

喀斯特浅层裂隙土壤垂向渗透性及影响因素

李焱秋^{1,2}, 戴全厚^{1,2,3,4}, 任青青^{1,2}, 朱列坤^{1,2}, 岑龙沛^{1,2}, 兰雪^{1,5}, 伏文兵^{1,6}

(1.贵州大学林学院, 贵阳 550025; 2.贵州大学土壤侵蚀与生态修复研究中心, 贵阳 550025;

3.山地植物资源保护与种质创新教育部重点实验室, 贵阳 550025; 4.山地生态与农业生物工程协同创新中心,

贵阳 550025; 5.贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550025; 6.贵州华保环境技术咨询有限公司, 贵阳 550025)

摘要:为探究喀斯特浅层裂隙所赋存土壤各土层渗透性特征及影响因素,测定了喀斯特典型的浅层裂隙中赋存土壤 0—10, 10—20, 20—30, 30—50, 50—70, 70—100 cm 土层的饱和导水率、机械组成、容重、非毛管孔隙度、毛管孔隙度、总孔隙度和有机碳含量等土壤属性。结果表明:(1)喀斯特浅层裂隙中各土壤属性均随着土层深度变化呈现出递增或递减的趋势,其中容重、黏粒含量、毛管孔隙度均随着土层深度而增长,饱和导水率、有机碳、非毛管孔隙度等土壤属性随土层深度的变化规律相反,呈递减趋势。(2)喀斯特浅层裂隙中土壤饱和导水率变异系数高于非喀斯特地区,且随土层深度变化呈波动增长趋势;其随土层深度变深而减小的趋势可用对数函数进行模拟($R^2=0.946\ 2$)。(3)通过 Pearson 相关性分析,裂隙中所赋存土壤的饱和导水率除了与机械组成中黏粒含量、粉粒含量为显著性相关($P<0.05$),与砂粒含量相关性不显著以外($P>0.05$),与其余各土壤属性均呈极显著性相关($P<0.01$),且非毛管孔隙度相关性最高($P=0.898$)。浅层裂隙土壤非毛管孔隙是影响其渗透性的主要因子,而裂隙中深层土壤拥有较多善于贮存植物所需水分的毛管孔隙。因此,对于土地资源匮乏的喀斯特地区,充分合理利用裂隙中深层土壤的水分成为今后研究的重点。研究结果可为喀斯特地区水分运移、石漠化治理及植被恢复提供科学依据。

关键词:喀斯特; 裂隙; 渗透性; 土壤属性; 相关性分析

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)03-0150-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.03.023

Vertical Permeability of Karst Shallow Fissure and Its Influencing Factors

LI Yanqiu^{1,2}, DAI Quanhong^{1,2,3,4}, REN Qingqing^{1,2},

ZHU Liekun^{1,2}, CEN Longpei^{1,2}, LAN Xue^{1,5}, FU Wenbing^{1,6}

(1.College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025; 2.Research Center for Soil Erosion and Ecological

Restoration, Guiyang 550025; 3.Key Laboratory of Mountain Plant Resources Conservation and Germplasm

Innovation, Ministry of Education, Guiyang 550025; 4.Collaborative Innovation Center of Mountain Ecology and

Agricultural Bioengineering, Guiyang 550025; 5.School of Geography and Environmental Sciences, Guizhou Normal

University, Guiyang 550025; 6.Guizhou Huabao Environmental Technology Consulting Co., Ltd., Guiyang 550025)

Abstract: By measuring the saturated hydraulic conductivity, mechanical composition, bulk density, non-capillary porosity, capillary porosity, total porosity, organic carbon content and other soil properties of Karst shallow fissure soil (0—10, 10—20, 20—30, 30—50, 50—70, 70—100 cm), the permeability characteristics and influencing factors of various soil layers in Karst shallow fissures were studied. The results showed that: (1) Soil properties in Karst shallow fissures showed an increase or decrease trend with the change of soil depth, in which the bulk density, clay content and capillary porosity increased with the change of soil depth, while the change trends of the saturated hydraulic conductivity, organic carbon and non-capillary porosity with the depth of the soil layer were opposite. (2) The variation coefficient of soil saturated hydraulic conductivity was higher than that in non-Karst area, and it showed an volatility growth trend with the change of soil layer. At the same time, the trend of decreasing with the depth of soil layer could be simulated by logarithmic function ($R^2=0.946\ 2$). (3) Pearson correlation analysis showed that the saturated hydraulic conductivity of the soil in the fissures was significantly related to the clay content and silt content in the mechanical

收稿日期:2019-10-11

资助项目:国家自然科学基金项目(41671275);国家重点研发计划项目(2016YFC0502604);贵州省高层次人才项目(黔科合平台人才[2018]5641);贵州省重大专项(黔科合重大专项字[2016]3022号);贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2017]5788);贵州省科学技术基金项目(黔科合 LH 字[2014]7060号)

第一作者:李焱秋(1995—),男,贵州安顺人,硕士研究生,主要从事土壤水文及石漠化治理研究。E-mail:815350799@qq.com

通信作者:戴全厚(1969—),男,陕西长武人,博士,教授,博士生导师,主要从事喀斯特水力侵蚀与生态恢复重建研究。E-mail:qhdairiver@163.com

composition ($P<0.05$), but was not related to the sand content ($P>0.05$), and was significantly related to other soil properties ($P<0.01$), and the non-capillary porosity had the highest correlation ($P=0.898$). Non-capillary pore of shallow fissured soil was the main factor affected its permeability, and deep fissured soil had more capillary pore which was good at storing water needed by plants. Therefore, in Karst areas which is lack of land resources, it will be the research focus in the future to make full and rational use of water distribution in deep soil of fissures. The results of this study could provide scientific basis for water transport, rocky desertification control and vegetation restoration in Karst areas.

Keywords: Karst; fissure; permeability; soil properties; correlation analysis

在特殊的地质背景、强烈岩溶作用以及近代人类不合理的开发作用下使得我国西南喀斯特地区水土流失严重,形成了土壤流失殆尽、基岩裸露的石漠化现象^[1-3]。而作为水土流失重要驱动力的水分在降雨后通过浅薄土壤层的同时并未被植被所吸收利用,而是通过地下裂隙、岩溶管道排泄,最终造成这一地区地表水渗漏严重,水资源利用不充分而粮食减产的现象^[4]。有研究^[5]表明,水分进入地下水系统途径的地下裂隙、岩溶管道常由于地表土壤在重力、水力作用下通常会通过蠕滑、错落等侵蚀方式所填充,而填充进入裂隙的土壤不仅在一定程度上减缓了水分进入地下水系统的速率,还能为植被生长发育提供所需水分、养分等物质^[6-8],具有改良小生境、减缓地下漏失与水分排泄速率的功能。由此可见,对浅层裂隙土壤渗透能力及基本属性研究具有重要的科学意义。

目前,国内专家、学者对喀斯特地区土壤渗透能力已经进行了大量研究,取得了一定的成果。徐勤学等^[9]已经对喀斯特地区灌木林地和梯田旱地不同土层的人渗过程进行研究,同时分析了影响入渗的因素,并用不同入渗模型对其过程进行拟合;王发等^[10]通过亮蓝染色试验探讨了喀斯特洼地中土壤优先流特征;张笑楠等^[11]从土地利用类型探究了喀斯特坡面对土壤水分的影响;张川等^[12]则从坡面尺度探讨了渗透系数和容重的空间异质性。现有研究^[13]已经明确指出,土壤渗透系数随土层增加而呈下降趋势,且学者们^[12-17]已经明确了有机碳含量、容重、土壤机械组成、孔隙度与土壤渗透系数之间的关系,但研究对象集中于地表土壤。目前已有学者^[7,18-20]对裂隙的形态特征进行了相关的分类,但对于漏失所填充的浅层裂隙土壤的属性特征及渗透性的相关研究仍处于起步阶段,且多趋向于化学及土壤颗粒特征分析,裂隙中各土层渗

透能力及影响因素尚处于空白阶段。本研究通过测定浅层裂隙土壤不同土层饱和导水率,并结合土体自身属性,研究了裂隙中赋存土壤渗透能力垂向分布特征及影响因素,研究结果可为喀斯特地区植被恢复、水分传导机制及水文模型提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省安顺市西秀区(25°56′—26°27′N, 105°44′—106°21′E)。全区人口 76.9 万人,气候类型为北亚热带季风湿润气候,太阳辐射总量为 217.94~371.70 kJ/cm²,年降水量 1 334.6 mm,4—9 月降水量占全年降水量 80%。全区土地面积 1 740 km²,其中岩溶区面积为 1 575.47 km²,占全区总面积的 92.13%。乔木主要有木兰(*Magnolia denudata*)、安顺润楠(*Machilus cavaleriei*)、柏木(*Cupressus funebris*)等;灌木主要有喜树(*Camptotheca acuminata*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)、野花椒(*Zanthoxylum simulans*)和青篱柴(*Tirpitzia sinensis*)等。

1.2 研究方法

本研究于 2018 年 11 月至翌年 1 月开展。由于浅层岩溶裂隙的隐蔽性,选取研究区内由开发建设项目挖掘露出地表的 5 条浅层岩溶裂隙剖面作为研究对象(表 1)。首先,为减小枯枝落叶层对土样的影响,在清理完裂隙上部生长植被后先用铲子轻轻铲出表层枯枝落叶及土壤,之后再对裂隙中赋存的土壤进行不同深度土层(0—10, 10—20, 20—30, 30—50, 50—70, 70—100 cm)取样,每层打入 3 个环刀作为重复,用以测定饱和导水率、容重和孔隙度等指标,并用自封袋将各层土样带回室内测定有机碳含量和土壤机械组成。

表 1 样地及裂隙基本特征

裂隙编号	地理坐标	海拔/m	裂隙形状	裂隙宽度/cm	植被
I	26°19′50.8″N, 106°08′54.6″E	1342	“V”形	51.5±21.5	野蔷薇(<i>Rosa multiflora</i>)
II	26°19′50.7″N, 106°08′54.6″E	1343	“V”形	44.5±15.5	野蔷薇(<i>Rosa multiflora</i>)
III	26°19′50.6″N, 106°08′54.2″E	1343	斜长方	44.0±1.0	马桑(<i>Coriaria nepalensis</i>)
IV	26°19′49.5″N, 106°08′55.5″E	1349	斜长方	37.0±1.0	艾草(<i>Artemisia argi</i>)、雀稗(<i>Paspalum scrobiculatum</i>)
V	26°19′49.2″N, 106°08′55.6″E	1349	“V”形	36.0±9.0	插田泡(<i>Rubus coreanus</i>)

1.2.1 土壤机械组成及有机碳含量测定 土壤机械组 成采用鲍氏比重计法测定,并采用国际制土壤颗粒分级

标准分级;土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化法测定。

1.2.2 土壤容重测定 采用烘干法测定各层裂隙赋存土壤的容重,将充满土壤的环刀放入恒温烘箱,105℃烘至恒重。

$$\text{土壤容重}(\text{g}/\text{cm}^3)=\frac{\text{环刀内干土重}}{\text{环刀体积}}$$

1.2.3 土壤孔隙度测定 土壤孔隙度采用环刀法测定:首先将充满土壤的环刀揭去上盖后,在有孔一侧垫上1层滤纸,放入平底容器中,随后对容器中注入略低于环刀口的水分,使环刀充分吸水达12 h以上,并称重;将称重后环刀有孔垫滤纸一侧置于装满干燥石英砂托盘中2 h并称重。

$$\text{最大持水量}(\%)=\frac{\text{浸泡12 h环刀与湿土重}-\text{环刀与干土重}}{\text{环刀内干土重}}\times 100\%$$

$$\text{毛管持水量}(\%)=\frac{\text{干砂上放置2 h后环刀与湿土重}-\text{环刀与干土重}}{\text{环刀内干土重}}\times 100\%$$

$$\text{非毛管孔隙}(\%)=(\text{最大持水量}-\text{毛管持水量})\times \text{土壤容重}$$

$$\text{毛管孔隙}(\%)=\text{毛管持水量}\times \text{土壤容重}$$

$$\text{总孔隙度}(\%)=\text{非毛管孔隙}+\text{毛管孔隙}$$

1.2.4 土壤饱和导水率测定 土壤饱和导水率采用定水头法测定。将采有原状土的环刀有孔洞一侧放置滤纸并用橡皮筋固定后浸水,根据达西定律通过垂直于水流方向的单位土壤截面积的水流速度求得土壤饱和导水率,并在试验结束后统一转换为水温10℃时的饱和导水率。

土壤饱和导水率计算公式为:

$$K_t=\frac{10\times Q\times L}{H\times S},\quad K_{10}=\frac{K_t}{0.7+0.03t}$$

式中:10为cm转化为mm的系数; K_t 为温度为 t (℃)时的土壤饱和导水率(mm/min); Q 为稳定入渗率(cm^3/min); L 为环刀高度(cm); H 为压力水头(cm); S 为环刀横切面积(cm^2); K_{10} 为10℃时的渗透系数(mm/min); t 为水的温度(℃)。

1.3 数据处理

采用Excel 2013和SPSS 22.0软件进行数据统计及对试验数据进行单因素(one-way ANOVA) Duncan 法方差分析和相关性分析(Pearson),采用Origin Lab 9.1软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同土层土壤机械组成

土壤机械组成是研究土壤的基本指标,用来确定土壤质地与结构性,对土壤透气、保肥保水、植物生长等具有显著影响。根据国际制土壤质地分类三角坐标上查得0—20 cm土层土壤属于黏土,20 cm以下土壤均属于壤质黏土。本研究中所采集裂隙赋存土壤垂直分布特征见图1。各层土壤颗粒含量从大到

小排列顺序为黏粒($<0.002\text{ mm}$)>粉粒($0.002\sim 0.02\text{ mm}$)>砂粒($0.02\sim 2\text{ mm}$)。三者均值变化范围分别为黏粒(39.70%~52.45%),粉粒(30.13%~38.45%),砂粒(15.57%~21.85%)。在取样的100 cm土层中,伴随着土层的加深,黏粒含量表现为缓慢递增的趋势,变异系数为0.14~0.25,而粉粒与砂粒含量均呈现递减趋势,粉粒含量变异系数为0.16~0.41,砂粒含量变异系数为0.20~0.43。统计结果显示,20—30,30—50,50—70,70—100 cm 4个土层中土壤黏粒含量无显著性差异($P>0.05$),且均显著高于0—10,10—20 cm土层中土壤黏粒含量($P<0.05$),而粉粒含量则表现出3组差异性显著($P<0.05$)。

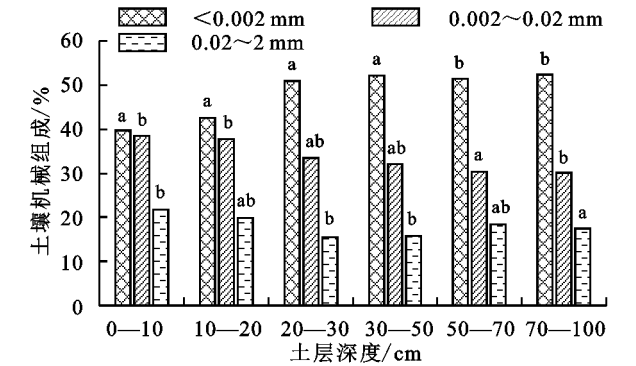
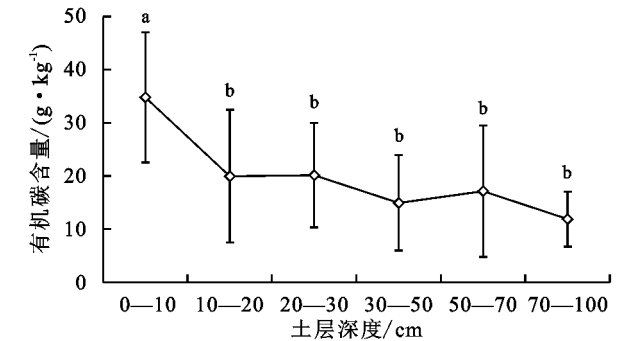


图1 土壤机械组成垂直分布

2.2 裂隙土壤有机碳赋存特征

土壤有机碳是土壤肥力与质地的重要指标,与土壤容重、机械组成、孔隙度共同影响土壤入渗、产流、蒸发、渗漏等多方面的性质,亦是土壤水文变化的主要表征之一^[21-22]。裂隙中赋存土壤有机碳含量均值为11.87~34.78 g/kg,变异系数为0.35~0.72,属中等程度变异,并且有机碳含量随土层深度的增加呈波动性减小趋势。从图2可以看出,0—10 cm土层有机碳含量显著大于其余各层土壤有机碳含量($P<0.05$),10 cm以下各土层之间有机碳含量差异性不显著($P>0.05$),且表层(0—10 cm)有机碳含量分别是10 cm下各土层有机碳含量的1.74,1.73,2.33,2.03,2.93倍。由此可见,表层(0—10 cm)土壤受到枯落物及植物根系分解等因素的影响使得有机碳表聚效果明显。



注:图中不同字母表示不同土层间差异性显著($P<0.05$)。下同。

图2 土壤有机碳垂直分布

2.3 裂隙土壤容重与总孔隙度垂向分布特征

土壤容重与孔隙度均能反映土壤的松紧情况,二者可以通过经验公式或土壤比重等多种方式相互推算。由图 3 可知,地下浅层裂隙中赋存土壤容重随着土层深度逐渐递增,0—10 cm 土层的土壤容重显著低于其余土层的土壤容重($P<0.05$),而土壤容重变异系数随土层深度的变化规律却呈递减趋势,表层(0—10 cm)土壤容重均值(1.01 g/cm^3)明显低于黄土区坡面表层土壤容重均值(1.35 g/cm^3),而 70—100 cm 的底层土壤容重均值也只有 1.18 g/cm^3 ;同时在 0—10,10—20 cm 土层中土壤容重变异系数(0.10~0.13)属于中等程度变异,明显大于 20 cm 以下 4 个土层的变异系数(0.05~0.07),这是由于裂隙中各层土壤受到植物根系分布不均所造成。土层越深,土壤越紧实,最终造成植物根系难以穿透土壤;而较为疏松多孔的表层土壤便于植物根系发育生长的同时也受其影响,导致容重差异性较高。

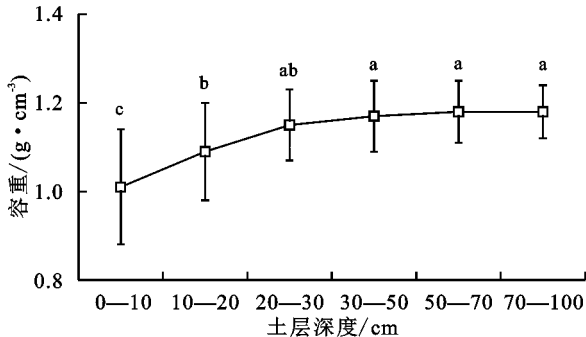


图 3 土壤容重垂直分布

由图 4 可知,不同土层的总孔隙度、非毛细孔隙度和毛细孔隙度均表现出显著差异性($P<0.05$)。土壤孔隙度中毛细孔隙度表现出随着土层的深入逐渐变大,与土壤容重随土层深度变化一致;而非毛细孔隙度与总孔隙度随土层变化规律与土壤容重相反,均随着土层的深入而逐渐变小。总孔隙度数值上等于非毛细孔隙度与毛细孔隙度之和,而取样的各层土壤中非毛细孔隙度的均值范围(3.63%~12.14%)远低于毛细孔隙度的均值范围(46.19%~50.59%),但各层土壤非毛细孔隙度的变异系数(0.43~0.71)明显大于毛细孔隙度与总孔隙度的变异系数(分别为 0.05~0.12,0.04~0.08),并且三者在不同土层的变异系数均随着土层深度的加深而减小。

2.4 土壤饱和和导水率

通过对土层深度与饱和和导水率关系的探讨,裂隙中赋存土壤的饱和和导水率除 50—70 cm 土层以外均随土层深度依次递减(图 5)。通过对数函数进行拟合,拟合方程为 $y=-0.36\ln(x)+1.66$, $R^2=0.946\ 2$ 。各层土壤的饱和和导水率为 $0.022\ 9\sim1.016\ 9\text{ mm/min}$,表层

(0—10 cm)饱和和导水率最高,达 $1.016\ 9\text{ mm/min}$ 。随着土层的加深,各土层标准差呈波动性递减;在变异系数方面,取样的 100 cm 土层均属于强变异程度($CV>1.0$),其中除 70~100 cm 土层($CV=1.97$)外,其余土层饱和和导水率的变异系数 $CV(1.13\sim3.43)$ 随土层深度的加深而逐渐上升,这与付同刚等^[17]对喀斯特小流域土壤饱和和导水率研究结论相似。

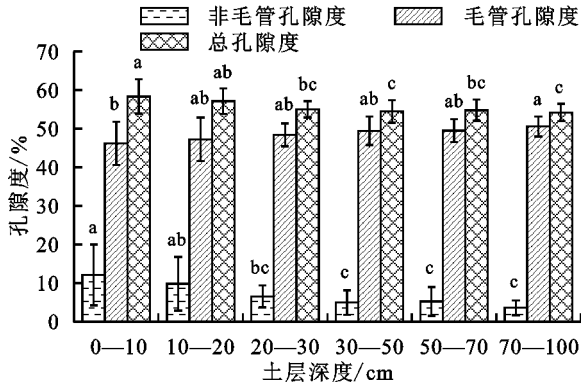


图 4 土壤孔隙度垂直分布

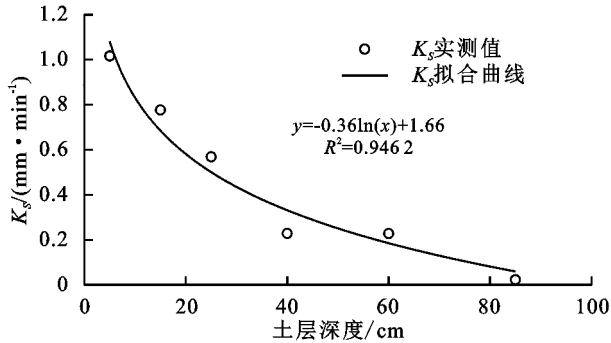


图 5 饱和和导水率随土层深度变化

2.5 土壤渗透性能与土壤属性分析

土壤属性之间具有较强的相关性,由图 6 可知,非毛细孔隙度与饱和和导水率相关性最高,达 0.898,而与饱和和导水率相关性最低的为砂粒,为 0.288;同时从图 6 还可发现,黏粒、毛细孔隙度、容重均和饱和和导水率呈负相关关系,其余呈正相关关系;其中有机碳、容重、非毛细孔隙度、毛细孔隙度和总孔隙度与饱和和导水率呈极显著性相关($P<0.01$),黏粒、粉粒与饱和和导水率呈显著相关($P<0.05$),而砂粒含量与饱和和导水率虽然呈正相关关系,但差异不显著($P>0.05$)。

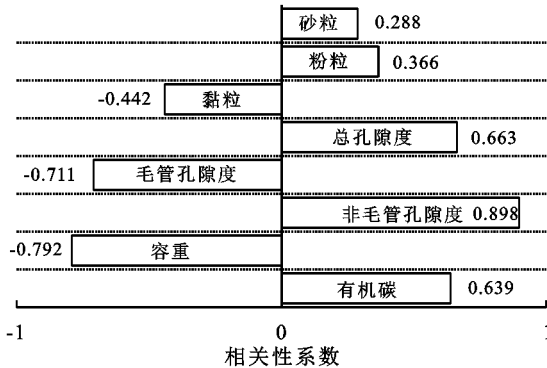


图 6 饱和和导水率与各土壤属性的相关性分析

3 讨论

3.1 喀斯特浅层裂隙赋存土壤属性特征

土壤机械组成是土壤结构体的基本单元,其中各粒径含量不仅与其成土母质有关,更与土壤退化侵蚀程度密切相关^[23]。已有研究^[16,24]表明,土壤质地对土壤入渗能力具有较大影响,同时对入渗系数和入渗指数均有显著性影响。本研究所选取的裂隙中,0—10 cm 土层到 70—100 cm 土层的土壤黏粒含量均值增幅达 32.11%。这一变化规律也造成了砂粒(0.02~2 mm)与粉粒(0.002~0.02 mm)含量随土层深度表现为递减的趋势。由此可见,在这一地区的特殊地质背景影响下形成了浅层裂隙后,其上部土壤在重力、水力作用下填充进入裂隙的过程或填充完毕后表层土壤尚未生长植被之前,土壤中较为细小的黏粒(<0.002 mm)在外力作用下沿着土壤中大孔隙向土层深处堆积^[7,25-26],这造成了下部土壤中有利于水分渗透的非毛管孔隙被填充,且数量减少,而对土壤毛管水运移起着束缚作用且能为植物提供所需水分的毛管孔隙逐渐增加^[27]。这一研究结果与已有研究^[28-29]认为的喀斯特地区土壤持水性弱,不能为植物提供充足水分研究结论相反。这可能是由于赋存土壤的裂隙不易受到蒸腾作用的影响较弱所导致;同时,裂隙土壤善于贮存植物所需水分也为石漠化地区生态修复提供了理论依据。

植物根系活跃程度伴随着土层加深而减小,在植物生长过程中,其根系穿透土壤时候会将原本紧实的土体变得疏松多孔,且根系死亡分解后也增加了土体中的孔隙度,进而形成裂隙中土壤容重随土层深度逐渐递增,总孔隙度的规律与其相反。有研究^[13,30-31]表明,容重的大小不但决定了土壤透气、透水、抗蚀性等多方面特征,同时容重较小的土壤也具有腐殖质多、通透性较高等特点^[32]。这是由于在根系生长发育过程中的分泌物、枯枝落叶与其死亡后分解所形成的腐殖质共同作用下,增加了根系较为活跃区域的上层土壤有机碳含量,造成土壤有机碳表聚现象^[33-35]。同时,喀斯特独特的二元水文结构和破碎的地表小生境导致喀斯特坡地土壤属性在水平和垂直方向上呈现高变异的特征,从而造成了土壤容重、非毛管孔隙度、毛管孔隙度及总孔隙度变异系数随土层深度递减的现象。

3.2 裂隙土壤属性对饱和导水率的影响

随着土层深度增加而减小的饱和导水率 K_s (图 5)与土壤机械组成、孔隙度、土壤容重、有机碳含量关系紧密^[17]。通过对裂隙中各土层赋存土壤饱和导水率与各土壤属性的相关性分析可知,孔径超过 0.1 mm 的非毛管孔隙对裂隙赋存土壤饱和导水率影响最大,作为水分通过土体的主要通道,二者之间相关性达极显著差异($P < 0.01$);而相关性为负数的容重与毛管孔隙度对饱和导

水率则起着抑制作用,作为吸持贮存的毛管孔隙水分,由于受到毛管力的束缚,其主要作用是供给植物根系吸收、叶面蒸腾及土壤蒸散发,并未参与径流与地下水体形成的过程,因此,土壤中毛管孔隙越多,其土体的渗透能力越低,这与已有研究^[13,17]结果相符合。

图 5 表明,裂隙中赋存土壤有机碳含量对饱和导水率起着促进作用。土壤中有有机碳含量的多少影响孔隙度和根系发育等情况,而受到植物根系分泌与枯落物分解补给的表层土壤,其有机质含量高于土层较深的土壤,因此表层有机碳含量较高的土壤对水分的传导能力更强,这与付同刚等^[17]的研究结论相一致。反观土壤机械组成,各层土壤中砂粒、粉粒含量与饱和导水率呈正相关关系,但砂粒含量与饱和导水率却并未达到显著性相关;而黏粒含量与饱和导水率表现出负相关关系,这与土壤填充裂隙过程中黏粒在垂直向下运移有着密不可分的关系。当黏粒垂直向下运移的时候,由于其直径(<0.002 mm)小于非毛管孔隙直径,使得作为土壤中水分运移通道的大孔隙被填充,最终造成黏粒较高的下层土体渗透能力较低的现象^[9],同时本研究发现,在 70—100 cm 土层的土壤渗透能力接近于零,呈现出不导水的现象,表明在喀斯特地区被土壤所填充的裂隙在较深土层处水力连通性较差,裂隙土壤不能成为水分下渗的主要通道。

本研究只探讨了裂隙中各土层渗透能力及其影响因素,但在野外浅层裂隙的岩—土界面处出现的较大空隙却是水分下行的通道之一,这一因素会造成裂隙中岩—土界面处与其中所赋存土壤的入渗速率存在一定差异,故今后应关注浅层裂隙岩—土界面处水分入渗机制^[5];同时,本研究中喀斯特裂隙土壤容重与毛管孔隙度随土层深度的加深而增大,有机质、非毛管孔隙度、总孔隙度则随土层深度呈减小趋势。因此,建议喀斯特地区进行植被造林与石漠化治理时,应优先考虑采用根系发达穿透力强的直根系植物,以达到充分有效利用裂隙中土层越深、毛管孔隙吸持水分越多这一特点,以达到充分利用土壤所贮存水分并通过根系分泌物与其穿透土体等作用进一步改良裂隙赋存土壤的目的。

4 结论

(1)裂隙中赋存土壤的黏粒含量、毛管孔隙度、土壤容重均随着土层加深而变大,而粉粒、砂粒含量、非毛管孔隙度、总孔隙度、有机碳含量及饱和导水率则随土层加深呈递减趋势。除砂粒含量外,各土壤属性均与饱和导水率呈显著相关关系。

(2)地下浅层裂隙赋存土壤的饱和导水率由于受到喀斯特特殊的地质环境影响,使其变异系数高于非喀斯特地区,同时其土层深度变化规律可用对数函数模拟($y = -0.36 \ln(x) + 1.66, R^2 = 0.946$),拟合效

果较高,可为该地区地下浅层裂隙水分运移及水文模型提供一定参照。

(3)喀斯特地下浅层裂隙中通常有植被生长于其中,狭小的空间只为植被提供了有限的水分及根系生长空间,同时随着土层的深入,可被植被利用的土壤水分含量越高。因此,未来研究应着重于深根性、耐干旱植物对裂隙赋存土壤物理特征的改良,从而对石漠化治理起着积极作用。

参考文献:

- [1] 中国科学院学部.关于推进西南岩溶地区石漠化综合治理的若干建议[J].地球科学进展,2003,18(4):489-492.
- [2] 蔡运龙.中国西南岩溶石山贫困地区的生态重建[J].地球科学进展,1996,11(6):84-88.
- [3] Yuan D X. On the environmental and geologic problems of Karst mountains and rocks in the South-West China [J].World Sci-tech R & D,1997,5:41-43.
- [4] 王世杰,季宏兵,欧阳自远,等.碳酸盐岩风化成土作用的初步研究[J].中国科学(D辑),1999,29(5):441-449.
- [5] 张信宝,王世杰,贺秀斌,等.碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失[J].地球与环境,2007,35(3):202-206.
- [6] 罗为群,蒋忠诚,韩清延,等.岩溶峰丛洼地不同地貌部位土壤分布及其侵蚀特点[J].中国水土保持,2008(12):46-49.
- [7] Yan Y, Dai Q, Jin L, et al. Geometric morphology and soil properties of shallow karst fissures in an area of karst rocky desertification in SW China [J]. Catena, 2019,174:48-58.
- [8] 肖兴艳,刘方,姚斌,等.中国西南喀斯特土壤水分研究进展[J].云南农业大学学报(自然科学版),2015,30(6):958-964.
- [9] 徐勤学,李春茂,陈洪松,等.喀斯特峰丛坡地灌木林地与梯田旱地土壤水分入渗特征[J].农业工程学报,2018,34(8):124-131.
- [10] 王发,付智勇,陈洪松,等.喀斯特洼地退耕和耕作土壤优先流特征[J].水土保持学报,2016,30(1):111-116.
- [11] 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.
- [12] 张川,陈洪松,张伟,等.喀斯特坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率的空间变异特征[J].应用生态学报,2014,25(6):1585-1591.
- [13] 文晶,王一博,高泽永,等.北麓河流域多年冻土区退化草甸的土壤水文特征分析[J].冰川冻土,2013,35(4):929-937.
- [14] Gwenzi W, Hinz C, Holmes K, et al. Field-scale spatial variability of saturated hydraulic conductivity on a recently constructed artificial ecosystem[J].Geoderma, 2011,166(1):43-56.
- [15] Gupta A D, Babel M S, Ashrafi S. Effect of soil texture on the emission characteristics of porous clay pipe for subsurface irrigation[J].Irrigation Science,2009,27(3):201-208.
- [16] 梁向锋,赵世伟,张扬,等.子午岭植被恢复对土壤饱和导水率的影响[J].生态学报,2009,29(2):636-642.
- [17] 付同刚,陈洪松,王克林.喀斯特小流域土壤饱和导水率垂直分布特征[J].土壤学报,2015,52(3):538-546.
- [18] 雷俐,魏兴琥,徐喜珍,等.粤北岩溶山地土壤垂直渗漏与粒度变化特征[J].地理研究,2013,32(12):2204-2214.
- [19] 王向栋.典型岩溶地下孔(裂)隙土壤赋存特征及生态水文效应[D].贵阳:贵州大学,2017.
- [20] 靳丽.典型石漠化地下浅层孔(裂)隙土壤养分研究[D].贵阳:贵州大学,2017.
- [21] 李卓,吴普特,冯浩,等.容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J].农业工程学报,2009,25(6):40-45.
- [22] 黄艳丽,李占斌,苏辉,等.黄土高原不同生态治理小流域土壤有机质、容重及黏粒含量的对比[J].应用生态学报,2019,30(2):370-378.
- [23] 景宜然,邓湘雯,邓东华,等.湘西南不同石漠化程度土壤理化性质及相关性分析[J].水土保持学报,2016,30(1):189-195.
- [24] Li Y B, Fan Y W, Liu Y, et al. Influencing factors and simplified model of film hole irrigation [J]. Water, 2017,9(7):543.
- [25] 李阳兵,邵景安,王世杰,等.岩溶生态系统脆弱性研究[J].地理科学进展,2006,25(5):1-9.
- [26] 张笑楠,王克林,张伟,等.典型喀斯特坡地¹³⁷Cs的分布与相关影响因子研究[J].环境科学,2009,30(11):3152-3158.
- [27] 吕刚,王磊,卢喜平,等.不同复垦方式排土场砾石对饱和导水率和贮水能力的影响[J].土壤学报,2017,54(6):1414-1426.
- [28] Schwinning S. The ecohydrology of roots in rocks[J]. Ecohydrology,2010,3(2):238-245.
- [29] Zwieniecki M A, Newton M. Seasonal pattern of water depletion from soil-rock profiles in a Mediterranean climate in southwestern Oregon[J].Revue Canadienne De Recherche Forestière,1996,26(8):1346-1352.
- [30] 郭明明,王文龙,康宏亮,等.黄土高原沟壑区植被自然恢复年限对坡面土壤抗冲性的影响[J].农业工程学报,2018,34(22):138-146.
- [31] 钟韵,费良军,刘乐,等.膜孔灌溉下土壤入渗特征的多因素分析[J].水科学进展,2018,29(4):505-513.
- [32] 吕渡,杨亚辉,赵文慧,等.不同恢复类型植被细根分布及与土壤理化性质的耦合关系[J].生态学报,2018,38(11):3979-3987.
- [33] 彭舜磊,由文辉,沈会涛.植被群落演替对土壤饱和导水率的影响[J].农业工程学报,2010,26(11):78-84.
- [34] 杨轩,李娅芸,安韶山,等.宁南山区典型植物根系分解特征及其对土壤养分的影响[J].生态学报,2019,39(8):2741-2751.
- [35] Prescott C E. Decomposition and mineralization of nutrients from litter and humus[C]//Nutrient Acquisition by Plants. Springer, Berlin, Heidelberg,2005:15-41.