

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.  
DOI: 10. 11932/karst20180201

## 典型岩溶峰丛洼地坡面土壤水分空间变异性

李春茂<sup>1,3</sup>, 陈洪松<sup>2,4</sup>, 徐勤学<sup>1,2</sup>, 吴攀<sup>1,3</sup>, 付智勇<sup>2,4</sup>

(1. 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;

2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125;

3. 桂林理工大学广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541004;

4. 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:**采用网格法测量典型坡面上旱季(12月)和雨季(5月)的表层(0~5 cm)土壤含水量,以地统计学方法分析其空间变异性,结果表明:(1)与单一土地利用坡面相比,人为扰动强、土地利用多样的岩溶峰丛坡地表层土壤含水量表现为坡上未被扰动的自然植被区明显高于坡下人为改造的区域;旱季时坡地林地表层土壤平均含水量(32.8%)明显高于位于坡下的梯田空闲地(24.2%)、梯田橘园(20.0%)、梯田菜园(22.0%)、坡地裸地(23.5%);雨季时,坡地裸地(30.2%)和梯田橘园(32.1%)有明显增大,梯田空闲地(17.8%)剧烈减小,坡地林地(32.2%)土壤含水量依然最高;(2)旱、雨季整个坡面上空间结构比分别为21.0%、8.7%,表现为雨季的空间相关性更好;旱、雨季表层土壤含水量变异系数分别为20.1%和31.7%,属中等程度变异;雨季表层土壤含水量的变程(77.5 m)显著高于旱季(8.0 m),雨季的土壤含水量具有较好的空间变异结构;(3)裸岩周围空间的土壤含水量随与裸岩的距离增大而减小,梯田石坎周围空间的土壤含水量随与梯田石坎的距离增大而递减。

**关键词:**峰丛洼地;坡面;土壤含水量;空间变异性;土地利用

**中图分类号:** S152.7      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-4810(2018)02-0159-09

### 0 引言

土壤水分是影响坡面水文过程和植被生长的重要因素,土壤水分的空间异质性对坡面水文过程和植被生长也具有显著影响<sup>[1]</sup>。岩溶峰丛洼地作为中国西南岩溶地区的典型地貌,分布面积广,石漠化和水土流失严重<sup>[2-3]</sup>。此外,岩溶峰丛洼地降水虽丰沛,但由于地表地下二元空间结构、土壤总量少、储水能力低以及岩石渗漏性强等原因,水分亏缺仍然是植被恢复与重建的主要障碍因子<sup>[4-5]</sup>。因此,开展岩溶峰丛洼地坡面表层土壤含水量空间变异性的研究,对岩溶峰丛洼地坡地的合理利用与植被恢复有重要意义。

当前,相关研究多集中在岩溶峰丛洼地土地利用较为单一的自然坡面,张川等<sup>[6]</sup>结合统计学方法研究

桂西北岩溶地区典型灌丛和草灌坡地表层土壤含水量的空间变异特征,发现两种坡地表层土壤含水量整体沿坡面自上而下呈递增趋势,土壤含水量具有明显的空间结构和空间依赖性;宋同清等<sup>[7]</sup>采用统计学方法在人为破坏少的峰丛洼地上分段研究了土壤表层水分的空间异质性,指出地形、微地貌、降雨,尤其是植被是影响土壤含水量空间变异的重要影响因素,保存完好的原始森林对土壤含水量空间异质性具有较好的调控作用;陈洪松等<sup>[8]</sup>指出由于地表出露岩石的不均匀性分布与地下岩石裂隙结构的多样性,即使地形、土壤、植被等条件相同,小生境类型的不同也会导致土壤水分具有明显的时空变异性;张伟等<sup>[9]</sup>在岩溶洼地典型区域表层土壤含水量的空间变异性研究中指出半变异函数理论模型可采用指数模型,变程在

基金项目:国家重点研究计划项目(2016YFC0502403);国家自然科学基金项目(51769005,41301289)

第一作者简介:李春茂(1993-),男,硕士研究生,主要从事水文与水资源研究。E-mail:hbhglcm@163.com。

通信作者:徐勤学(1982-),男,副教授,博士,主要从事水土保持与农业生态研究。E-mail: xqx@glut.edu.cn。

收稿日期:2017-11-07

56~62 m 之间,表层(0~5 cm)土壤含水量具有中等程度的空间相关性;张继光等<sup>[10]</sup>通过半方差分析指出,峰丛洼地坡面纵横向表层土壤水分具有明显的块金效应和较大的基台值,呈中等或较强的空间相关性,且变程较大,显示出岩溶坡面表层土壤含水量具有较好的空间变异结构。

在岩溶峰丛洼地地区由于人多地少,坡面中下部较缓地带多被开发为梯田,原有自然坡面受到严重干扰,且往往集合了多种小生境和土地利用<sup>[11]</sup>。现有研究表明,在岩溶流域,土地利用对流域表层含水量的空间变异性具有显著影响<sup>[12]</sup>,也有研究对比了峰丛洼地坡地上不同土地利用方式对旱、雨季的土壤水分空间异质性的影响,结果表明不同土地利用方式下土壤水分空间分布格局不同,但同一土地利用方式在旱、雨季的空间结构相似<sup>[13]</sup>。这些研究多在流域尺度和不同坡面,但对于人为扰动强、在同一坡面集合了多种土地利用的典型岩溶峰丛洼地坡面表层土壤含水量的空间异质性研究较少,亟待进一步研究。

本文以典型人为扰动及改造的岩溶峰丛洼地坡面为研究对象,在旱季、雨季分别对表层(0~5 cm)土壤含水量进行定点测量,探讨整个坡面表层土壤含水量的空间分布及空间异质性特征,并进一步分析坡面上裸石、梯田石坎等小生境对周围土壤含水量空间变化的影响,以期深入认识人为扰动强、土地利用多样的典型峰丛洼地坡面上的生态学过程,为实现水土资源协调利用提供科学依据。

### 1 研究区概况

研究区位于广西桂林灵川县枇杷塘村,海拔在

320~360 m 之间,属典型的岩溶峰丛洼地。研究区多年平均气温为 18.7 ℃,多年平均降雨量为 1 785.2 mm,雨季一般在 4—9 月份;土壤为白云岩母岩发育而成的棕色和淡黄色石灰土,土层浅薄。研究区坡面包括上方的坡地和下方的梯地两部分,坡面下部梯地被村民改造利用,例如橘园和菜园,坡面中部岩石裸露率大于 70%,大量裸露岩石将坡面土壤分为“石隙土”和“石碗土”等形式的土壤斑块,同时保留上部的原生灌丛(图 1)。坡上、坡中、坡下分别对应坡地林地、坡地裸地、梯田空闲地及果园等不同土地利用方式(表 1)。类似的坡改地在当地数量较多,具有较强代表性。

### 2 材料与方法

#### 2.1 试验方法

试验于旱季(2016 年 12 月 28 日)和雨季(2017 年 5 月 6 日)分两次进行。为确保坡面表层土壤含水量处于较稳定水平,在测试前 3 d 内没有降雨情况下进行试验。因土层浅薄,测量各样点表层(0~5 cm)土壤体积含水量,测量仪器采用 TDR(ML3-KIT,英国)。在典型坡改梯的坡面上以网格法(4×4 m)采样,覆盖所有土地利用方式,共设置样点 224 个,样点之间纵横间隔 4 m。此外在坡面上的梯田石坎周围采样,样点横向间隔 1 m,纵向间隔 10 cm,在裸露岩石下方取样,样点横、纵向间隔 10 cm(图 1)。采样过程中每个样点测多次取平均值,若样点上有岩石,便在周围测多个数据用平均值代替该样点,采样点布设如图 1。

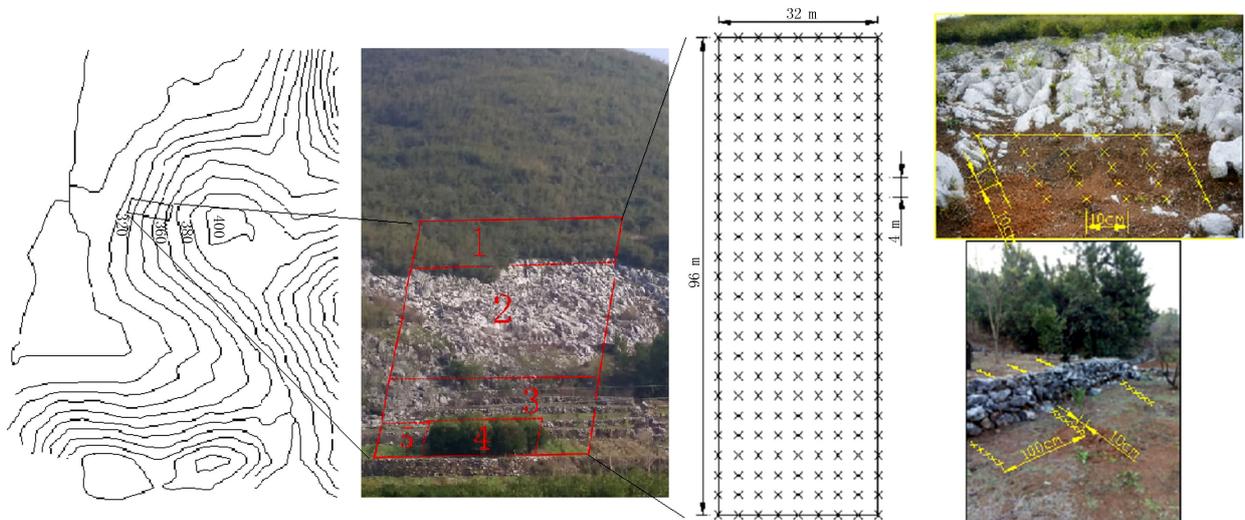


图 1 坡面及细部取样点示意图

Fig. 1 Slope and detail sampling points

表 1 样区概况

Table 1 Profile of sample area

土地利用方式(编号)	样区概况	
	旱季	雨季
坡地林地(1)	面积约 60 m <sup>2</sup> ,原生灌木林地,常年未经人为扰动,坡度在 20°~30°,覆盖度大于 90%	同旱季,常年未被扰动
坡地裸地(2)	面积约 320 m <sup>2</sup> ,地表多裸石,土壤稀少浅薄呈斑块状分布,坡度在 40°~50°	同旱季,基本没有变化
梯田空闲地(3)	面积约 320 m <sup>2</sup> ,原种果树,果树除病害后需空闲 3~4 a 再种其他作物,坡度<1°;每级梯田长度为 40 m 左右,宽度为 15 m 左右,石坎由碎石堆砌,宽度 30 cm 左右,土层较厚>1 m	土壤表层 0~30 cm 被人为翻耕,仍未种作物
梯田橘园(4)	面积约 180 m <sup>2</sup> ,坡改梯后种植橘子树 10 a 左右,坡度<1°	同旱季,基本无变化
梯田菜园(5)	面积约 180 m <sup>2</sup> ,坡改梯后种植大白菜,坡度<1°	同旱季,基本无变化

## 2.2 数据处理

用经典统计学方法和地统计学方法对样本数据进行处理。土壤含水量的描述性分析在统计软件 SPSS 中进行,Kriging 等值线图的描绘在 ArcGIS 中完成。地统计学分析的核心工具是半变异函数,半变异函数是事物空间相关系数的表现,它把统计相关系数的大小作为一个距离的函数,其公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

式中: $\gamma(h)$ 为间距为  $h$  的半变异函数值; $N(h)$ 是间距为  $h$  时的样点对数; $Z(x_i)$ 是样点  $Z$  在位置  $x_i$  实测值; $Z(x_i + h)$ 是与  $x_i$  间距为  $h$  的样点实测值。一般认为半变异函数只有在最大间隔的 1/2 内才有意义。对半变异函数的拟合选取半变异模型中的指数模型,其公式为:

$$\gamma(h) = C_0 + C(1 - e^{-\frac{h}{\alpha}}) \quad (2)$$

式中: $C_0$ 为块金值(Nugget); $C$ 为偏基台值(Partial Sill); $C_0 + C$ 为基台值(Sill); $\alpha$ 为变程(Range)。块金值越大表示样本误差和采样尺度下的变异源引起的随机变异越大,偏基台值反映在采样尺度上的变异源所引起的变异,基台值反映样本误差和研究区域以下的所有变异源所引起的变异,变程表示具有相似性质斑块的空间连续性的范围,变程以内的空间变量具有空间自相关性,以外则不存在相关性<sup>[14-15]</sup>。根据 Cambardella 等<sup>[16]</sup>的数据,空间结构比(块金值与基台值的比值)可确定空间自相关依赖性,并归类为弱(>0.75),中等(0.75~0.25)或强(<0.25)。空间变异系数( $C_v$ )能反应出数据的离散程度,系数越大表明空间变异越高。在 SPSS 中用皮尔森相关系数来分析距离与土壤含水量之间的关系,若  $r > 0$ ,表明两个变量是正相关;若  $r < 0$ ,表明两个变量是负相关, $r$

的绝对值越大表明相关性越强。

## 3 结果与分析

### 3.1 坡面土壤含水量的空间变化

对旱季、雨季时期整个坡面土壤含水量进行统计分析(表 2)。结果表明,坡上人为干扰强度较弱的坡地林地土壤含水量较高,位于坡下人为改造的梯地较低。旱季时期坡面上土壤平均含水量为 24.3%,变异系数为 20.1%,其土壤含水量的分布基本是坡地较高,梯地较低,坡地裸地与梯田空闲地差异不显著。雨季时期整个坡面土壤平均含水量为 24.7%,变异系数为 31.7%,其土壤含水量的空间分布仍是坡地较高、梯地较低,坡面上的土壤含水量在均值上略有升高,其中梯田橘园和坡地裸地的土壤含水量有了明显升高,坡地林地和梯田菜园无明显变化,而被翻耕的梯田空闲地的土壤含水量明显降低。

从坡面上不同土地利用方式的土壤含水量来看,旱季时期,坡地林地(32.8%)显著大于梯田空闲地(24.2%)和坡地裸地(23.5%),而坡地裸地和梯田空闲地显著大于梯田菜园(22.0%)和梯田橘园(20.0%);各土地利用方式的土壤含水量均表现为中等变异,变异系数的排序为梯田橘园(23.7%)>梯田菜园(18.1%)>坡地裸地(17.7%)>梯田空闲地(16.5%)>坡地林地(15.2%),可看出土壤含水量的均值越高,其变异系数就越低。

而在雨季时期,坡地裸地和梯田橘园的土壤含水量急剧升高,梯田空闲地有所降低,表现为坡地林地(32.2%)、梯田橘园(32.1%)和坡地裸地(30.2%)显著高于梯田菜园(23.5%),而梯田菜园显著高于梯田空闲地(17.8%);各土地利用方式土壤含水量的变异

表 2 坡面各土地利用方式土壤含水量

Table 2 Soil moisture results of different land types on hillslope

样地类型	样点数	旱季		雨季	
		均值/%	变异系数/%	均值/%	变异系数/%
坡地林地	18	32.81±4.99c	15.20	32.19±5.82c	18.08
坡地裸地	72	23.52±4.16b	17.69	30.22±3.77c	12.48
梯田空闲地	98	24.24±3.99b	16.46	17.77±4.51a	25.38
梯田橘园	18	19.98±4.74a	23.71	32.11±4.21c	13.11
梯田菜园	18	22.00±3.99a	18.14	23.50±4.21b	17.91

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

程度为中等,变异系数的排序为梯田空闲地(25.4%)>坡地林地(18.1%)>梯田菜园(17.9%)>梯田橘园(13.1%)>坡地裸地(12.5%)。

对整个坡面的样本数据进行单样本 K-S 检验,检验结果明显大于 5%显著水平。利用地统计学方法对旱、雨季半变异函数模型进行结构参数分析(表 3)。旱季、雨季的块金值分别为 0.006 6、0.014 6,均

小于偏基台值 0.024 7 和 0.153 8。较大的块金值表明,雨季表层土壤含水量空间异质性由随机性引起的变异相比其他指标大。坡面上空间结构比分别是 21.0%和 8.7%,反映出随机变异占总变异的比值较小,表明样区土壤含水量具有强烈的空间相关性。旱季、雨季阶段的变程分别为 8.0 m 和 77.5 m,表明雨季时期土壤含水量空间连续性较好。

表 3 坡面土壤含水量的半变异函数理论模型及其结构参数

Table 3 Semi-variogram function theory and parameters for soil moisture on hillslope

	模型类型	块金值(C <sub>0</sub> )	偏基台值(C)	基台值(C <sub>0</sub> +C)	块金值/基台值/%	变程/m
旱季	Exponential model	6.60E-03	2.47 E-02	3.13 E-02	21.0	8.0
雨季	Exponential model	1.46E-02	1.54 E-01	1.68 E-01	8.7	77.5

利用地统计学方法进一步对旱、雨季 5 种土地利用方式的土壤含水量空间结构进行分析(表 4)。空间结构比表明,旱季时期随机变异占总变异较大,如梯田菜园(78%)、坡地林地(95%)、梯田橘园(75%),而雨季随机变异占总变异较小,如梯田菜园(9%)、坡地林地(46%)。这与前面的结论基本一致,且可看出

旱季空间相关性比雨季小的原因是坡地林地和梯田菜园的空间结构比偏高。变程表明梯田空闲地(旱季为 67 m,雨季为 68 m)的空间连续性较好,这主要是梯田空闲地的土被较厚且连续、裸露岩石较少,而其他土地利用方式的变程较低,但均大于观测距离(4 m),表明观测值之间存在一定的空间相关性。

表 4 坡面各土地利用方式的半变异函数理论模型及其结构参数

Table 4 Semi-variogram function theory and parameters for different land types on hillslope

季节	样地类型	块金值(C <sub>0</sub> )	偏基台值(C)	基台值(C <sub>0</sub> +C)	块金值/基台值/%	变程/m
旱季	坡地林地	2.80 E-02	0.14 E-02	2.94 E-02	95%	32.3
	坡地裸地	1.10 E-02	0.90 E-02	2.00 E-02	56%	7.6
	梯田空闲地	1.10 E-02	1.70 E-02	2.80 E-02	39%	67.0
	梯田橘园	5.10 E-02	1.70 E-02	6.80 E-02	75%	12.0
	梯田菜园	3.50 E-02	1.00E-02	4.50 E-02	78%	24.0
雨季	坡地林地	2.30 E-02	2.70 E-02	5.00E-02	46%	32.0
	坡地裸地	1.40 E-02	2.00 E-03	1.60 E-02	87%	18.6
	梯田空闲地	5.40 E-02	8.40 E-02	1.38 E-01	39%	68.0
	梯田橘园	1.42 E-02	7.60 E-03	2.18 E-02	65%	24.0
	梯田菜园	5.60 E-03	5.30 E-02	5.86 E-02	9%	8.0

用 Kriging 方法制作的等值线图可直接反映峰丛洼地坡面上表层土壤含水量在旱、雨季的空间分布格局(图 2)。旱季时期坡面表层土壤含水量空间连续性较低,空间结构比较复杂,较高值主要集中在坡上的坡地林地、坡中及右下方的梯田空闲地,而坡下

的梯田橘园和梯田菜园较低;雨季时期坡面土壤含水量具有较好的空间连续性,位于坡下的梯田橘园和坡上的坡地林地、坡地裸地,其表层土壤含水量较高,位于坡中的梯田空闲地明显降低。

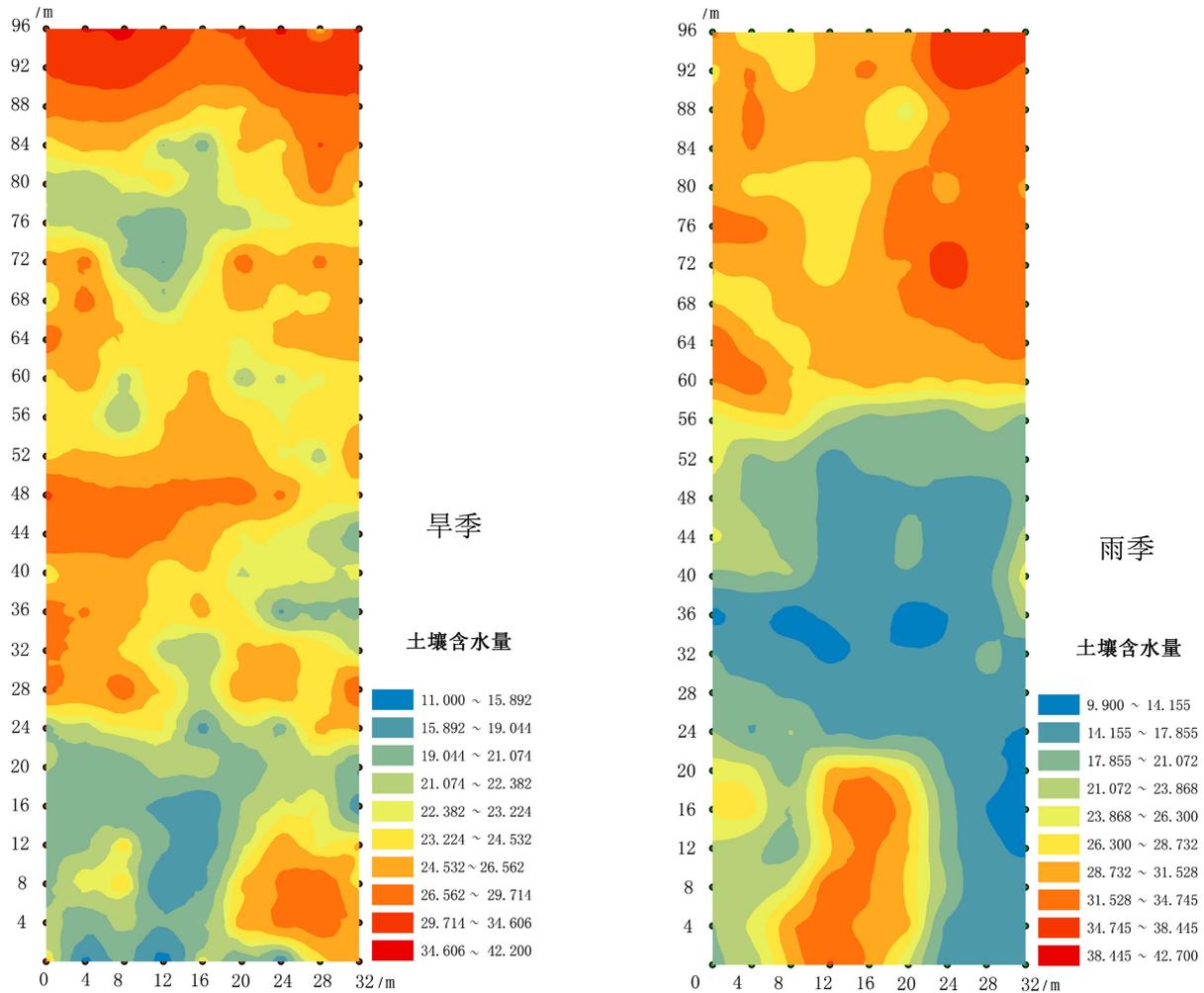


图 2 土壤含水量空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution map of soil moisture

### 3.2 裸露岩石周围空间的土壤含水量变化

在与裸岩距离 10 cm 处的土壤含水量差异较显著,随着距离增加差异性减小(表 5)。旱季裸石周围的土壤含水量均值在 24% 左右,雨季的均值在 27% 左右,雨季明显高于旱季;变异系数在 8.3% ~ 15.0% 之间,说明在不同距离上土壤含水量的变异性较弱。进一步进行 Person 相关性分析(表 6),发现土壤含水量与裸岩周围距离呈负相关的趋势且相关性较强,即距离岩石越远的区域土壤含水量越小,并且慢慢接近均值。

### 3.3 梯田石坎周围空间的土壤含水量变化

旱季时期,在距离石坎上下 10 cm、20 cm、30 cm、40 cm、50 cm 处测其土壤含水量(表 7)。在距离较近的区域内,不同石坎处土壤含水量差异显著,随着距离增加差异消失;变异系数在 9.7% ~ 17.5%,变异性较弱,说明石坎周围土壤含水量变化较小。Person 相关性分析(表 8)结果显示,随石坎距离增大,土壤含水量呈减小的趋势,在距离石坎 50 cm 处的土壤含水量与梯田的均值 24.0% 较接近。石坎虽然改变了局部的土壤含水量分布,但是随着尺度的增加,该影响逐渐减弱,基本与梯田平均含水量接近。

表 5 裸露岩石周围土壤含水量  
Table 5 Soil moisture results around bare rock

	样点数	与裸岩距离/cm				均值/ %	变异系数/ %	
		10	20	30	40			
旱季	I	32	22.9±1.8a	24.6±2.6a	27.4±2.3b	22.9±4.4b	24.2±3.4a	14.5%
	II	32	28.6±0.1b	24.3±1.3a	26.6±0.5b	25.6±1.6b	24.4±3.3a	7.7%
	III	32	25.7±3.0ab	23.3±3.3a	20.8±2.8a	21.1±2.9a	23.2±2.4a	10.3%
雨季	I	32	25.8±1.3ab	25.6±1.1a	25.8±2.2b	22.3±0.8b	24.9±2.1a	8.3%
	II	32	28.0±1.8b	30.5±0.2b	24.8±2.2b	24.0±1.6b	26.8±3.1a	11.5%
	III	32	35.0±3.0c	34.2±2.7b	28.0±3.4b	26.9±2.4b	31.0±4.6b	15.0%

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ),ab 表示差异不显著;I、II、III 表示岩石编号。

表 6 裸露岩石周围土壤含水量变化  
Table 6 Changes of soil moisture content around bare rock

	旱季			雨季		
	I	II	III	I	II	III
系数	+0.089*	-0.390*	-0.812**	-0.606*	-0.812**	-0.848**
显著性	0.410	0.340	0.001	0.021	0.001	0.001

注:—表示土壤含水量与距离呈负相关,\*\* 在 0.01 水平上显著相关,\* 在 0.05 水平上显著相关。

表 7 梯田石坎周围土壤含水量  
Table 7 Soil moisture results around terrace bank

样点方位	样点数	与石坎距离/cm					均值/ %	方差	变异系数/ %
		10	20	30	40	50			
石坎 I(上)	45	26.7±1.3ab	23.7±3.0ab	24.8±3.1a	24.4±3.1a	24.1±1.8a	24.80	7.99	11.27
石坎 I(下)	45	27.9±4.5b	25.2±4.8ab	26.8±4.0a	25.1±2.9a	23.6±3.6a	25.70	19.23	16.84
石坎 II(上)	45	26.1±3.0ab	26.3±1.7ab	26.3±1.8a	25.2±1.6a	25.7±3.6a	25.90	6.53	9.70
石坎 II(下)	45	28.3±3.0b	28.4±2.1a	27.3±3.1a	25.0±3.0a	24.3±3.7a	26.70	12.40	13.05
石坎 III(上)	45	22.4±4.0a	22.3±3.7b	24.4±5.1a	21.7±2.1a	23.4±3.7a	22.90	16.39	17.50
石坎 III(下)	45	25.7±3.4ab	25.9±3.6ab	25.0±1.7a	24.6±3.6a	22.1±3.9a	24.60	13.54	14.76

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

表 8 梯田石坎周围土壤含水量变化  
Table 8 Changes of soil moisture content around terrace bank

	1		2		3	
	上	下	上	下	上	下
系数	-0.109*	-0.327*	-0.108*	-0.463*	+0.053*	-0.329*
显著性	0.506	0.039	0.536	0.003	0.747	0.038

注:\*\* 在 0.01 水平上显著相关,\* 在 0.05 水平上显著相关。

为进一步探究石坎周围土壤含水量的空间变化,将同距离的全部土壤含水量作为因变量,距离为自变量,统计分析如图 3。结果表明,在 10 cm 处土壤含水量达到最大(26.2%),在 50 cm 处土壤含水量最小(23.8%),且差异显著;Person 相关性分析得到土壤含水量与距离的相关系数为-0.214,在 0.05 水平上显著相关;变异系数在 12.7%~15.6%之间,空间变异性属中等,可看出随距离增大,土壤含水量大致呈递减趋势,变异系数的变化趋势大致与其相反。

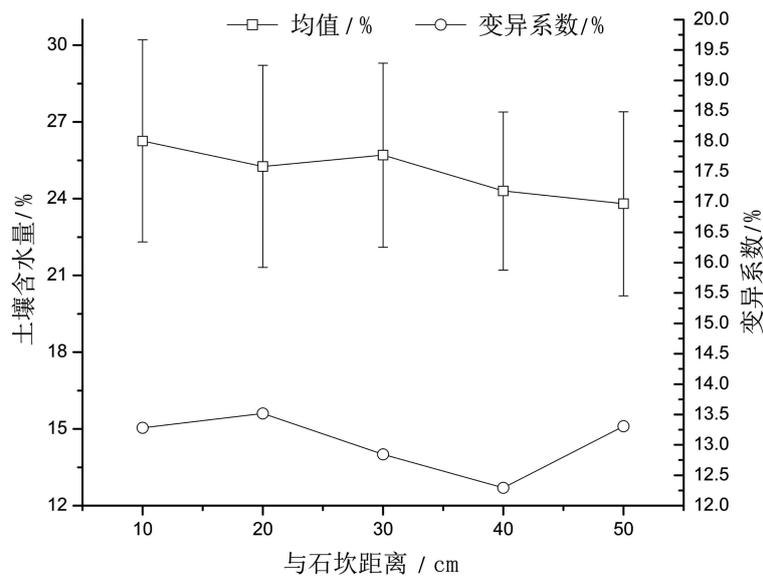


图 3 石坎不同距离土壤含水量变化图

Fig. 3 Change map of soil moisture around terrace bank

#### 4 讨 论

本文结果与土地利用较为单一的坡面表层土壤含水量的空间变异特征不同,土壤含水量并没有沿坡位下降而增大,而是坡上未被扰动的自然植被区明显高于坡下人为改造的区域。坡地林地表层土壤含水量高,主要是由于枯枝落叶层的存在能对表层土及时补水并防止水分蒸发,而下坡经过人为扰动、过度种植等土壤保水保肥能力下降。该坡面上坡地裸地和梯田空闲地在旱季时的土壤含水量都较低且差异不显著,雨季时坡地裸地、梯田橘园明显升高,梯田空闲地却急剧降低。这是因为坡改梯虽然能在一定程度上提高坡面的土壤含水量,但人为扰动、过度种植等不当措施也可能会加剧土壤流失量,土壤含水量也可能有不同程度降低<sup>[17]</sup>;梯田空闲地由于表层土结构被翻耕所破坏,在降雨后易形成结皮阻碍水分下渗<sup>[18]</sup>,加剧了土壤水分的蒸发致使土壤含水量急剧降低;而梯田橘园在旱季受人类活动干扰较大,果实采收、果树防寒害等活动使果园表层土壤被踏实,致使土壤水分物理性质较差<sup>[12]</sup>,但由于雨季降雨增多,加之果树形成的树荫及时减少土壤水分蒸发等致使土壤水分剧烈升高;有研究对比了不同季节表层土壤的含水量变化,指出土壤水分受季节中降雨与蒸腾作用的综合影响<sup>[19]</sup>。由此看出,在典型峰丛洼地坡面上人为扰动、土地利用方式、季节等因素与土壤含水量空间异质性密切相关。

对坡面各土地利用表层土壤含水量研究发现,坡

地林地最高,坡地裸地次之,人为改造的梯田空闲地和梯田菜园的平均含水率较低(表 4)。这与张继光等在研究岩溶坡面上表层土壤含水量变异特征及其与环境因子数量关系的结果相似,结果表明土壤平均含水量以自然植被最高,撂荒地和坡耕地次之,人工林最低<sup>[20]</sup>。各土地利用方式土壤含水量与相应的变异系数变化趋势整体上相反,这与该地区以往的研究结果一致<sup>[6]</sup>。

研究发现在旱季、雨季时期典型峰丛洼地坡面表层土壤含水量具有明显的空间依赖性和空间结构(空间结构比均小于 25%)。旱、雨季坡面上土壤含水量具有不同的变异特征,各土地利用方式的空间结构也有所不同。从坡面来看,雨季时期坡面土壤含水量的块金值均大于旱季,较大的块金值表明空间异质性由随机性引起的变异相比其他指标较大,这需要旱季更多的采样点并缩短间隔,以达到更好的效果。基台值反映出雨季土壤含水量的总变异程度较低,这与土壤含水量在空间分布上受土地利用类型、季节等多种因素影响相关<sup>[10]</sup>,例如,坡地裸地在雨季其偏基台值明显降低,在一定程度上就影响了雨季坡面上的空间变异性。旱季时期土壤含水量空间连续性较低,这主要受控于岩石的出露情况,石丛的广泛出露使得土壤水分的空间分布变得支离破碎,然而在雨季由于岩面流补充到岩石周围的土壤中,在一定程度上降低了与周围地段土壤含水量的差距,使得变程有所提高。另外,坡面上梯田空闲地被人为翻耕,导致连续区域上的土壤含水量都保持接近,而且雨季较多的降雨使土

壤含水量趋近饱和,也会导致变程的增加。所以典型峰丛洼地坡面表层土壤含水量在雨季具有较好的空间变异结构。

坡地裸地因为受裸露岩石形成的小生境影响,在旱季、雨季表现出差异明显的土壤含水量水平。李生等<sup>[21-22]</sup>分析了旱季时裸岩对其周围地表土壤含水量的影响,指出岩石出露区由于地表覆盖少,加之裸露岩石对光照强烈的漫反射,导致土壤含水量蒸发剧烈,土壤含水量较其他土地利用方式低;还通过收集裸露岩石上的径流量发现,岩石收集的水量其一半通过径流直接补给到附近的土壤斑块,致使接近岩石露头地区的土壤含水量高于更远的地区,且在降雨前后变现最明显。裸地的土壤水分在旱季蒸发剧烈,在雨季能得到及时补充,这与本文中的结果一致。

裸石周围空间的土壤含水量与距离呈负相关趋势,梯田石坎周围的小尺度(50 cm)空间范围内,土壤含水量与石坎距离呈负相关趋势,可看出微地貌能通过热辐射接受、能量吸附、水流迁移等对周围空间的地表土壤含水量产生重要影响<sup>[22-24]</sup>。程冬兵等<sup>[25]</sup>在绿篱和石坎梯田对土壤物理性质影响的研究中指出距梯田石坎越近,土壤表层饱和入渗率越大,从而导致土壤含水量在不同距离表现出差异。另有学者指出坡耕地改梯田后,地面可利用面积增加,蒸发随之加强致使梯田含水量下降,且石坎侧向蒸发能消耗大量水分,在1 m范围内较明显<sup>[26]</sup>。类似的研究可证明裸石、梯田石坎等微地貌也能对周围空间土壤含水量产生影响。最后,本研究不足之处在于土壤含水量的层次较少、样区边长不够,因此还需在今后的研究中增加取样个数和对深层土壤含水量的空间变异研究,从而对峰丛坡地水分的合理利用与植被恢复提供更加可靠的结果。

## 5 结 论

(1)与单一土地利用坡面上表层土壤水分含量的空间变异特征不同,典型峰丛洼地坡面上土壤含水量并不是沿坡位下降而增大,而是坡上未被扰动的自然植被区明显高于坡下人为改造的区域。旱、雨季表层土壤含水量的空间相关性强烈且空间变异中等,但雨季具有较好的空间变异结构,不同土地利用的空间结构也有所差异。

(2)坡面上表层土壤含水量空间分布在旱、雨季不同。旱季各土地利用的均值大小排序是坡地林地>梯田空闲地>坡地裸地>梯田菜园>梯田橘园,变异系数的变化趋势整体上与其相反;雨季是坡地裸地

>坡地林地>梯田橘园>梯田菜园>梯田空闲地,且坡地裸地和梯田橘园的土壤含水量明显高于旱季,梯田空闲地土壤含水量由于扰动剧烈降低。

(3)裸露岩石周围空间的土壤含水量随与裸岩距离增大而减小,梯田石坎周围空间的土壤含水量随与石坎距离增大而减小,且随着尺度的增加逐渐接近梯田平均含水量。

## 参考文献

- [1] Antonio PMallarino. Variability Patterns of Phosphorus and Potassium in No-Tilled Soils for Two Sampling Scales[J]. Soil Science Society of America, 1996, 60(5): 1473-1481.
- [2] 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.
- [3] 邓艳,曹建华,蒋忠诚,等.西南岩溶石漠化综合治理水-土-植被关键技术进展与建议[J].中国岩溶,2016,35(5):476-485.
- [4] 熊平生,袁道先,谢世友.我国南方岩溶山区石漠化基本问题研究进展[J].中国岩溶,2010,29(4):355-362.
- [5] 任伟,谢世友,谢德体.喀斯特山地典型植被恢复过程中的土壤水分生态效应[J].水土保持学报,2009,23(5):128-132.
- [6] 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.
- [7] 宋同清,彭晚霞,曾馥平,等.喀斯特木论自然保护区旱季土壤水分的空间异质性[J].应用生态学报,2009,20(1):98-104.
- [8] 陈洪松,聂云鹏,王克林.岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展[J].生态学报,2013,33(2):317-326.
- [9] 张伟,陈洪松,王克林,等.喀斯特地区典型峰丛洼地旱季表层土壤水分空间变异性初探[J].土壤学报,2006,43(4):554-562.
- [10] 张继光,陈洪松,苏以荣,等.喀斯特峰丛洼地坡面土壤含水量空间变异研究[J].农业工程学报,2006,22(8):54-58.
- [11] 魏兴琥,徐喜珍,雷俐,等.粤北岩溶峰丛自然坡面与梯田土壤侵蚀特征分析[J].中国水土保持,2014(9):43-47.
- [12] 姚月锋,何成新,曾丹娟,等.漓江流域表层土壤水分物理性质空间异质性[J].水科学进展,2016,27(5):696-704.
- [13] 徐慧芳,宋同清,黄国勤,等.喀斯特峰丛洼地地区坡地不同土地利用方式下土壤水分的时空变异特征[J].生态学报,2014,34(18):5311-5319.
- [14] Western A W, Blöschl G, Grayson R B. Geostatistical characterisation of soil moisture patterns in the Tarrawarra catchment[J]. Journal of Hydrology, 1998, 205(1-2):20-37.
- [15] 王云强,邵明安,刘志鹏.黄土高原区域尺度土壤水分空间变异性[J].水科学进展,2012,23(3):310-316.
- [16] Cambardella C A, Moorman T B, Parkin T B, et al. Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(5):1501-1511.
- [17] 卫伟,余韵,贾福岩,等.微地形改造的生态环境效应研究进展[J].生态学报,2013,33(20):6462-6469.
- [18] 李裕元,邵明安.土壤翻耕对坡地水分转化与产流产沙特征的影响[J].农业工程学报,2003,19(1):46-50.
- [19] 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.
- [20] 张继光,陈洪松,苏以荣,等.喀斯特山区坡面土壤水分变异特征及其与环境因子的关系[J].农业工程学报,2010,26(9):87-93.

- [21] 李生,任华东,姚小华.西南喀斯特石漠化地区旱季土壤水分对裸岩的响应[J].生态学杂志,2012,31(12):3174-3178.
- [22] 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.
- [23] 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, 2016, 23(9): 8610.
- [24] Hammad A H A, Børresen T, Haugen L E. Effects of rain characteristics and terracing on runoff and erosion under the Mediterranean[J]. Soil & Tillage Research, 2006, 87(1):39-47.
- [25] 程冬兵, 李朝霞, 蔡崇法, 等. 三峡库区等高绿篱技术对土壤物理性质的影响[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(2):83-89.
- [26] 杨开宝, 郭培才. 梯田田坎水分耗散及其对作物产量的影响初探[J]. 水土保持通报, 1994, 14(4):43-47.

## Spatial variability of soil moisture on hillslope in typical karst peak-cluster depression areas

LI Chunmao<sup>1,3</sup>, CHEN Hongsong<sup>2,4</sup>, XU Qinxue<sup>1,2</sup>, WU Pan<sup>1,3</sup>, FU Zhiyong<sup>2,4</sup>

(1. Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety in Karst Area (Incubation),

Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

2. Institute of Subtropical Agriculture, CAS, Changsha, Hunan 410125, China;

3. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology,

Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

4. Huangjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystem, CAS, Huanjiang, Guangxi 547100, China)

**Abstract** The study area is located in Guilin, Guangxi, with a land area of approximately 3,000 m<sup>2</sup>. The area is characterized by humid subtropical monsoonal climate, with the average annual temperature 18.7 °C and the average annual rainfall of 1,785.2 mm; and its rainy season is generally from April to September, which belongs to the typical karst peak-cluster depression landforms. The study area include the hillslopes and the below terraces, and the terraces were previously transformed from hillslopes and used by villagers for the orangery and vegetable gardens. The exposed rate of rock in the middle of the hillslopes is more than 70%; and a large amount of exposed rock divide their soil into patches in the form of "rock gap soil" and "stone bowl soil" while retaining the upper native shrub. In order to reveal the spatial variability characteristics of surface soil moisture in typical karst peak-cluster depression hillslopes with strong artificial disturbance and land use diversity, selecting the slopes of the typical peak-cluster depressions and using grid method to measure the soil moisture content in the dry season (December) and the rainy season (May), the spatial variability of soil moisture on hillslopes was analyzed by geostatistics. The results show that, (1) Compared with the slope of single land use, the surface soil moisture of the typical peak-cluster hillslopes is that undisturbed natural vegetation area located above the slope is significantly higher than artificial transformation of the region located below the slope, soil water content of sloping woodland (32.8%) that locating on top of the slope and undisturbed was significantly higher than terraced fields (24.2%), terraced orange garden (20.0%), terraced vegetable garden (22.0%) and bare land (23.5%) during the dry season. In rainy season, bare land (30.2%) and terraced origin garden (32.1%) had increased obviously and the terraced fields were drastically reduced (17.8%), while sloping woodland (32.2%) remained the highest; (2) The spatial structure ratio is 21.0% and 8.7% during the dry and rainy season, respectively, indicating that the spatial correlation of the rainy season is better; the coefficient of variation of the surface soil moisture was 20.1% and 31.7% during dry season and rainy season, which are both belonging to moderate spatial variability; the range of surface soil moisture during the rainy season (77.5 m) was significantly higher than that of dry season (8.0 m), which can be seen that the spatial variation structure of rainy season is better; (3) The change of soil moisture in the surrounding space of bare stone decreases with the increase of distance; soil moisture in the surrounding space of terrace bank is decreasing with increasing distance.

**Key words** peak-cluster depression, hillslope, soil moisture content, spatial variability, land use

(编辑 黄晨晖)