相关性。由方程(1)和(2)得到的不同深度土壤水与同一时期降水之间的协方差相关系数( $d_{xy}$ )表明,土壤水与强降水之间存在很强的相关性,特别是在强降水发生后的 1~2 d,表明蒙自岩溶断陷盆地中的土壤水对强降水补给反应迅速,滞后时间为 0~3 d(图 5)。但是降水对于各监测点及不同深度土层的含水量影响存在差异。盆地各土层的  $d_{xy}$  变化与降水变化较为一致,其中 80 cm 土层变化幅度略大于 40 cm 及 10 cm 土层;坡面和高原面各土层的  $d_{xy}$  虽然随着同期降水变化而变化,但其一致性均低于盆地,这主要是受到土质的影响<sup>[4]</sup>。其次,从不同深度土层来看,坡面、盆地各深度土层的  $d_{xy}$  变化幅度最大是 80 cm 土层,而高原面 80 cm 深度土层  $d_{xy}$  的变化幅度却远远低于 40 cm,10 cm 土层的变化幅度。高原面的这一现象或许是植被根系截留下渗土壤水的表现<sup>[22]</sup>。研究区高

原面监测点位于苹果园中,苹果树根根系长 35~55 cm,一般情况下,在根系作用下中上层土壤有效截留下渗的土壤水,导致深部土层接收的雨水较少,导致底部土层的土壤含水量变化较小,降低了它与降水之间的一致性。此外,3 个监测点的 10 cm 和 40 cm 深度的  $d_{xy}$  曲线相似,呈同步变化,表明 10 cm 和 40 cm 深度的土壤水对降水输入具有较强的敏感性。

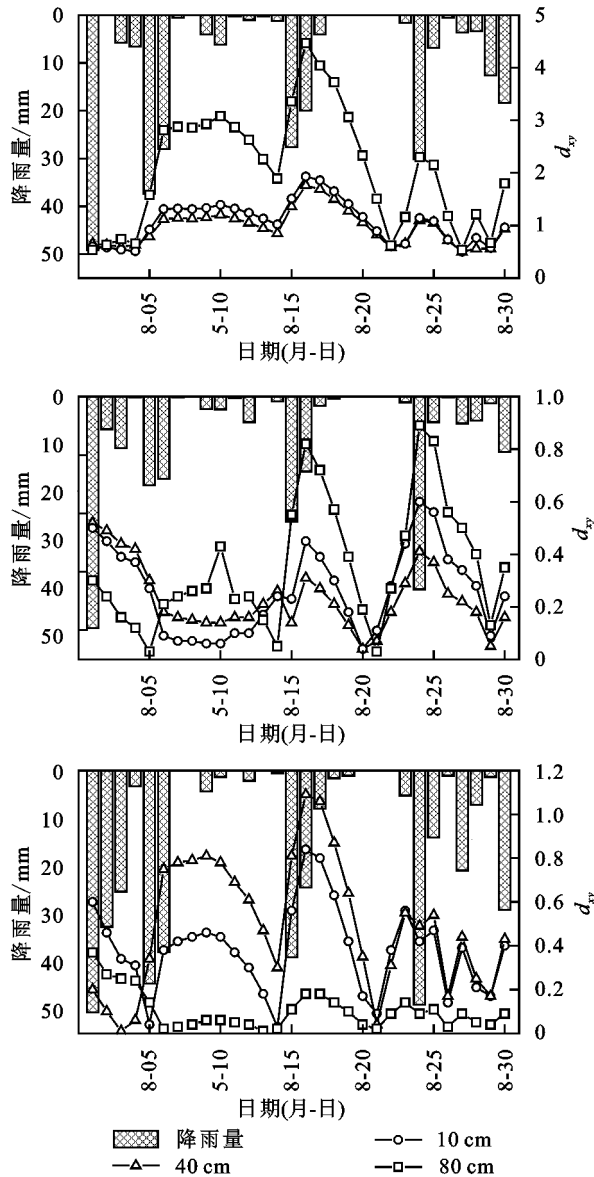


图 5 各监测点不同土层土壤湿度与同期降水的协相关关系

### 3.2 土壤含水量的空间异质性

**3.2.1 土壤质地** 研究区对于降水的响应敏感而迅速且作为该区土壤水补给的唯一来源,土壤的持水能力分析是讨论其空间变化的基础。而土壤的持水能力则取决于土壤质地<sup>[29]</sup>呈现为黏土>壤土>砂土的特点。Singhl 等在美国的研究也表明,黏质壤土的持水能力最高,砂质壤土的持水能力最低<sup>[30]</sup>。在本研究区,与坡面及高原面的粉质壤土不同,盆地的土壤主要为黏粒含量较高的黏土(图 2)。因此,土壤下渗

的水分相对坡面及高原面较少,在同等气候条件下,坡面及高原面会接收到更多的水分,从而导致研究区土壤含水量大致是随海拔升高而不断增加。

**3.2.2 蒸散发** 各气象因子对本区域土壤水分的空间变化起着重要作用;降水是研究区土壤水分的唯一来源,蒸散则一般是土壤除供应植被生长所需之外最为主要的消耗方式<sup>[31]</sup>,不同地貌部位能够持有的土壤含水量应该是降水与蒸散的差值。蒙自岩溶断陷盆地在 2019 年其盆地的年降水量多于坡面降水,但其蒸散发量却是 3 个地点之最,达到了 1 287 mm(图 6)。此数值不仅远大于同期坡面及高原面的蒸散,甚至是盆地年降水量的 3 倍,这也使得盆地土壤中的水分含量远小于坡面及高原面。

**3.2.3 植被与裸岩** 就植被类型及其覆盖度来看,盆地监测点处为自然生长的草地,茅草生长茂密,覆盖度极高;坡面处主要为耕地,受人类活动影响较大,其上植被主要为农作物,覆盖度次之;高原面监测点位于果园之中,苹果树种植密集但枝干稀疏,其下岩石裸露,覆盖度最小。一般来说,植被的覆盖度与其对降水的拦截力度呈正相关关系<sup>[32]</sup>。依据观测点植被覆盖度,不考虑土壤质地、蒸散发力度等因素,在同等降水环境下,高原面土壤中能够蓄集的水分应大于盆地,这也正好与实际相符合,表明研究区土壤水的空间变化在一定程度上受到植被覆盖度的影响。

另外,就同一监测点来说,本研究区大致表现为土层底部含水量低于上部。除高原面中层土壤有密集的苹果树根拦截水分,从而保持较高的含水量之外,坡面及盆地的土壤含水量大致随着土层深度的加深而降低。这一现象主要是由 3 个监测点所处的裸岩环境导致的。土壤入渗以及储存的水分多少要考虑所种植的植物以及土壤中碎石含量的影响<sup>[4]</sup>。盆地监测点处有根系较浅的茅草覆盖,使得表土层大量存储水分,提高盆地表土层的含水量。而坡面及高原面均散布大量裸岩,一般说来,裸露石块对降水有汇集作用<sup>[15-18]</sup>。当降水发生时,由于坡面及高原面存在的大量裸露岩石而出现汇水作用,增加了表层土壤的含水量,从而导致土壤含水量随土层深度的加深而减小。

### 3.3 土壤含水量变异程度

本研究区各监测点及其不同深度土层的土壤水分变异在时间尺度上大致属于弱变异及中等变异,即使降水环境不同,其变异程度也大多维持在中等变异及其以下的范围。这表明蒙自岩溶断陷盆地土壤水虽具有复杂的时空异质性,但其变化程度却相对稳定。同时,本研究区的盆地各土层的变异程度均属于中等变异,而坡面及高原面的大部分土层变异程度是远小于盆地的弱变异。这或许是土壤前期水分条件



不同所造成的。盆地各土层的土壤水分条件较之高原面及坡面一直处于较低的水平,更易接受雨水补给,改变自身的含水量,使得变异程度增高。而坡面及高原面的土壤水分一直维持在较高的水平,土壤中水分条件较为饱和,在相对湿润条件下,土壤受雨水补给而增加的水量较小,使得变异程度较低<sup>[32]</sup>。另

外,盆地、高原各土层的变异程度是随着土层的加深而不断缩小,这是由于土壤中的黏粒含量会影响土壤的变异性,一般来说,黏粒含量越多,变异程度越小<sup>[11]</sup>,而研究区土壤黏粒含量是随着土层的加深而增加<sup>[33]</sup>,使深层土层通透性变差并于较长时间内维持相同的状态,从而降低土壤水分的变化情况。

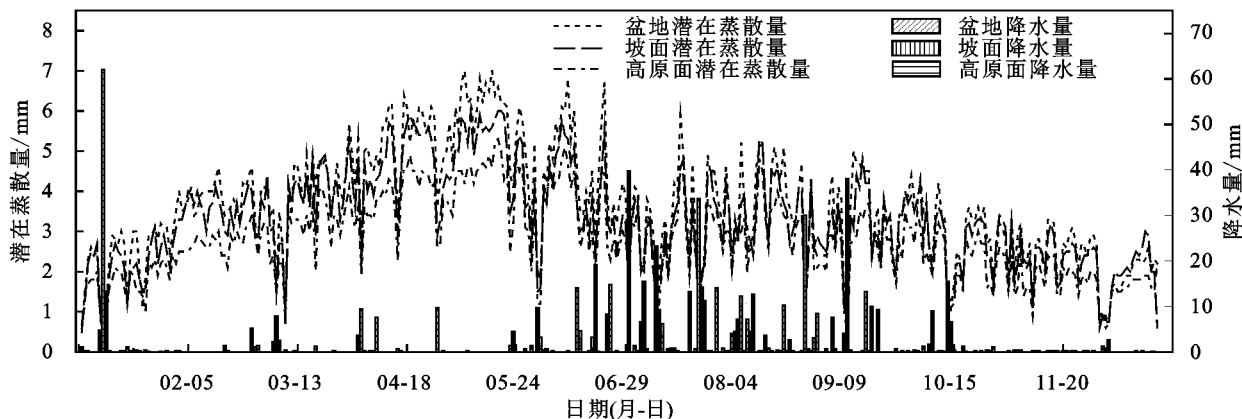


图 6 2019 年 3 个监测点全年蒸散量及同期降水量

与盆地及高原面不同土层变异系数分布规律相反,坡面各土层变异系数是下层土壤变异高于上层土壤。由于坡面监测点土层中分布有较多岩石,岩石所具有的较高汇水性能在增加上部土层含水量的同时,也减少了侧渗,导致坡面土壤中优先流的发生,因此底部土层变异系数较大。尽管高原面土壤中也有大量裸岩分布,但此类裸岩引起的优先流并未对高原面深部土层的土壤水分产生较大影响,这要归功于高原面土层中密集分布植物根系的拦截作用。

此外,研究区监测点大部分土层变异程度的季节性差异不大,均属于中等变异或者弱变异。但高原面底部 80 cm 土层却截然不同。该土层在雨季属于强变异程度(CV 值为 119%),旱季则属于中等变异(CV 值为 24%),两者相差较大。产生这一现象的原因或许是由于高原面独特的降水环境所导致。高原面全年降水离散程度较大[盆地(79.49%)>高原面(64.14%)>坡面(63.40%)],且降水天次相对盆地及坡面较多,全年达到 154 次,最大次降水达到 62 mm。再加之高原面土壤不同于盆地土壤的粉质壤土,土壤孔隙度较大,同时土壤中遍布的裸岩也增强了雨水的下渗,即使有密集苹果树根拦截下渗水分,但当降水量过大特别是雨季,树根所拦截的水量于总量而言微乎其微,且高原面上部土层一直处于饱和水分状况,多余的水分便会随着孔隙快速进入深部土层,使深部土层的含水量在原有基础上大幅度增加,在土层上被划分为快速变化层。

## 4 结论

云南蒙自岩溶断陷盆地 3 个监测点的土壤含水

量雨季高于旱季,但监测点不同深度土层的土壤水分季节变化较小。有趣的是,高原面 80 cm 土层由于降水环境及土壤质地的综合作用却表现出显著的季节变化。同时,研究区土壤水分变化受到降雨的影响而与降水变化呈现出高度的一致性。此外,由于土壤质地以及植被等因素,盆地与降水之间的一致性要优于坡面及高原面。总体而言,研究区土壤水分时空变化属于弱—中等变异水平,其空间变化趋势主要分为两种:一为随海拔升高而增加;二是随土层深度加深而降低。但从时间尺度来看,受前期土壤水分条件的影响,盆地土壤水在时间尺度上的变异程度高于坡面及高原面;这一系列结果有助于更清楚地认识蒙自岩溶断陷盆地土壤水在土壤质地、植被及降水环境等的综合影响下所表现出的时空分布规律,为断陷盆地植被复建及耕作灌溉用水提供参考依据。

### 参考文献:

- [1] Sprenger M, Leistert H, Gimbel K, et al. Illuminating hydrological processes at the soil-vegetation-atmosphere interface with water stable isotopes[J]. Reviews of Geophysics, 2016, 54: 674-704.
- [2] Reichardt K, Timm L C. Water Infiltration into the Soil [M]. Soil, Plant and Atmosphere, 2020: 217-240.
- [3] Evett S R, Schwartz R C, Casanova J J, et al. Soil water sensing for water balance, ET and WUE[J]. Agricultural Water Management, 2012, 104: 1-9.
- [4] Chen Hongsong, Zhang Wei, Wang Kelin, et al. Soil moisture dynamics under different land uses on karst hillslope in northwest Guangxi, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 61: 1105-1111.
- [5] Deng Yuanhong, Wang Shijie, Bai Xiaoyong, et al. Spa-

- tiotemporal dynamics of soil moisture in the karst areas of China based on reanalysis and observations data[J]. *Journal of Hydrology*, 2020,585:124744.( <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124744>)
- [6] Jiang Zhongcheng, Lian Yanqing, Qin Xiaoqun. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014,132: 1-12.
- [7] Wang S J, Liu Q M, Zhang D F. Karst rocky desertification in southwestern China: geomorphology, landuse, impact and rehabilitation [J]. *Land Degradation & Development*, 2004,15:115-121.
- [8] Yang Jing, Chen Hongsong, Nie Yunpeng, et al. Spatial variability of shallow soil moisture and its stable isotope values on a karst hillslope[J]. *Geoderma*, 2016, 264:61-70.
- [9] Brocca L, Morbidelli R, Melone F, et al. Soil moisture spatial variability in experimental areas of central Italy [J]. *Journal of Hydrology*, 2007,333:356-373.
- [10] Canton Y, Rodriguez-Caballero E, Contreras S, et al. Vertical and lateral soil moisture patterns on a Mediterranean karst hillslope[J]. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2016,64:209-217.
- [11] Yang Jing, ChenHongsong, NieYunpeng, et al. Dynamic variations in profile soil water on karst hillslopes in Southwest China[J]. *Catena*, 2019,172:655-663.
- [12] Zhao Zhimeng, Shen Youxin, Jiang Ruohan, et al. The temporal stability of soil moisture spatial pattern and its influencing factors in rocky environments[J]. *Catena*, 2020,187:104418.(<https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104418>)
- [13] Li Xuezhang, Xu Xianli, Liu Wen, et al. Revealing the scale-specific influence of meteorological controls on soil water content in a karst depression using wavelet coherency[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019,279:89-99.
- [14] Hasselquist N J, Benegas L, Rounsard O, et al. Canopy cover effects on local soil water dynamics in a tropical agroforestry system: Evaporation drives soil water isotopic enrichment[J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32:994-1004.
- [15] Li Sheng, Ren Huadong, Xue Liang, et al. Influence of bare rocks on surrounding soil moisture in the karst rocky desertification regions under drought conditions [J]. *Catena*, 2014,116:157-162.
- [16] Sohr J, Ries F, Sauter M, et al. Significance of preferential flow at the rock soil interface in a semi-arid karst environment[J]. *Catena*, 2014,123:1-10.
- [17] ShenYouxin, Wang Dianjie, Chen Qiaoqiao, et al. Large heterogeneity of water and nutrient supply derived from runoff of nearby rock outcrops in karst eco-systems in SW China[J]. *Catena*, 2019,172:125-131.
- [18] Zhao Zhimeng, Shen Youxin, Jiang Ruohan, et al. Rock outcrops change infiltrability and water flow behavior in a karst soil[J]. *Vadose Zone Journal*, 2020, 19(1):1-15.
- [19] Li Xue-zhang, Xu Xianli, Liu Wen, et al. Similarity of the temporal pattern of soil moisture across soil profile in karst catchments of southwestern China[J]. *Journal of Hydrology*, 2017,555:659-669.
- [20] Li Xue-zhang, Xu Xianli, Liu Wen, et al. Prediction of profile soil moisture for one land use using measurements at a soil depth of other land uses in a karst depression[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018,19:1479-1489.
- [21] Sweeting M M. The Karsts of Yunnan, Karst in China: Its Geomorphology and Environment [M]. Hongkong: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1995.
- [22] 国家林业和草原管理局.中国岩溶石漠化状况公报[R].北京:国家林业和草原管理局,2018.
- [23] 王赛男,蒲俊兵,李建鸿,等.岩溶断陷盆地“盆—山”耦合地形影响下的气候特征及其对石漠化生态恢复的影响探讨[J].*中国岩溶*,2019,38(1):50-59.
- [24] 王宇,张华,张贵,等.喀斯特断陷盆地环境地质分区及功能[J].*中国岩溶*,2017,36(3):283-295.
- [25] Li Jianhong, Pu Junbing, Zhang Tao, et al. Measurable sediment discharge from a karst underground river in southwestern China: temporal variabilities and controlling factors [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020,79(4):90.1-90.18.(<https://doi.org/10.1007/s12665-020-8826-7>)
- [26] 中国地质调查局.南洞地下河流域水文地质综合调查成果报告[R].广西桂林:中国地质科学院岩溶地质研究所,2016.
- [27] 傅伟,王洪林,陈洪松,等.典型峰丛洼地坡面土壤水分动态变化的时序分析[J].*水土保持学报*,2005,19(4): 111-114.
- [28] Yan Youjin, Dai Quanhong, Yuan Yingfei, et al. Effects of rainfall intensity on runoff and sediment yields on bare slopes in a karst area, SW China[J]. *Geoderma*, 2018, 330:30-40.
- [29] 黄昌勇,徐建明.土壤学[M].北京:中国农业出版社, 2010.
- [30] Singh J S, Lauenroth D G M K. Soil water dynamics and vegetation patterns in a semiarid grassland [J]. *Plant Ecology*, 1998,134(1):77-89.
- [31] 何其华,何永华,包维凯.干旱半干旱区土壤水分动态变化[J].*山地学报*,2003,21(2):149-156.
- [32] Biao Z, Wenhua L, Gaodi X, et al. Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its value[J]. *Ecological Economics*, 2010,69(7):1416-1426.
- [33] 段兴武,洪欢.云南土壤地理[M].北京:科学出版社, 2019:26-28.