

# 喀斯特地区不同土地利用方式对土壤饱和导水率的影响

蔡路路, 刘子琦, 李 渊, 余 逍, 景建生

(贵州师范大学 喀斯特研究院 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001)

**摘 要:**研究不同土地利用方式的土壤饱和导水率( $K_s$ )特征及其影响因素,对于准确了解喀斯特地区的土壤水文过程、水土保持效应具有重要的意义。为揭示喀斯特地区不同土地利用方式对  $K_s$  的影响,测定了 0—50 cm 土层的土壤饱和导水率、容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、毛管持水量、田间持水量、土壤含水量和有机质,并对  $K_s$  的影响因子进行了相关分析。结果表明:不同土地利用方式的  $K_s$  随着土层深度的增加而呈先增加后降低的变化特征,且在 10—20 cm 显著高于其他土层( $p < 0.05$ )。不同土地利用方式土壤的平均  $K_s$  介于 6.41~7.37 m/d,由大到小依次为花椒地>金银花地>荒地>玉米地,其中花椒地显著高于玉米地( $p < 0.05$ )。土壤理化性质对  $K_s$  具有不同程度的影响,相关分析结果表明:土壤容重、总孔隙度、非毛管孔隙度和有机质均与  $K_s$  呈极显著相关( $p < 0.01$ ),通径分析进一步表明,非毛管孔隙度是影响该区  $K_s$  最重要的土壤因子。研究有助于了解喀斯特地区不同土地利用方式的土壤水文过程,为喀斯特地区生态建设及生态服务评价提供理论依据。

**关键词:**饱和导水率;非毛管孔隙度;土地利用方式;喀斯特地区

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)01-0119-07

## Effect of Different Land Use Types on Soil Saturated Hydraulic Conductivity in Karst Areas

CAI Lulu, LIU Ziqi, LI Yuan, YU Xiao, JING Jiansheng

(School of Karst Science, State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

**Abstract:** It is of great significance to study the characteristics of saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ) and its influencing factors in different land use types with respect to accurately understand the soil hydrological process and soil and water conservation effects in karst areas. In order to reveal the effect of different land use types on  $K_s$  in karst areas, the soil saturated hydraulic conductivity, bulk density, total porosity, capillary porosity, non-capillary porosity, capillary water capacity, field water capacity, soil water content and soil organic matter in soil layer of 0—50 cm were measured, and the correlation analysis of the influencing factors on  $K_s$  was carried out. The results showed that  $K_s$  of different land use types increased at first and then decreased with the increase of soil depth, and the  $K_s$  of 10—20 cm layer was significantly higher than that of other soil layers ( $p < 0.05$ ); the average  $K_s$  of soil in different land use types ranged from 6.41 m/d to 7.37 m/d, and decreased in the order: *Zanthoxylum bungeamun* field > *Lonicera japonica* field > Wasteland > Maize field,  $K_s$  of prickly ash field was significantly higher than that of the wasteland ( $p < 0.05$ ). Soil physical and chemical properties have different degrees to influence  $K_s$ . Correlation analysis shows that soil bulk density, total porosity, non-capillary porosity and soil organic matter are all significantly correlated with  $K_s$  ( $p < 0.01$ ). Path analysis further indicates that non-capillary porosity is the most important soil factor affecting  $K_s$  in this area. This study can help understand the soil hydrological process of different land use types in karst areas and provide the theoretical basis for ecological construction and ecological service evaluation in karst areas.

**Keywords:** saturated hydraulic conductivity; non-capillary porosity; land use type; karst area

收稿日期:2019-03-23

修回日期:2019-04-13

资助项目:国家十三五重点研发计划课题“喀斯特高原石漠化综合治理与山地旅游产业技术与示范”(2016YFC0502606);国家自然科学基金“石漠化地区二元水文结构水土—养分流失机制研究”(41761104);贵州师范大学 2017 年博士科研启动项目

第一作者:蔡路路(1995—),男,江西赣州市人,硕士研究生,研究方向为喀斯特生态建设与区域经济。E-mail:cailulugeog@163.com

通信作者:刘子琦(1979—),女,山西五台人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事喀斯特地貌与洞穴、石漠化综合治理与喀斯特环境演变研究。E-mail:124294329@qq.com

饱和导水率 (Saturated hydraulic conductivity,  $K_s$ ) 是水和溶质运移模型的关键参数,影响着土壤水分运移,对土壤水分的入渗、径流和贮藏产生过程起着关键作用<sup>[1-3]</sup>。土壤  $K_s$  受到土壤质地、土壤结构、有机质和坡向等诸多因素的影响<sup>[4-7]</sup>。彭舜磊等<sup>[8]</sup>通过多元逐步回归方法得出容重、非毛管孔隙度是影响不同演替阶段土壤  $K_s$  的主要因子。Jarvis 等<sup>[9]</sup>研究表明  $K_s$  受容重、有机质含量的影响。此外, Yao 等<sup>[10]</sup>指出农业土壤的  $K_s$  除了受有机碳影响因素外,还取决于土地利用、耕作和灌溉水质等管理措施。研究表明,不同土地利用方式会通过耕作方式和植物作用差异改变土壤的水力特性<sup>[4,11]</sup>。Wang 等<sup>[2]</sup>和 Jarvis 等<sup>[9]</sup>认为耕作扰动会破坏土壤的孔隙结构,因而与自然植被相比  $K_s$  更低。自然植被不受耕作影响,根系在土壤中穿插和枯枝落叶覆盖改善土壤结构,提高土壤有机质和孔隙度,增强土壤的渗透性<sup>[12]</sup>。不少学者研究表明,不同土地利用方式的  $K_s$  存在差异,其中容重、有机质及非毛管孔隙度是主要的影响因素<sup>[13-14]</sup>。可见,虽然目前对  $K_s$  开展了大量的研究,但由于影响因素复杂,主要影响因子尚不明确,还有待进一步研究。

喀斯特地区土壤具有成土速率慢、土层薄、土被不连续及异质性强等特点<sup>[15]</sup>。由于喀斯特地区土壤直接覆盖在表层岩溶带上<sup>[16]</sup>,  $K_s$  对表层岩溶带的水文过程响应敏感。鉴于  $K_s$  对土壤水文过程的重要性,部分学者对喀斯特地区土壤  $K_s$  开展了研究。Fu 等<sup>[17]</sup>对西南喀斯特小流域的  $K_s$  垂直分布研究表明,碎石含量是主要影响因素,在模拟喀斯特水文时要考虑碎石含量对  $K_s$  的影响。张川等<sup>[18]</sup>对喀斯特坡面表层  $K_s$  研究显示,  $K_s$  具有中等的空间自相关,空间连续性差,沿坡面并没有明显的变化规律,土壤含水量与  $K_s$  呈极显著的负相关。而 Fu 等<sup>[19]</sup>研究则表明,土壤  $K_s$  在喀斯特流域空间内变异程度中等,有较强的空间自相关,非毛管孔隙度和容重是主要影响因子。覃淼等<sup>[20]</sup>研究发现,桂北地区不同土地利用类型的  $K_s$  差异显著,土壤孔隙度比有机质对  $K_s$  影响更大。在喀斯特地区,土壤  $K_s$  的研究主要关注的是流域表层空间差异性及其剖面垂直变化特征,而土地利用方式与植被类型对  $K_s$  影响的研究仍然比较鲜见。

基于以上认识,本研究以花江喀斯特高原峡谷区花椒地、金银花地、玉米地和荒地 4 种土地利用方式的土壤作为研究对象,通过分析土壤剖面  $K_s$  及土壤理化性质特征,探讨不同土地利用方式对  $K_s$  的影响,以期为该区域土壤水分渗透模型构建、土壤水分动态预测提供参考,为西南喀斯特地区石漠化生态恢复及生

态服务评价提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于黔西南贞丰县北盘江镇石漠化治理示范区内,地理坐标为  $25^{\circ}39'01''$ — $25^{\circ}40'06''$ N,  $105^{\circ}39'36''$ — $105^{\circ}38'23''$ E,属典型的喀斯特高原峡谷地貌。碳酸盐岩裸露,地表植被稀疏,地势起伏大,海拔 600~1 200 m。研究区年平均气温  $18.4^{\circ}\text{C}$ ,夏秋湿热,冬春暖干,年均降水量 1 100 mm,但季节分配不均,集中在 5—10 月,属半亚热带季风湿润气候。土壤以石灰岩、泥灰岩为成土母质的石灰土为主,基岩裸露率高达 70%,但因成土速率慢、土流失严重,该区土层浅薄。主要植被有花椒 (*Zanthoxylum bungeamun*)、金银花 (*Lonicera japonica*)、核桃 (*Juglans regia* L.) 和构树 (*Broussonetia papyrifera* L.) 等。主要土地利用方式有花椒地、金银花地、玉米地和荒地,其中玉米为翻耕的耕作方式,花椒地、金银花地和荒地均为免耕。

### 1.2 试验方法

2018 年 4 月 11 日至 4 月 15 日,在研究区内选择花椒地、金银花地、玉米地和荒地 4 种土地利用方式的土壤作为研究对象。每种土地利用方式样地内选取 3 个具有代表性的土壤剖面采样。每个剖面按 0—10, 10—20, 20—30, 30—40, 40—50 cm 分层采取原状土和扰动土,每一土层取 3 次重复。原状土采用高 5 cm、体积为  $100\text{ cm}^3$  的环刀采样,扰动土用塑料袋密封带回实验室。用定水头法测定土壤饱和导水率<sup>[21]</sup>,用环刀法测定、容重、田间持水量,用浸水法和环刀法测定土壤的总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、毛管持水量<sup>[22]</sup>,土壤有机质采用重铬酸钾加热法测定。表层土壤的渗透系数根据 van Genuchten 模型原理<sup>[23]</sup>,利用美国 Meter 公司在华盛顿州普尔曼生产的渗透计 (mini Disk Infiltrometer) 现场测定。根据土壤类型将吸力率设为 2 cm,每隔 30 s 记录渗透体积,每个剖面重复 3 次。土壤的渗透系数 ( $K$ ) 根据下面的公式计算:

$$K = C/A$$

式中:  $C$  为累积渗透与时间平方根作图得到的斜率;  $A$  为与 van Genuchten 参数有关的值,对应特定的土壤类型,以及吸力率和渗透计盘半径,本文中  $A$  值为 2.429。

### 1.3 数据处理

运用 Excel 2016 整理数据,利用 SPSS 24.0 对数据进行统计分析,通过单因素方差分析 (ANOVA) 方法,并用 LSD 法进行对比,检验不同土地利用方式的

土壤理化性质差异,饱和导水率在不同土层及不同土地利用方式的差异显著性,且均通过方差齐性检验,最后用 Pearson 相关分析检验饱和导水率与其他理化性质的相关性。图的制作通过 Origin 2018 完成。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质特征

金银花地、玉米地及荒地的土壤容重均随着深度加深而增大,但花椒地呈先减小后增大再减小的变化规律(图 1)。花椒地容重在 10—20 cm 最低,且在 10—50 cm 均低于其他土地。4 种土地利用方式的平均土壤容重介于 1.29~1.40 g/cm<sup>3</sup>,花椒地最低只有 1.29 g/cm<sup>3</sup>,金银花地最高为 1.40 g/cm<sup>3</sup>(表 1)。方差分析显示,花椒地的平均容重显著低于其他土地利用方式( $p<0.05$ ),而金银花地、玉米地和荒地没有显著差异( $p>0.05$ ),说明花椒在改善土壤孔隙方面具有优势。

金银花地、玉米地和荒地的总孔隙度均随深度增加而降低,而花椒地则与其容重变化规律相反,随着深度加深呈先增后减小再增大的变化特征。花椒地土壤容重、总孔隙度均在 10—20 cm 出现变化,可能与该层根系发达以及施加粪肥后在此层富集有关。各土地利用方式的非毛管孔隙度均随土层加深呈先增加后减少的变化规律。毛管孔隙度在 0—30 cm 均随深度增加而递减,而在 30—50 cm 递增。各土地利

用方式总孔隙度均值介于 47.74%~51.62%,其中花椒地最大为 51.62%,显著高于金银花地、玉米地和荒地( $p<0.05$ )。非毛管孔隙度均值在 16.22%~20.76%变化,金银花地较花椒地、玉米地和荒地分别显著低 20.61%,21.87%,17.16%( $p<0.05$ )。毛管孔隙度均值介于 27.49%~31.52%,花椒地与金银花地差别不大,但两者均显著高于玉米地和荒地( $p<0.05$ )。

花椒地、玉米地和荒地的田间持水量、毛管持水量在 0—30 cm,均随着深度增加而降低,而在 30—50 cm 则随深度增加而递增。分层含水量的在垂直方向规律不明显。各土地利用方式的田间持水量、毛管持水量和土壤含水量平均值分别介于 19.64%~22.84%,20.15%~23.58%和 15.47%~17.49%。方差分析显示,花椒地、金银花地的田间持水量、毛管持水量显著高于玉米和荒地( $p<0.05$ ),花椒地的分层含水量均值达 17.49%,显著高于玉米地( $p<0.05$ )。由此可见,花椒地的涵养水源效果最好,玉米地最差。

各土地利用方式的土壤有机质含量均随土层深度增加而降低。有机质含量平均值介于 34.22~39.79 g/kg,花椒地、金银花地、玉米地和荒地分别为 39.79 g/kg,37.41 g/kg、34.22 g/kg 和 38.48 g/kg。方差分析结果表明,玉米地显著低于花椒地、金银花地和荒地( $p<0.05$ ),但花椒地、金银花地和荒地差异不显著( $p>0.05$ )。

表 1 不同土地利用方式的土壤理化性质

土地利用方式	花椒地	金银花地	玉米地	荒地
容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.29±0.01b	1.40±0.02a	1.40±0.01a	1.38±0.02a
总孔隙度/%	51.62±0.19a	47.74±0.48b	47.86±0.24b	48.25±0.35b
毛管孔隙度/%	31.19±1.09a	31.52±0.89a	28.27±0.21b	27.49±0.95b
非毛管孔隙度/%	20.43±0.91a	16.22±1.25b	19.58±0.02a	20.76±1.28a
毛管持水量/%	23.56±0.99a	23.10±1.16a	20.15±0.86b	20.87±0.19b
田间持水量/%	22.84±0.93a	22.41±1.09a	19.64±0.80b	20.32±0.18b
土壤含水量/%	17.49±0.75a	17.02±1.28ab	15.47±1.20b	16.10±0.56ab
有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	39.79±2.59a	37.41±0.49a	34.22±0.90b	38.48±0.98a

注:同行不同小写字母表示不同土地利用方式间差异显著( $p<0.05$ )。

2.2 表层土壤渗透系数

表层土壤的渗透系数( $K$ )见表 2。不同土地利用方式土壤的表层渗透系数差异较大,花椒地、金银花地、玉米地和荒地,分别为 1.02,0.78,0.61,0.97 m/d,变异系数在 0.32~0.47,属于中等变异程度。不同土地利用方式的土壤渗透特征见图 2,土壤的渗透时间与累积渗透量、累积渗透存在良好的线性关系( $R^2=0.99$ ),表明  $K$  值可靠。荒地的渗透量与累积渗透均最高,而玉米地均最低。花椒地的渗透系数最高,可能与土壤非毛管孔隙度大、容重小有利于水分渗透有关。

表 2 表层土壤的渗透系数

土地利用方式	$K$ 均值/(m·d <sup>-1</sup> )	标准差	变异系数
花椒地	1.02	0.32	0.32
金银花地	0.78	0.33	0.32
玉米地	0.61	0.28	0.47
荒地	0.97	0.32	0.33

2.3 饱和导水率垂直变化特征

不同土地利用方式的  $K_s$  随着土层加深,均呈先增加后减小的变化特征(表 3)。同一土地利用方式不同土层的  $K_s$  垂直变化均介于 0.31~19.99 m/d,最大值和最小值均出现在花椒地。4 种土地方式的  $K_s$

均值介于 6.41~7.37 m/d,花椒地最大为 7.37 m/d,玉米地最小仅有 6.41 m/d,花椒地显著高于玉米地( $p<0.05$ )。方差分析结果显示,4 种土地方式的  $K_s$  最大值都出现在 10—20 cm 土层,且均显著高于其他土层( $p<0.05$ )。在 10—20 cm 土层,花椒地  $K_s$

显著高于玉米地( $p<0.05$ ),但在 40—50 cm 又显著低于金银花地( $p<0.05$ ),而金银花地、玉米地和荒地未表现出显著差异( $p>0.05$ )。综上可见,花椒地  $K_s$  最高,渗透性能最好,相比其他土地利用方式,降雨后不易形成坡面径流,有利于防止表层水土的流失。

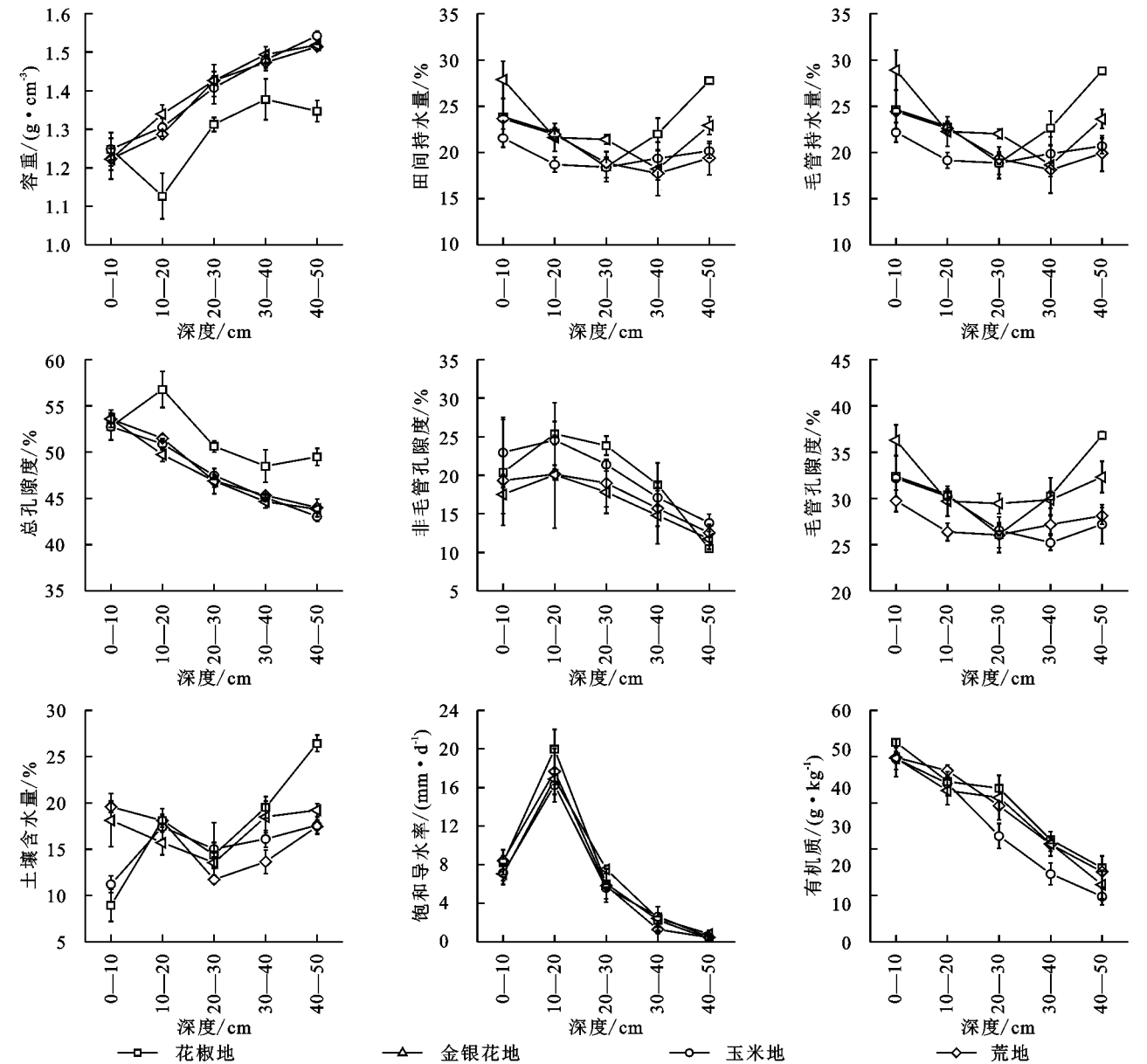


图 1 土壤理化性质的剖面分布特征

表 3 不同土地利用方式的土壤饱和和导水率

土层深度/cm	花椒地/( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ )	金银花地/( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ )	玉米地/( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ )	荒地/( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ )
0—10	8.24±1.30bA	7.04±1.09bA	7.15±0.78bA	8.42±0.49aA
10—20	19.99±2.04aA	16.87±0.55aAB	16.24±1.74aB	17.67±2.40bAB
20—30	6.03±1.55bA	7.52±0.38bA	5.59±1.50bA	5.82±0.23cA
30—40	2.26±1.40cA	2.41±1.22cA	2.61±1.04cA	1.28±0.22dA
40—50	0.31±0.15cB	0.80±0.36dA	0.48±0.15cAB	0.47±0.28dAB
均值	7.37±0.40A	6.93±0.37AB	6.41±0.52B	6.73±0.51AB

注: 同列小写字母表示相同土地利用方式在不同土层之间的差异显著( $p<0.05$ ), 同行大写字母表示相同土层在不同土地利用方式之间的差异显著( $p<0.05$ )。



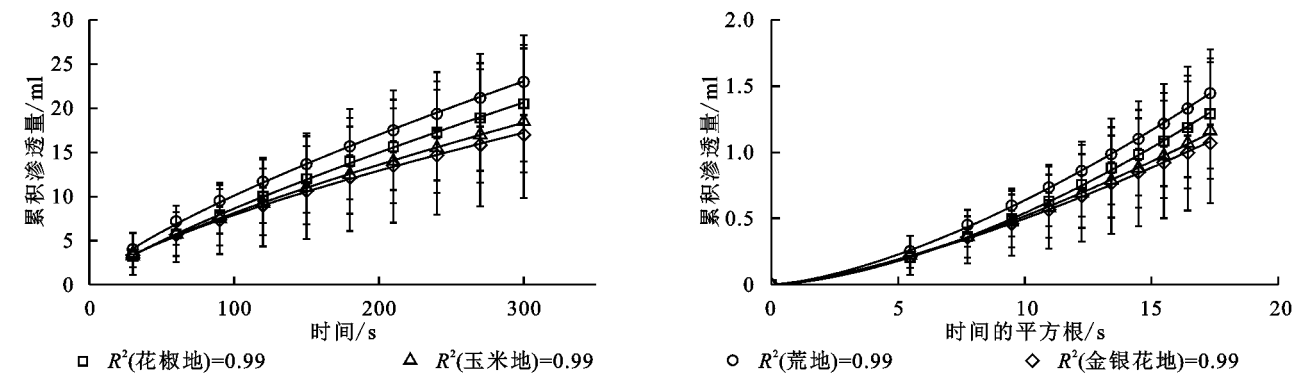


图 2 表层土壤的水分渗透特征

2.4 饱和和导水率与土壤理化性质相关分析

土壤  $K_s$  与土壤容重、孔隙度及有机质等理化性质密切相关。本文选取与  $K_s$  相关的 8 个变量做相关分析,结果见表 4,可知  $K_s$  除了与毛管孔隙度、毛管含水量、田间持水量和土壤含水量与  $K_s$  相关性不显著外( $p>0.05$ ),与其他变量均达到极显著的相关性( $p<0.01$ ),其中容重与  $K_s$  呈极显著负相关( $p<0.01$ ),而总孔隙度、非毛管孔隙度和有机质均与  $K_s$  呈极显著正相关( $p<0.01$ )。呈显著相关的变量相关系数绝对值大小排序依次为非毛管孔隙度>总孔隙度>容重>有机质。此外,由表 4 还可看出其他土壤理化性质两两之间也存在显著的相关关系( $p<0.05$ ),土壤因子有交互作用。单一土壤因子与  $K_s$  的相关性是忽略其他因子影响的前提下得出的,不能真实反映它们的相关性。为此,再选取容重( $X_1$ )、总孔隙度( $X_2$ )、

毛管孔隙度( $X_3$ )、非毛管孔隙度( $X_4$ )、毛管持水量( $X_5$ )、田间持水量( $X_6$ )、土壤含水量( $X_7$ )、有机质( $X_8$ )等 8 个因子作为自变量,饱和和导水率( $Y$ )作为因变量,采用多元逐步回归方法,筛选出重要的影响因素。得到如下方程:

$$Y=-14.806+1.125X_4$$

其中,方程决定系数  $R=0.719$ ,  $F=19.26>F_{0.01}=4.74$ ,  $p<0.001$ ,表明回归方程达到极显著水平。由方程可以得出  $K_s$  的最主要的影响因子是非毛管孔隙度( $X_4$ )。采用通径分析方法,进一步定量分析非毛管孔隙度对  $K_s$  的影响程度。分析发现,非毛管孔隙度直接通径系数为 0.719, Durbin-Waston 统计量为 1.787,表明方程可靠性较强。由直接通径系数为正值可知,非毛管孔隙度的增加会提高土壤的  $K_s$ 。

表 4 土壤饱和和导水率与土壤理化性质的相关性分析

参数	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$Y$
$X_1$	1								
$X_2$	-0.972**	1							
$X_3$	-0.391	0.391	1						
$X_4$	-0.664**	0.664**	-0.428	1					
$X_5$	-0.470*	0.461*	0.951**	-0.310	1				
$X_6$	-0.462*	0.472*	0.962**	-0.317	0.912**	1			
$X_7$	0.078	-0.075	0.497*	-0.477*	0.437	0.436	1		
$X_8$	-0.844**	0.845**	0.195	0.671**	0.258	0.258	-0.416	1	
$Y$	-0.699**	0.706**	-0.032	0.719**	0.028	0.029	-0.168	0.698**	1

注: $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8$  和  $Y$  分别代表容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、毛管持水量、田间持水量、土壤含水量、有机质和饱和和导水率; \* 表示在 0.05 水平上相关性显著; \*\* 表示在 0.01 水平上相关性显著。

3 讨论

土壤  $K_s$  受到有机质、容重和孔隙度等土壤理化性质的影响。通过相关分析发现,有机质与  $K_s$  呈极显著的正相关( $p<0.01$ )(表 4),说明有机质对  $K_s$  具有正向作用。但是,关于土壤有机质对  $K_s$  的影响仍然存在争议。Lado 等<sup>[24]</sup> 研究认为有机质是形成和稳定土壤结构的物质,  $K_s$  随有机质含量的增加而增大。然

而,可能与土壤质地差异有关,姚淑霞等<sup>[25]</sup> 对科尔沁沙地研究发现  $K_s$  与有机质呈显著的负相关关系。此外,彭舜磊<sup>[8]</sup> 等认为有机质提高  $K_s$  受到一定极值限制,高于极值时,  $K_s$  会呈下降趋势。尽管本研究  $K_s$  与有机质存在极显著的相关性( $p<0.01$ ),但只在 10—50 cm 土层,平均  $K_s$  与有机质含量变化趋势一致,主要原因是  $K_s$  受综合因素影响,可能在 0—10 cm 土层,非毛管孔隙度对  $K_s$  的影响起着主导的作用。

本研究  $K_s$  与容重呈极显著负相关 ( $p < 0.01$ ), 和非毛管孔隙度呈现极显著的正相关 ( $p < 0.01$ ), 这与 Fu 等<sup>[19]</sup> 研究结果的相似。本文容重与总孔隙度、非毛管孔隙呈极显著的负相关性 ( $p < 0.01$ )。容重反映的是土壤孔隙特征, 容重越大, 反映孔隙度越小, 土壤性质会通过优先传导水分的非毛管孔隙来影响  $K_s$ <sup>[6]</sup>, 而非毛管孔隙中的水不受束缚可以自由流动<sup>[16]</sup>, 利于水分的渗漏。通径分析表明, 非毛管孔隙度的直接通径系数为 0.719, 是影响  $K_s$  最重要的因素。此外,  $K_s$  与总孔隙度也呈极显著的正相关 ( $p < 0.01$ )。Chen 等<sup>[26]</sup> 研究表明, 由于喀斯特地区土壤容重的差异, 土地利用类型对土壤水力特性有较强的影响。不同土地利用方式下, 植物根系发育引起的土壤质地和结构变化, 是影响土壤  $K_s$  变化的重要因素<sup>[27-28]</sup>。4 种土地利用方式中, 土壤的  $K_s$  均随着深度的增加呈先增加后减小的变化规律 (图 1), 平均  $K_s$  介于 6.41~7.37 m/d, 其中花椒地显著高于玉米地 ( $p < 0.05$ ) (表 3)。因为土壤理化性质在一定程度上受到植被的影响, 植被会改变土壤结构、孔隙度而影响渗水能力。自然植被通过根系和枯枝落叶对表层土壤结构产生影响, 表现在降低容重、提高有机质含量、增加大孔隙数量和增强导水能力<sup>[12]</sup>。我国西南地区树根发育主要集中在浅层土壤<sup>[29]</sup>, 灌木和乔木根系在地表富集, 粗根向深层的横向和纵向发育, 会增加非毛管孔隙度, 有利于水分传导<sup>[27]</sup>。加之花椒、金银花又为浅根性植物<sup>[30-31]</sup>, 荒地常年杂草丛生, 根系在土壤的穿插破坏土壤结构, 根系死亡后形成空洞提高土壤的孔隙度。而玉米地受翻耕除草影响, 植物根系因常受破坏而不发达, 所以花椒地、金银花地和荒地的平均  $K_s$  高于玉米地。与其他学者研究的  $K_s$  最大值出现在表层结果不同<sup>[16]</sup>, 本研究各土地利用方式  $K_s$  最大值均出现在 10—20 cm 土层, 显著高于其他土层 ( $p < 0.05$ )。主要原因是因为该层植被根系发达, 土壤动物活动形成较多孔隙, 受外界影响较小, 有利于保护孔隙。但在 20—50 cm 土层, 因土壤细颗粒向下填充, 容重增大、孔隙度降低, 所以  $K_s$  均随深度加深而降低。

不同土地利用方式的土壤  $K_s$  在 0—10 cm 土层介于 7.04~8.24 m/d (表 3), 与付同刚等<sup>[16]</sup> 研究桂北小流域的结果相近 (8.72 m/d), 但低于张川等<sup>[18]</sup> 研究的喀斯特坡面表层 (13.18 m/d)。但是在 0—10 cm 土层,  $K_s$  在不同土地利用方式上并未表现出显著差异 ( $p > 0.05$ ), 这是因为喀斯特地区表层土壤比深层受到更复杂的影响因素, 如凋落物覆盖、动物活动<sup>[3]</sup>, 这些因素的综合作用会削弱表层植被对饱和导水率的影响。此外, 不同土地

利用方式的耕作方式差异也会对表层土壤  $K_s$  会产生重要影响。研究表明, 耕作后土壤孔隙度会先下降再保持稳定<sup>[32]</sup>, 耕作扰动会破坏土壤结构和非毛管孔隙的连续性, 特别是动物和根的生物孔<sup>[9]</sup>。本研究耕作土壤 (玉米地)  $K_s$  显著低于免耕土壤 (花椒地) ( $p < 0.05$ ), 与 Wang 等<sup>[2]</sup> 的研究结果相似。玉米地长期受到人类活动的干扰, 会导致土壤层板结, 有机质含量、土壤通透性降低<sup>[33]</sup>。此外, 耕作扰动会加快表层细粒向下迁移, 导致孔隙度随着深度加深降低, 从而降低土壤  $K_s$ 。综上所述, 因为花椒地、金银花地和荒地均为免耕的耕作方式, 植被根系发达, 有机质、孔隙度高于玉米地, 所以平均  $K_s$  高于玉米地。不同的研究区  $K_s$  的影响因素差异较大, 主导因子不尽相同, 应当根据该区的土壤理化性质具体分析。

## 4 结论

(1) 不同土地利用方式土壤的  $K_s$  均随着土层深度的加深而呈先增加后降低的变化规律,  $K_s$  最大值均出现 10—20 cm 土层, 显著高于其他土层 ( $p < 0.05$ )。不同土地利用方式土壤的平均  $K_s$  介于 6.41~7.37 m/d, 花椒地最大为 7.37 m/d, 显著高于玉米地 ( $p < 0.05$ )。

(2) 不同土地利用方式的土壤因耕作方式和植物作用的差异, 对  $K_s$  有不同程度的影响。容重、总孔隙度、非毛管孔隙度、有机质均与  $K_s$  有极显著的相关性 ( $p < 0.01$ ), 其中, 非毛管孔隙度是影响本研究  $K_s$  最主要的因子。

(3) 花椒地的  $K_s$  和含水量均高于金银花地、玉米地和荒地, 说明花椒的保持水土效益优于其他植被, 今后在喀斯特地区进行石漠化生态治理时, 建议采用花椒种植的生态经济模式, 可获得良好的生态、经济效益。

### 参考文献:

- [1] Gwenzi W, Hinz C, Holmes K, et al. Field-scale spatial variability of saturated conductivity on a recently constructed artificial ecosystem[J]. *Geoderma*, 2011, 166 (1): 43-56.
- [2] Wang Y, Shao M, Liu Z, et al. Regional-scale variation and distribution patterns of soil saturated hydraulic conductivities in surface and subsurface layers in the loessial soils of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 487: 13-23.
- [3] Chen H, Liu J, Zhang W, et al. Soil hydraulic properties on the steep karst hillslopes in northwest Guangxi, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(1): 371-379.
- [4] Jones A, Stolbovoy V, Rusco E, et al. Climate change in Europe. 2. Impact on soil: A review[J]. *Agronomy*

- for Sustainable Development, 2009,29(3):423-432.
- [5] Kelishadi H, Mosaddegh M R, Hajabbasi M A, et al. Near-saturated soil hydraulic properties as influenced by land use management systems in Koohrang region of central Zagros, Iran[J]. *Geoderma*, 2014,213(1):426-434.
- [6] Eck D V, Qin M, Hirmas D R, et al. Relating quantitative soil structure metrics to saturated hydraulic conductivity[J]. *Vadose Zone Journal*, 2016,15(1):1539-1663.
- [7] 余波,武晓红.太原东山试验林场土壤理化性质及饱和和导水率的坡向分异规律研究[J].*水土保持研究*,2016,23(1):56-61.
- [8] 彭舜磊,由文辉,沈会涛.植被群落演替对土壤饱和和导水率的影响[J].*农业工程学报*,2010,26(11):78-84.
- [9] Jarvis N, Koestel J, Messing I, et al. Influence of soil, land use and climatic factors on the hydraulic conductivity of soil[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013,17(12):5185-5195.
- [10] Yao R J, Yang J S, Wu D H, et al. Evaluation of pedotransfer functions for estimating saturated hydraulic conductivity in coastal salt-affected mud farmland[J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2015,15(4):902-916.
- [11] Jiang Y, Shao M. Effects of soil structural properties on saturated hydraulic conductivity under different land-use types[J]. *Soil Research*, 2014,52(4):340-348.
- [12] 李建兴,何丙辉,湛芸.不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响[J].*生态学报*,2013,33(5):1535-1544.
- [13] 阮芯竹,程金花,张洪江,等.重庆市四面山不同土地利用类型饱和和导水率[J].*水土保持通报*,2015,35(1):79-84.
- [14] 易扬,信忠保,覃云斌,等.黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分物理性质研究[J].*水土保持研究*,2013,20(5):45-49,56.
- [15] Chen H, Liu J, Wang K, et al. Spatial distribution of rock fragments on steep hillslopes in karst region of northwest Guangxi, China[J]. *Catena*, 2011,84(1/2):21-28.
- [16] 付同刚,陈洪松,王克林.喀斯特小流域土壤饱和和导水率垂直分布特征[J].*土壤学报*,2015,52(3):538-546.
- [17] Fu T, Chen H, Zhang W, et al. Vertical distribution of soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors in a small karst catchment in Southwest China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015,187(3):1-13.
- [18] 张川,陈洪松,张伟,等.喀斯特坡面表层土壤含水量、容重和饱和和导水率的空间变异特征[J].*应用生态学报*,2014,25(6):1585-1591.
- [19] Fu T, Chen H, Zhang W, et al. Spatial variability of surface soil saturated hydraulic conductivity in a small karst catchment of southwest China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015,74(3):2381-2391.
- [20] 覃森,翟禄新,周正朝.桂北地区土地利用类型对土壤饱和和导水率和持水能力的影响研究[J].*水土保持研究*,2015,22(3):28-32.
- [21] 刘目兴,吴丹,吴四平,等.三峡库区森林土壤大孔隙特征及对饱和和导水率的影响[J].*生态学报*,2016,36(11):3189-3196.
- [22] 国家林业局.森林土壤分析方法[S].北京:中国标准出版社,1999.
- [23] Carsel R F. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics[J]. *Water Resour Res*, 1988,24(5):755-769.
- [24] Lado M, Paz A, Ben-Hur M. Organic matter and aggregate-size interactions in saturated hydraulic conductivity[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004,68(1):234-242.
- [25] 姚淑霞,赵传成,张铜会.科尔沁不同沙地土壤饱和和导水率比较研究[J].*土壤学报*,2013,50(3):469-477.
- [26] Chen X, Zhang Z, Chen X, et al. The impact of land use and land cover changes on soil moisture and hydraulic conductivity along the karst hillslopes of southwest China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2009,59(4):811-820.
- [27] Yang J, Nie Y, Chen H, et al. Hydraulic properties of karst fractures filled with soils and regolith materials: Implication for their ecohydrological functions[J]. *Geoderma*, 2016,276:93-101.
- [28] Schwen A, Zimmermann M, Bodner G. Vertical variations of soil hydraulic properties within two soil profiles and its relevance for soil water simulations[J]. *Journal of Hydrology*, 2014,516:169-181.
- [29] Nie Y P, Chen H S, Wang K L, et al. Rooting characteristics of two widely distributed woody plant species growing in different karst habitats of southwest China[J]. *Plant Ecology*, 2014,215(10):1099-1109.
- [30] 容丽,熊康宁.花江喀斯特峡谷适生植物的抗旱特征. I:顶坛花椒根系与土壤环境[J].*贵州师范大学学报:自然科学版*,2007,25(4):1-7.
- [31] 刘志,杨瑞,裴仪岱.喀斯特高原峡谷区顶坛花椒与金银花林地土壤抗侵蚀特征[J].*土壤学报*,2019,56(2):218-226.
- [32] Assouline S. Rainfall-induced soil surface sealing: A critical review of observations, conceptual models, and solutions[J]. *Vadose Zone Journal*, 2004,3(2):570-591.
- [33] 李建兴,何丙辉,梅雪梅,等.紫色土区坡耕地不同种植模式对土壤渗透性的影响[J].*应用生态学报*,2013,24(3):725-731.