

陶涣壮, 彭扬建, 甘磊, 等. 岩溶地区不同土地利用方式下土壤斥水性的空间变化 [J]. 福建农业学报, 2017, 32 (1): 75—81.  
TAO H-Z, PENG Y-J, GAN L, et al. Spatial Distribution of Water Repellency of Soils on Plots Planted with Different Crops in Karst Regions [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 32 (1): 75—81.

## 岩溶地区不同土地利用方式下土壤斥水性的空间变化

陶涣壮<sup>1</sup>, 彭扬建<sup>1,2</sup>, 甘磊<sup>1,2,3\*</sup>, 马蕊<sup>3</sup>, 程芳丽<sup>4</sup>

(1. 桂林理工大学广西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. 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;

3. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西 桂林 541004;

4. 桂林市农业科学院, 广西 桂林 541004)

**摘 要:** 以广西桂林市农业科学院大豆、甘蔗及梨树植被覆盖的土壤为例, 研究不同土地利用模式下土壤斥水性的空间变化。通过对每个试验区面积为 135 m×105 m 的 100 个测量点应用滴水穿透时间法 (water drop penetration time, WDPT) 进行土壤斥水性测量, 利用土壤含水量确定干旱 ( $0.062 \pm 0.025$ )  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 、中等 ( $0.151 \pm 0.045$ )  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  和湿润 ( $0.237 \pm 0.086$ )  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  的土壤水分条件。运用地统计方式, 对土壤斥水性进行空间变化分析。结果表明: 在干旱和湿润水分条件下, WDPT 的大小均表现出梨树地最大, 甘蔗地次之, 大豆地最小, 与土壤含水量和有机质大小的变化一致, 但是在中等水分条件下, WDPT 均值大豆地高于甘蔗地, 同时 3 个试验区的滴水入渗持续时间都达到最大。土壤斥水性的地统计分析结果表明, 在 3 种水分条件下, 3 个试验区的空间结构比基本上大于 75%, 空间相关性较强。在土壤斥水性的高阈值空间分布上, 甘蔗地的稳定性比大豆地强, 而梨树的空间分布稳定性最弱。研究结果说明人类的活动会对土壤斥水性空间稳定性产生干扰, 但土壤本身仍具有恢复其空间分布稳定性的能力。

**关键词:** 不同植被覆盖; 土壤含水量; WDPT; 地统计分析; 空间变异

**中图分类号:** S 152

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1008—0384 (2017) 01—75—07

### Spatial Distribution of Water Repellency of Soils on Plots Planted with Different Crops in Karst Regions

TAO Huan-zhuang<sup>1</sup>, PENG Yang-jian<sup>1,2</sup>, GAN Lei<sup>1,2,3\*</sup>, MA Rui<sup>3</sup>, CHENG Fang-li<sup>4</sup>

(1. *Guangxi Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China*; 2. *Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China*; 3. *College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China*; 4. *Guilin Academy of Agricultural Sciences, Guilin, Guangxi 541004, China*)

**Abstract:** Spatial distribution of water repellency of the soils from plots planted with different crops was studied under the dry, moderately or wet soil conditions. Soybeans, sugarcane or pear trees were grown on the plots in the karst region near Guilin Institute of Agricultural Sciences in Guangxi. The spatial distribution of water repellency in the soils from the plots was determined by using a geostatistical analysis on the plots of 135 m×105 m in size. There were 100 sampling points on each plot for measurement of water drop penetration time (WDPT). The soils were also classified according to their moisture content as dry ( $0.062 \pm 0.025$ )  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ , moderately ( $0.151 \pm 0.045$ )  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  or wet ( $0.237 \pm 0.086$ )  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ . The results showed that, under dry and wet conditions, the greatest WDPT and contents of moisture and organic matters were found in the soil where pear trees were grown, while the lowest on the soybean plot. However, under the moderately wet soil condition, the lowest values on these

**收稿日期:** 2016—06—19 初稿; 2016—11—23 修改稿

**作者简介:** 陶涣壮 (1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 农田水土 (E-mail: 799634972@qq.com)

\* 通讯作者: 甘磊 (1983—), 男, 博士, 研究方向: 土壤物理性质及土壤水热运动模拟 (E-mail: allen\_gl2006@163.com)

**基金项目:** 国家自然科学基金 (41501230、41301289); 广西自然科学基金 (2016GXNSFAA380197)

parameters were on the sugarcane plot. Meanwhile, the water retention time reached a maximum for all plots. It appeared that geostatistical analysis significant correlation existed among the spatial distribution of water repellencies in 3 planting plots under 3 soil conditions as the ratio was substantially greater than 75%. Due to the high threshold water repellency distribution, the soil at the sugarcane plot seemed to be more stable than that at the soybean field, while that at the pear tree plot being the weakest of all. It suggested that the soils might be able to recover spatial distribution of water repellency after being disturbed by human activity.

**Key words:** vegetation coverage; soil moisture content; WDPT; geostatistical analysis; spatial distribution

土壤表面的水分由于某些因素的影响导致不能或很难湿润土壤颗粒表面的物理现象被称之为土壤斥水性 (Soil Water Repellency, SWR)<sup>[1]</sup>, 具体表现为水滴在斥水性土壤表面难以迅速铺展和下渗到土壤中, 可以用水滴渗透时间或土壤接触角来进行表示<sup>[2]</sup>。土壤斥水性随着土壤含水量和有机质含量的不同会呈现出不同程度的斥水性<sup>[3-4]</sup>, 同时人类不同的耕作和管理方式也会对土壤斥水性具有明显影响<sup>[5]</sup>。土壤斥水性会使土壤水入渗能力分布变化, 致使某些溶质通过渗漏的方式优先进入地下水, 从而增加了地下水受污染的风险<sup>[6]</sup>。此外 Ghadim 等<sup>[7]</sup>研究表明土壤的斥水性也会对地表径流的入渗起到阻碍作用, 使土壤更容易遭受侵蚀, 造成水土流失等问题。近年来, 众多学者采用地统计学方法进行土壤斥水性空间变化的研究, 并取得了比较好的效果。孙棋棋等<sup>[8]</sup>通过 GIS 技术与地统计学方法的结合, 较好地模拟土壤斥水性的空间结构和变异特征。郭丽俊等<sup>[9]</sup>以新疆地区次生盐渍土为试验对象, 对其土壤斥水性的空间分布进行了深入研究。因此, 进行土壤斥水性的大小和空间变化的研究可以为广西岩溶区农田灌溉制度和水土流失防治提供一定的科学依据, 同时也能够对该地区的农业发展具有重要促进作用。

研究区域为广西桂林市雁山区的桂林市农业科学院, 假设不同土地利用方式可以影响土壤斥水性的大小和空间变异, 探讨不同土壤湿度条件下梨树、大豆、甘蔗种植区土壤斥水性的大小变化以及空间分布。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

试验区位于广西桂林市农业科学院管理的区域 (25°4'N, 109°44'E)。试验区平均海拔约为 160 m, 多年平均温度 19℃, 属于亚热带湿润季风气候, 降雨丰沛, 年降水量在 1 949.5 mm 左右, 但是由于季风交替影响, 降雨量的季节分配不均, 干湿季节分明, 其中 60%~80% 的降水发生在每年的 4~8 月。本次试验选取 3 种不同植被覆盖条件下的种

植区, 依次是大豆种植区、梨树种植区以及甘蔗种植区。在每一个试验区, 利用 GPS 定位, 建立一个长 135 m, 宽 105 m 的栅格区, 测量点间距为 15 m, 同时设定 20 个次级测量点, 合计 100 个。

### 1.2 采样与分析

试验于 2014 年 9 月至 2015 年 3 月期间进行。土壤质地、容重、总孔隙度和土壤有机质等基本性质的测定, 利用梅花形布点取样, 并在试验之前对每个试验区用环刀采集 7 个表层 (0~6 cm) 原状土壤后, 在实验室进行分析。同时在试验前利用手持土壤水分测定仪 (Theta-probe Type ML2x) 来测定与土壤斥水性测定点对应的表层 (0~6 cm) 的土壤含水量 (每个试验区合计 100 个), 确定干旱 ( $0.062 \pm 0.025$ )  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 、中等 ( $0.151 \pm 0.045$ )  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  和湿润 ( $0.237 \pm 0.086$ )  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  的土壤水分条件。对土壤斥水性的测定是应用比较广泛的滴水穿透时间法 (water drop penetration time, WDPT)<sup>[10]</sup>, 每周测定 2 次, 每次测定均是在 1 d 内完成。具体操作过程是用一个标准的滴管将 10 滴蒸馏水 (每滴约 0.05 mL) 滴到每个测量点的土壤表面, 利用秒表记录水滴从土壤表层完全渗入到土壤, 消失所需要的时间, 以此来确定土壤斥水性的大小, 最后取 10 滴蒸馏水完全入渗到土壤所需要时间的算术平均值作为最终结果。土壤斥水性与土壤含水量的对应趋势分析, 均是采用其在同一水分含量等级下的均值作比较。

土壤斥水性地统计分析利用半方差分析方法。半方差分析中半方差函数  $r(h)$  的具体表达式为<sup>[11]</sup>:

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

式中,  $r(h)$  为间距为  $h$  的半方差;  $N(h)$  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。本研究选取半方差模型中的指数模型进行地统计分析, 得到块金值 ( $C_0$ )、偏基台值 ( $C$ )、基台值 ( $C + C_0$ ) 以及最大相关距离等重要参数。空间结构比  $K = C / (C + C_0)$  可体现出变量的空间自相关性强弱。根据

Cambardella 等<sup>[12]</sup>的研究可知：当  $K>75\%$  时，变量之间空间相关性较强烈；当  $K$  介于  $25\%\sim75\%$  时，空间相关性为中等程度；当  $K<25\%$  时，空间相关性十分微弱。土壤斥水性数据的基本统计描述利用 SPSS 20 (SPSS Inc., USA) 完成。ArcGis 10 (ESRI, USA) 主要用于对土壤斥水性进行地统计分析以及生成其在 3 个试验区的空间分布图。

2 结果与分析

2.1 土壤属性基本情况

从土壤的基本性质 (表 1) 可以看出，3 个试验区土壤质地差异不大但梨树地的砂粒含量显著大于另外 2 个试验区 ( $P<0.05$ )。就土壤容重而言，大豆地土壤容重显著高于另外 2 个区 ( $P<0.05$ )，梨树地和甘蔗地比较相似。在 3 个试验区中总孔隙

度最大的是甘蔗地，为  $47.78\%$ ，但无显著性差异。就土壤有机质而言，梨树地有机质含量最高，大豆地最低。

2.2 土壤含水量和土壤斥水性的统计描述

表 2 中列出了干旱、中等、湿润条件下 3 个试验区的土壤含水量和土壤斥水性。3 种土壤水分条件下，土壤含水量都是梨树地最大，甘蔗地次之，大豆地最小。在土壤水分干旱和湿润条件下，WDPT 均值的大小都是梨树地 $>$ 甘蔗地 $>$ 大豆地。在中等水分条件下，WDPT 均值表现为梨树地 $>$ 大豆地 $>$ 甘蔗地，并且 3 个试验区的滴水入渗持续时间都达到最大。在 3 种水分条件下，3 种土地利用类型都表现为轻微的斥水性，WDPT 最小值是干旱条件下的大豆地，为  $6.14\text{ s}$ ，最大 WDPT 是中等条件下的梨树地，为  $9.01\text{ s}$ 。

表 1 3 个试验区的土壤质地、容重(BD)、总孔隙度(TP)和有机质(SOM)

Table 1 Texture, bulk density (BD), total porosity (TP) and soil organic matters (SOM) of soils on 3 planting plots

试验区	砂粒 /%	粉粒 /%	粘粒 /%	容重/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	总孔隙度 /%	土壤有机质 /( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
梨树地	$41.99\pm1.4\text{a}$	$20.92\pm1.6\text{a}$	$37.09\pm1.9\text{a}$	$1.27\pm0.03\text{b}$	$45.84\pm0.05\text{a}$	$15.29\pm0.41\text{b}$
甘蔗地	$35.67\pm2.1\text{b}$	$26.28\pm1.8\text{a}$	$38.05\pm2.2\text{a}$	$1.29\pm0.04\text{b}$	$47.78\pm0.6\text{a}$	$13.36\pm0.34\text{a}$
大豆地	$37.11\pm1.7\text{b}$	$25.68\pm1.3\text{a}$	$37.21\pm2.1\text{a}$	$1.38\pm0.02\text{a}$	$45.17\pm0.7\text{a}$	$11.41\pm0.25\text{a}$

注：同列数据后不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )， $n=7$ 。

表 2 土壤 3 种湿度状态下土壤含水量和 WDPT

Table 2 Moisture content and water repellency in soils under 3 soil conditions

土壤湿度状态	试验区	含水量均值/ ( $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ )	标准误差/ ( $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ )	WDPT 均值 /s	标准误差 /s
干旱	大豆地	0.043	0.001	6.14	0.039
	甘蔗地	0.056	0.002	6.15	0.040
	梨树地	0.087	0.003	7.75	0.081
中等	大豆地	0.121	0.004	8.11	0.132
	甘蔗地	0.137	0.004	7.79	0.081
	梨树地	0.196	0.005	9.01	0.086
湿润	大豆地	0.163	0.003	6.60	0.063
	甘蔗地	0.226	0.006	7.36	0.062
	梨树地	0.323	0.009	8.81	0.080

2.3 土壤斥水性的地统计分析

土壤水分在干旱、中等和湿润条件下土壤斥水性在地统计分析的结果 (表 3) 表明，在 3 种条件下，土壤斥水性的最大相关距离都在  $27.50\sim207.20\text{ m}$ ，均大于观测距离，说明这些观测值之间存在空间相关性。从块金值和偏基台值来看，3 个试验区在 3 种湿度条件下，块金值总体低于偏基台值，仅在湿润条件下，大豆和甘蔗种植区

其块金值高于偏基台值。从空间结构比  $K$  值可知，干旱条件下，3 个试验区的  $K>75\%$ ，说明空间相关性很强。在中等水分条件下，大豆地、甘蔗地和梨树地的  $K$  分别为  $87.41\%$ 、 $73.58\%$ 、 $84.49\%$ ，说明空间相关性较强。在湿润水分条件下，梨树地的空间结构比 $>75\%$ ，而大豆地和甘蔗地的空间结构比在  $25\%\sim75\%$  的范围内，属于中等的空间相关性。

表 3 土壤斥水性在土壤湿度的 3 种状态下地统计分析结果  
Table 3 Geostatistics on water repellency in soils under 3 soil conditions

土壤水分条件	试验区	最大相关距离 /m	块金值 $C_0$	偏基台值 $C$	基台值 ( $C+C_0$ )	空间结构比 $K$ /%
干旱	大豆地	29.92	3.57E-02	1.11E-01	1.47E-01	75.71
	甘蔗地	28.49	2.65E-02	1.23E-01	1.50E-01	82.31
	梨树地	28.84	6.18E-02	4.90E-01	5.52E-01	88.81
中等	大豆地	66.57	1.87E-01	1.30E+00	1.49E+00	87.41
	甘蔗地	144.30	1.76E-01	4.90E-01	6.66E-01	73.58
	梨树地	27.50	9.52E-02	5.18E-01	6.13E-01	84.49
湿润	大豆地	177.92	2.40E-01	1.22E-01	3.62E-01	33.76
	甘蔗地	207.20	2.29E-01	1.34E-01	3.64E-01	36.96
	梨树地	35.97	1.99E-02	5.67E-01	5.87E-01	96.62

土壤斥水性空间分布情况可以从 ArcGIS 中得到，图中颜色越深，数值越大，每幅图土壤斥水性的强弱变化都有各自的变化阈值。图 1-a、图 1-b 和图 1-c 代表大豆地分别在干旱、中等和湿润的土壤水分条件下的土壤斥水性空间分布。在干旱水分条件下，WDPT 主要以低阈值为主，分布在北部和南部，WDPT 的高阈值分布于图中的中部。在中等条件下，WDPT 的高阈值从北部逐渐向东南角扩散，低阈值位于图中的西南角。在湿润条件下，WDPT 的高阈值位于西北角和西南角，都以阶梯式逐层向东南部递减，低阈值分布中部和东部。在 3 种水分条件下，大豆地 WDPT 的高阈值都位于试验区的西北角，说明土壤斥水性的空间分布具有良好的稳定性。图 2-a，图 2-b 和图 2-c 分别表示甘蔗地在干旱、中等和湿润的水分条件下土壤斥水性的空间分布图。在干旱水分条件下，WDPT 的高阈值在中部形成 2 个椭圆迅速向四周递减，使

得图中以低阈值为，并出现于图中的南部和北部。在中等条件下，WDPT 的高阈值位于中东部，低阈值分布于西北部。在湿润条件下，WDPT 的高低阈值分布比较明显，高阈值分布于东南角，低阈值位于西北角。在 3 种水分条件下，甘蔗地 WDPT 的高阈值在东部都有出现，空间分布的稳定性较好。图 3-a、图 3-b 和图 3-c 分别表示梨树地在干旱、中等和湿润水分条件下的土壤斥水性的空间分布。在干旱条件下，WDPT 的高阈值分布于图中的中部和西北部，以小圆圈的形式向四周辐射减少，低阈值位于东北角和南部。在中等条件下，WDPT 的高阈值位于图中的东北角和西南角，呈散点式分布，而低阈值位于西北角。在湿润条件下，土壤斥水性高低阈值呈零散分布。总而言之，梨树地土壤斥水性的阈值空间分布较为凌乱，其稳定性较弱。

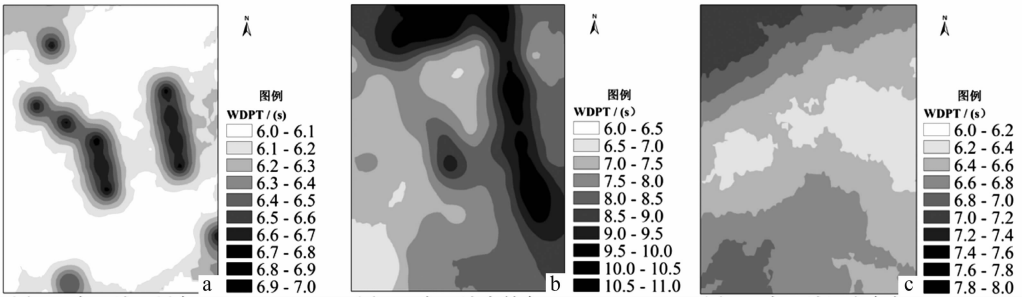


图 1 大豆地土壤斥水性空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of water repellency in soils under soybean field

注：a 为干旱条件，b 为中等条件，c 为湿润条件。图 2~3 同。

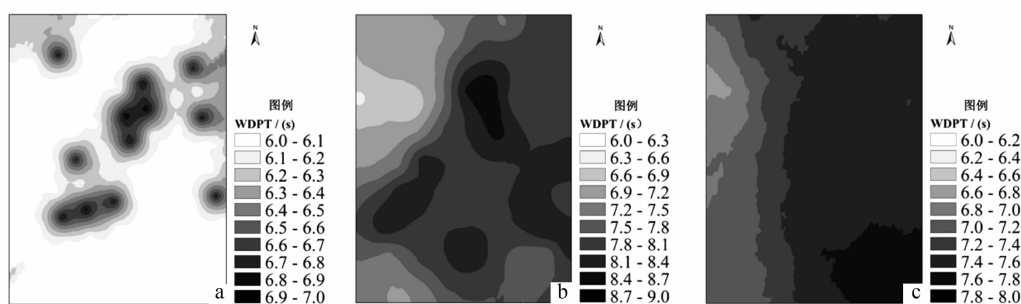


图 2 甘蔗地土壤斥水性空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of water repellency in soils under sugarcane field

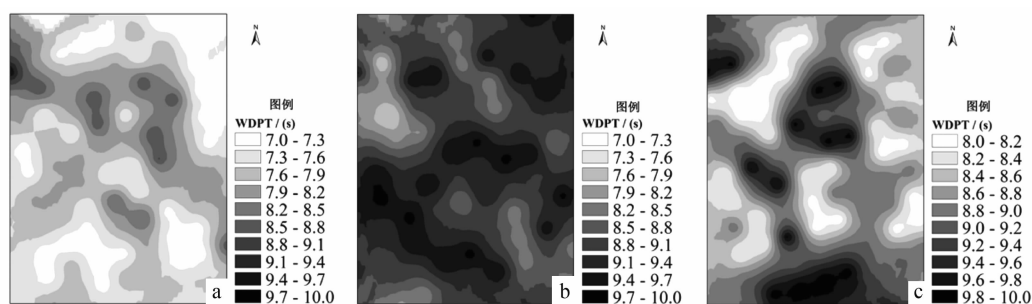


图 3 梨树地土壤斥水性空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of water repellency in soils under pear field

### 3 讨论与结论

土壤斥水性是土壤重要的物理属性，主要受土壤颗粒组成、土壤湿度、土壤有机质含量以及植被类型等因素的影响<sup>[13]</sup>。本研究结果表明，在 3 种土壤湿度条件下，土壤含水量都是梨树地>甘蔗地>大豆地，主要原因是梨树地土壤表面各种枯枝和树叶比较多，杂草也多，致使土壤表面蒸发作用较小，同时地表杂草具有调蓄水分作用，因此梨树地的土壤含水量在三者之中最高。甘蔗地因垄沟种植，可以存储部分水分，地表径流量减少，所以土壤含水量居中。而大豆地地表暴晒面积较多，蒸发作用较为强烈，致使大豆地的土壤含水量处于三者之中最小。在干旱和湿润水分条件下，WDPT 均值的大小表现为梨树地最大，甘蔗地次之，大豆地最小，与含水量的变化趋势一致，从而也说明土壤含水量会影响土壤斥水性的变化，这与李子忠等研究相一致<sup>[14-15]</sup>。梨树地的砂粒含量显著大于其他 2 个试验区 ( $P<0.05$ )，颗粒比表面积小，斥水性化合物较少就可以诱发斥水性<sup>[16]</sup>，从而其土壤斥水性较高。土壤有机质含量高低对土壤斥水性具有重要的影响，并且土地在缺乏田间管理和利用的情况下会使土壤中的有机质含量升高，土壤的斥水性在一定程度上会略微增加<sup>[17]</sup>。就土壤有机质而言，

也表现为梨树地>甘蔗地>大豆地。梨树地的地表覆盖物较多，土壤有机质含量最大<sup>[18]</sup>，此外由于梨树地平时受人为的影响较小，对田间土地的管理缺乏，在一定程度上使梨树地的土壤斥水性较强。甘蔗地连续 3 年留根种植，根系发育密集，土壤有机质含量较高<sup>[19]</sup>，致使土壤斥水性增加。大豆地由于经常需要除草、翻耕、施肥以及灌溉等田间管理措施，土壤有机质减少<sup>[20]</sup>，所以土壤斥水性相应也减少。这也间接说明土壤的耕作会对斥水性产生影响。但是 3 种不同的土地类型在中等水分条件下的 WDPT 值都达到最大值，主要归咎于受土壤斥水性峰值含水量的影响。根据陈俊英等<sup>[21]</sup>研究表明，黏性土的土壤斥水性峰值含水量在  $0.1 \sim 0.2 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  之间，当土壤含水量低于峰值，土壤含水量的增加而斥水性相应增大，在峰值时斥水性达到最大；当土壤含水量高于峰值，土壤斥水性随着含水量增加而相应减小，这与本研究结果相一致。

从表 3 可知，3 个试验区的块金值基本上都小于偏基台值，这表明土壤斥水性空间变化，主要是由土壤基本属性、地形条件、气候变化等非人为的结构因素引起。在岩溶区土壤含水量对降水的响应十分强烈<sup>[22-23]</sup>，从而说明降水等非人为因素对土壤斥水性的空间变异起主导作用。在湿润水分条件

下,大豆地和甘蔗地的块金值高于偏基台值,从块金值和偏基台值的所占权重来看,块金值占有主导作用,导致空间结构比分别为 33.76%、36.96%,呈中等空间相关性。说明大豆地和甘蔗地的土壤斥水性空间变化可能受大气降雨和试验取样尺度、施肥、除草、田间管理等随机因素引起的影响。大豆地从干旱到湿润条件下土壤斥水性空间变化的过程,WDPT 的高阈值先是零散点状分布,然后逐渐相连形成条带状分布,最后向南北两部扩散,使中部低阈值分布面积大。但是整个过程中,WDPT 的高阈值在试验区的西北角分布稳定。从以上可看出大豆地的土壤斥水性空间变化受降雨和土壤含水量的共同制约,同时大豆地平时需要经常进行锄草等田间管理、人为踩踏土壤使土壤压实、翻耕,受人为因素影响过多,对 WDPT 的空间分布影响较大。甘蔗地从干旱到湿润状态过程下的土壤斥水性空间变化与大豆地变化相似,差异在于当甘蔗地到达湿润状态时,东南角的 WDPT 高阈值分布面积大,且高低阈值呈现出明显的东西分布。而整个过程中,WDPT 的高阈值都分布在东部,具有较好的稳定性。出现这个现象的主要原因是甘蔗垄沟种植,垄沟中可存储部分水分,使其在降水以后还有水能入渗到土壤中,并且人为对甘蔗进行捆绑防止倾倒,致使甘蔗地的叶片对土壤表层的覆盖产生变化,土壤斥水性呈现出明显的空间变化。从干旱到中等状态时,梨树地土壤斥水性空间分布图的东北角,由低阈值变化成了高阈值,当达到湿润状态时,图中的北部的低阈值与干旱状态下的北部低阈值相似,说明其有恢复原状的趋势。但在整个过程中,梨树地土壤斥水性高阈值空间分布零散,比其他 2 个试验区的稳定性弱。主要是因为梨树地多年免耕,地表凋落物的覆盖较多、有机质含量较高,并且土壤含水量比较大等共同作用<sup>[24-25]</sup>,因此土壤斥水性的空间分布稳定性最弱。总体而言,3 个试验区在 3 种土壤水分状态下的 WDPT 的空间变化情况差异相对较大,也说明土壤斥水性在人类的活动干扰下,破坏了土壤斥水性空间稳定性,同时在一定时间内土壤有恢复稳定性的能力,这与甘磊等<sup>[26]</sup>的研究相一致。

本研究以大豆地、梨树地、甘蔗地土壤表层的土壤斥水性作为研究对象,利用地统计学中的半方差函数方法,分析和探讨岩溶地区 3 种不同土地利用方式下土壤斥水性的空间变化,试验结果表明:在干旱和湿润水分条件下,土壤斥水性的大小与土壤含水量、有机质含量的变化一致,但是在中等水

分条件下,WDPT 均值大豆地高于甘蔗地,并且 3 个试验区的滴水入渗持续时间都达到最大。说明土壤含水量、土壤有机质含量是影响土壤表层土壤斥水性变化的重要因子,耕作方式也在一定程度上影响土壤斥水性变化。根据 3 种土壤水分状态下 WDPT 的地统计分析结果看出,3 个试验区的空间结构比基本上大于 75%,空间相关性较强。结构因素和随机因素共同影响土壤斥水性的空间变化,包括大气降水、土壤有机质含量、地表覆盖物的多少以及田间管理行为等因素,在不同条件下他们各自占有的权重不同。在土壤斥水性的高阈值空间分布上,甘蔗地的稳定性比大豆地强,而梨树地因长期免耕,其空间稳定性最弱。研究结果说明人为活动会干扰土壤斥水性空间稳定性,但土壤本身仍具有恢复其空间分布稳定性的能力。

#### 参考文献:

- [1] YANG BANGJIE, BLACKWELL P S, NICHOLSON D F. Modeling heat and water movement in a water repellent sandy soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33 (4): 351—359.
- [2] BACHMANN J, HORTON R, PLOEG R R, et al. Modified sessile drop method for assessing initial soil-water contact angle of sandy soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64 (2): 564—567.
- [3] 陈俊英, 张智韬, 杨飞, 等. 土壤的斥水性和含水量变化关系的数学模型 [J]. *灌溉排水学报*, 2009, (6): 35—38.
- [4] MARÍ A RODRÍGUEZ-ALLERES, ESTHER DE BLAS, ELENA BENITO. Estimation of soil water repellency of different particle size fractions in relation with carbon content by different methods [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 378: 147—150.
- [5] MASAMI FUTAMATA, XIAOHUI GAI, HIDENOBU ITOH. Improvement of water repellency homogeneity by compound fluorine carbon sprayed coating and silane treatment [J]. *Vacuum*, 2004, 73: 519—525.
- [6] WAHL N A, BENS O, SCHAFER B. Impact of changes in land-use management on soil hydraulic properties: Hydraulic conductivity, water repellency and water retention [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2003, 28 (33): 1377—1387.
- [7] GHADIM A K. Water repellency: a whole-farm bio-economic perspective [J]. *J Hydrol*, 2000, 231/232: 396—405.
- [8] 孙棋棋, 刘前进, 于兴修, 等. 沂蒙山区桃园棕壤斥水性对理化性质的空间响应 [J]. *土壤学报*, 2014, (3): 648—655.
- [9] 郭丽俊, 李毅, 李敏, 等. 盐渍化农田土壤斥水性与理化性质的空间变异性 [J]. *土壤学报*, 2011, (2): 277—285.
- [10] LETEY J. Measurement of contact angle, water drop penetration time, and critical surface tension [C] // DeBano L F and Letey J (Eds.), *Water repellent soils-Proceedings of the Symposium on Water Repellent Soils*. CA: University of

- California Riverside, 1969: 43—47.
- [11] 李亮亮, 依艳丽, 凌国鑫, 等. 地统计学在土壤空间变异研究中的应用 [J]. 土壤通报, 2005, (2): 265—268.
- [12] CAMBARDELLA C A, MOORMAN, et al. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils [J]. Soil Sci Soc Am J, 1994, 58: 1501—1511.
- [13] 杨昊天, 刘立超, 高艳红, 等. 腾格里沙漠沙丘固定后土壤的斥水性特征研究 [J]. 中国沙漠, 2012, (3): 674—682.
- [14] DOERRA S H, THOMAS B A D. The role of soil moisture in controlling water repellency: new evidence from forest soils in Portugal [J]. Journal of Hydrology, 2000, 231—232: 134—147.
- [15] 李子忠, 吴延磊, 龚元石, 等. 内蒙古草原土壤斥水性的季节变化 [J]. 干旱地区农业研究, 2010, (2): 208—213.
- [16] BIRDSONG E B A, DEKKER L W, SCHOUTE J F T. Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure [J]. Geoderma, 1993, 56 (1/4): 105—118.
- [17] HUMBERTO BLANCO CANQUI, LAL R. Extent of soil water repellency under long-term no-till soils [J]. Geoderma, 2009, 149 (1—2): 171—180.
- [18] 霍颖, 张杰, 王美超, 等. 梨园行间种草对土壤有机质和矿物质元素变化及相互关系的影响 [J]. 中国农业科学, 2011, (7): 1415—1424.
- [19] 李青山, 王冬梅, 信忠保, 等. 漓江水陆交错带典型立地根系分布与土壤性质的关系 [J]. 生态学报, 2014, (8): 2003—2011.
- [20] 陈俊英, 张智韬, 汪志农, 等. 土壤斥水性影响因素及改良措施的研究进展 [J]. 农业机械学报, 2010, (7): 84—89, 83.
- [21] 陈俊英, 吴普特, 张智韬, 等. 土壤斥水性对含水率的响应模型研究 [J]. 农业机械学报, 2012, (1): 63—67, 82.
- [22] GAN L, PENG X, PETH S, et al. 2012b. Effects of grazing intensity on soil water regime and flux in Inner Mongolia Grassland, China [J]. Pedosphere, 22 (22): 165—177.
- [23] 张继光, 苏以荣, 陈洪松, 等. 典型岩溶洼地土壤水分的空间分布及影响因素 [J]. 生态学报, 2014, (12): 3405—3413.
- [24] 庄恒扬, 刘世平, 沈新平, 等. 长期少免耕对稻麦产量及土壤有机质与容重的影响 [J]. 中国农业科学, 1999, (4): 41—46.
- [25] 甘磊, 马蕊, 彭扬建, 等. 不同放牧强度下羊草和大针茅草原土壤含水量的空间变化 [J]. 生态环境学报, 2015, (8): 1274—1279.
- [26] 甘磊, 陶涣壮, 张静举, 等. 桂林地区不同土地利用方式下土壤热容量空间变化的研究 [J]. 西南农业学报, 2016, (2): 368—373.

(责任编辑：林海清)