

## 西南喀斯特地区土壤水分研究进展

夏雯<sup>1</sup>, 黄代民<sup>1</sup>, 崔晨<sup>1</sup>, 陈效民<sup>1</sup>, 李孝良<sup>1,2</sup>, 周炼川<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏南京 210095;

<sup>2</sup>安徽科技学院植物科学学院, 安徽凤阳 233100)

**摘要:**喀斯特地区由于其脆弱的生态环境和不合理的土地利用,造成土壤侵蚀退化严重,形成基岩裸露的石漠化景观,严重影响了当地的农业生产和生态环境,受到人们的极大关注。此文概述了中国西南喀斯特地区土壤水分存在的生态地质环境背景以及土壤水分的测定方法、时空变异性、土壤水分特征及土壤水库容特性等诸多方面的研究进展及存在问题,以期为该地区的生态恢复与重建提供一定的理论依据。

**关键词:**喀斯特;石漠化;土壤水分;生态恢复与重建

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

论文编号:2009-1473

### Research Progress of Soil Moisture in Karst Areas of Southwest China

Xia Wen<sup>1</sup>, Huang Daimin<sup>1</sup>, Cui Chen<sup>1</sup>, Chen Xiaomin<sup>1</sup>, Li Xiaoliang<sup>1,2</sup>, Zhou Lianchuan<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing Jiangsu 210095;

<sup>2</sup>College of Plant Sciences, Anhui Science and Technology University, Fengyang Anhui 233100)

**Abstract:** The vulnerable ecological environment and unreasonable land use have caused the soil erosion and rocky desertification in Karst regions, and have seriously affected the local agricultural production and ecological environment, which have received people's great attention. This paper outlined the eco-geological environment background of soil moisture and the progress and the existed problems of the measuring methods, time and space variety, soil water characteristics and storage capacity of soil moisture in Karst areas of Southwest China. The objective of this paper is to offer some theoretical basis for the ecological restoration and reconstruction in the regions.

**Key words:** Karst, rocky desertification, soil moisture, ecological restoration and reconstruction

### 0 引言

世界喀斯特地区面积分布广泛,其中以贵州高原为中心的西南喀斯特地区是世界上喀斯特面积分布最大、最集中、发育最强烈的地区,因其脆弱的生态环境,也被称为喀斯特脆弱生态区<sup>[1,2]</sup>,加上该地区人为干扰及土地不合理利用,形成奇特的石漠化景观。石漠化是指在中国南方湿润地区碳酸盐岩发育的喀斯特脆弱生态环境下,由于人为干扰造成植被持续退化乃至丧失,从而导致水土资源流失,土地生产力下降,基岩大

面积裸露于地表呈现类似荒漠景观的地表覆盖类型<sup>[3-6]</sup>。喀斯特地区石漠化的发展,已经成为制约中国西南地区可持续发展的最严重的生态环境问题<sup>[7]</sup>。

水分运动是岩溶石漠化的驱动力<sup>[8,9]</sup>,土壤对水分的保持和传导能力,影响到岩溶石漠化的发展,有效地调节土壤蓄持和传导水分的能力,是石漠化地区生态恢复与重建的重要措施。在降雨充沛的西南喀斯特地区,由于人为活动造成植被系统遭受破坏,加上土层浅薄、土壤储水能力低以及岩石渗透性强等原因,土壤水

**基金项目:**国家大学生创新实验计划项目资助(编号:081030720);国家973计划项目“西南喀斯特山地石漠化与适应性生态系统调控”子课题“养分生物地球化学循环及其对石漠化过程的响应”(编号:2006CB403205)资助。

**第一作者简介:**夏雯,女,1988年出生,江苏昆山人,研究方向:水土资源利用与管理。通信地址:210095 江苏省南京农业大学(卫岗校区)137信箱, E-mail: xiawen0129@163.com。

**通讯作者:**陈效民,男,1957年出生,江苏张家港人,教授,博士,博士生导师,研究方向:水土资源利用和土壤物理过程。Tel: 025-84396842, E-mail: xmchen@njau.edu.cn。

**收稿日期:**2009-07-20, **修回日期:**2009-08-02。

分的亏缺仍然是生态恢复与重建的主要障碍因子。目前,不少研究者探讨了地质背景对喀斯特生态环境的控制和影响程度<sup>[10-13]</sup>,分析了喀斯特山区土壤水分的运移规律、空间异质性及其主要影响因素<sup>[14-19]</sup>。但是,总体而言,西南喀斯特地区土壤水分研究还处于探索阶段。笔者试图在介绍西南喀斯特地区生态地质环境背景的基础上,概述该地区土壤水分的研究现状和存在问题以及土壤水分的测定方法、土壤水分特征、时空变异性、入渗规律和土壤水库容特征等的研究进展,以期为该地区的生态恢复与重建工作提供参考依据。

### 1 西南喀斯特地区生态地质环境背景

喀斯特地区分布最广的两类岩石是石灰岩和白云岩,二者在岩石裂隙发育程度、风化作用方式、喀斯特形态、土层厚度、碎石含量及风化壳持水性能等方面都有较大差异<sup>[10]</sup>。白云岩的溶蚀残余物质能相对均匀地分布于地表,土层厚度往往大于石灰岩区,但多含碎石且二元水文结构不发育;石灰岩区土粒易聚集在岩体的裂隙和地下孔隙系统中,岩石渗透性较强,土层浅薄且分布极不均匀,空间异质性较大。在无人干扰下,经过长期的自然进化和演替,喀斯特地区形成稳定的顶级森林生态系统景观;但在人为活动的干扰下,尤其是过度垦殖和不合理的开发利用,可导致植被破坏,造成喀斯特地区土壤严重侵蚀退化,形成无土覆盖、岩石裸露的石漠化景观。

中国西南喀斯特地区处于湿润温暖的气候区,碳酸盐岩化学溶蚀作用强烈,有利于岩溶裂隙和管道的发育,形成岩溶地区地上和地下的双层结构,一方面加速地表水向下渗漏,地表土层含水量减少,土质疏松,表层土在强降雨作用下极易流失,从而形成喀斯特石漠化<sup>[20-21]</sup>;另一方面,由于溶蚀造成的孔隙和空间通道,需上覆土壤填充,从而使土壤下陷堆积,造成地表土壤不连续,基岩逐渐裸露,形成典型的岩溶石漠化<sup>[22]</sup>。该地区特殊的地质环境背景对于土壤水分运动及石漠化的发展有着重要的影响,因而了解该地区的生态地质环境,对于改善该地区土壤水分状况、研究该地区石漠化发展机制、指导该地区生态恢复与重建具有一定的意义。

### 2 西南喀斯特地区土壤水分研究概况及存在问题

国际上早期的喀斯特研究以欧洲占主导地位,主要侧重地质成因、地貌过程、水文特征等的研究。近年来国内外对喀斯特地区的研究重点逐渐转变到喀斯特生态系统退化过程与恢复机理、适应性调控机制、生态重建技术与模式的研究。对于喀斯特地区水资源的研究还主要集中于大尺度的水文地质领域及其表层岩溶

带内水文研究,即偏重地下水的研究,而对地表水、地下水转化的中间环节—土壤水的研究则较少,仅有的部分研究主要从土壤水分时空动态变化及其影响因素等层面展开。目前,在喀斯特地区土壤水分的研究中,对土壤的物理性质,土壤持水、入渗、蒸发,土壤水分的测定方法等均有重要影响的碎石常被忽略。根据美国制土壤质地分类及命名标准,碎石是指直径>2 mm的相对独立的、不易破碎的个体颗粒。在西南喀斯特地区含碎石土壤空间变异性大,在该地区进行土壤理化性质、水分运动的研究难度较大,研究结果往往不能代表普遍规律<sup>[23]</sup>。

在中国土壤水分的研究已得到相关专家们的高度重视。目前,西南喀斯特地区土壤水分研究在土壤水分测定方法、土壤水分有效性、碎石对土壤水分入渗的影响、不同利用方式土壤水分含量的差异、土壤水分时空变异性及其主要影响因素、土壤水分沿坡面的分布规律等方面进行了探索,取得了一些进展。但是,由于地形地貌和水文地质结构的复杂多变以及裸露岩石与浅薄土层的相互镶嵌,喀斯特生境具有高度异质性,土壤水分研究在方法和技术手段上还存在着许多不足,还难以揭示不同地貌类型区、不同地质条件、不同退化程度小流域土壤水分的运移规律及调控机理<sup>[24]</sup>。

### 3 西南喀斯特地区土壤水分研究现状与进展

#### 3.1 西南喀斯特地区土壤水分测定方法

目前测定土壤水分的方法大致上可以分为两种<sup>[25]</sup>:一种需要经常变动采样点,如烘干法,微波法、遥感法等。烘干法一直被认为是最经典的方法,它简单易行,对设备要求不严,且具有足够的精度。但是,此方法费时、费力,取样会破坏土壤结构,深层取样困难。在进行连续土壤水分的测定时,必须不断地变动取土点,由于土壤本身的变异性,使测定结果往往发生很大差异,因此在很多情况下不可能长期定点监测土壤水分动态变化<sup>[26-27]</sup>。快速测定法(酒精燃烧法、红外线法、炉烤法等)是烘干法的一种,但采用了一些手段使土样烘至恒重的时间尽可能缩短。

另一种方法是固定点进行测量,即将传感器埋入土中的不同深度固定位置不变,或在土壤中打一测孔,用仪器在这一测孔中定期测定含水量,如中子法、TDR法、 $\gamma$ 射线法等。中子水分测定仪测定土壤水分是较普遍的一种方法,应用范围广,是一种比较理想的方法。利用中子仪测定土壤水分含量,不必采土,不破坏土壤结构,并可定点连续监测,从而得到该样点土壤水分动态运动规律,且快速准确,无滞后现象,测深不限。但中子仪测定时,室内外曲线差异较大,且田间不同的土

壤物理性质,如容重不同、土壤质地不同都会造成曲线较大的移动,研究表明中子仪垂直分辨率较差;没有特殊措施时,不能测定地表(0~20 cm)土壤含水量,并且中子仪价格昂贵,存在潜在的辐射危害<sup>[26]</sup>,同时有研究表明,岩溶地区中子仪的标定必须采用挖掘式取样的野外标定法<sup>[28]</sup>。 $\gamma$ 射线法的优缺点与中子仪法相似,但是它的垂直分辨率比中子仪高。时域反射仪法(TDR)是20世纪60年代末出现的一种确定介电特性的测定方法。TDR仪的垂直分辨率高,特别适用于干旱地区,测定的土壤表层的含水量比中子仪所测定的精度要高的多,一般不需要标定,且无辐射影响。但是,TDR仪价格昂贵,不适宜盐碱土的土壤水分含量的测定,且在测定时测点要埋多个探头<sup>[26,29]</sup>。

喀斯特地区的生境多样,表现为小生境类型及其组合的多样性和其时空变化的无序性。因此,在西南喀斯特地区测定土壤水分含量时,应结合其生境多样性及各种土壤水分测定方法的特点及应用范围,选择适宜的土壤水分测定方法。例如,在西南喀斯特地区洼地,大部分地段土层相对较厚(60~100 cm)且连续性较好,土壤水分测定相对简单,可以采用中子仪、TDR等方法测定土壤水分含量。在喀斯特山区的坡地,土层浅薄(10~30 cm)且不连续,土壤水分一般只能采取烘干法。在以石灰岩分布为主的喀斯特地区,土层连续分布区域因碎石含量较少,土壤含水量可以采用针式TDR(如TRIME-EZ)或烘干法测定。在以白云岩分布为主的喀斯特地区,浅薄土层常含碎石,土壤水分的测定具有较大的难度,只能采用挖坑取土的方法<sup>[24]</sup>。

### 3.2 西南喀斯特地区土壤水分时空变异性

土壤水分有其时空变化规律,一方面土壤水分随季节变化而变化,另一方面土壤水分随土壤深度和水平位置的变化发生相应变化。其主要影响因素有降雨、太阳辐射、植被蒸散、地面蒸发等气候因子;地形、坡度、坡向等地形因子以及平均含水量、土壤厚度、植被类型、植被覆盖度等。在西南喀斯特地区,降水丰富且雨旱季分明,土壤水分含量受降雨的影响而呈现明显的季节变化。不少学者对该地区坡地和洼地的土壤水分时间变化研究也证实了该规律。傅伟等<sup>[30]</sup>对喀斯特坡地不同土地利用类型土壤水分差异性的研究表明,喀斯特坡地土壤含水量主要受降水的影响,分为明显的雨季、旱季变化。张继光等<sup>[16]</sup>的研究表明,在喀斯特地区洼地土壤水分变异受到降雨、植被覆盖度、地形地貌和人为活动等诸多因素的影响而表现出明显的季节变化,其中,旱、雨季的土壤水分分布特征明显不同。

土地利用方式和地形(坡度、坡位、坡向等)被认为是土壤水分空间变异的重要影响因子。刘海隆、蒋太明等<sup>[17]</sup>对溶岩山区旱坡地的研究发现,在不同坡度之间,土壤水分的变化差异极为显著,即坡度不同,土壤水分变化不同。而不同的土地利用方式下,以蔬菜地、小麦—玉米轮作地和裸地三者为研究对象,蔬菜地的土壤水分变化与小麦—玉米轮作地的差异极为显著,而裸地与小麦—玉米轮作地之间没有显著差异,因为不同作物其需水量(植物吸收和蒸发)是不同的。有不少研究者对喀斯特地区坡地和洼地土壤水分的空间变异展开了探索。张继光等<sup>[18]</sup>发现,在喀斯特坡面特定土地利用方式下,表层土壤水分具有明显的空间分布特征和变异规律。沿坡向下土壤水分具有不断减小的变化趋势,而且纵横向土壤水分均呈中等变异,坡面纵向由于特殊的土壤分布和地貌形态使得水分变异较纵向强烈。其中,变异系数越大表示土壤水分变化越剧烈,反之表示土壤水分差异越小。洼地剖面土壤含水量表现为增长型,表层土壤含水量由于受到地表的蒸腾作用而使含水量最低<sup>[31]</sup>,在典型喀斯特峰丛洼地,随土层加深,土壤的平均含水量不断增大,浅层(0~20 cm)土壤水分的变化幅度明显大于深层<sup>[32]</sup>。

### 3.3 西南喀斯特地区土壤水分特征

土壤水分特性是土壤重要的物理性质之一,主要包括土壤自然含水量、田间持水量、凋萎系数、有效水含量,土壤的入渗性能等。土壤容重、孔隙度和有机质含量是影响土壤水分特征参数的主要因素。探明土壤水分特性变化与土壤退化之间的关系,研究土壤水分特性对土壤退化的作用机理,可为防治喀斯特地区土地退化以及退化环境的生态重建提供理论依据。

3.3.1 土壤水分特征曲线及土壤水分的有效性 土壤水分特征曲线揭示了土壤水吸力( $S$ )与土壤含水率( $\theta$ )之间的关系,是反映土壤水分基本特性的曲线。通过对西南喀斯特地区不同石漠化阶段的土壤水分特征的研究表明<sup>[33]</sup>,喀斯特地区土壤水分特征曲线呈先陡后缓的趋势,当土壤水吸力 $S < 300$  kPa时,土壤含水量 $\theta_m$ 下降很快且曲线陡直,土壤水分释放快,释放大;当水吸力 $S$ 超过300 kPa,直至1.5 MPa吸力段时,曲线变得平直,土壤水分释放慢,释放量小。通过对不同石漠化阶段土壤水分特征曲线的比较发现,石漠化对喀斯特土壤水分的蓄持能力及水分的释放性能有明显的影响,未石漠化土壤的蓄水及水分释供能力明显高于石漠化土壤。

土壤水的有效性是指土壤水能否被植物吸收利用及其难易程度,一般把土壤凋萎系数看作土壤有效



水的下限,把田间持水量视为土壤有效水的上限,两者之间的差值即土壤有效水的最大含量<sup>[34]</sup>。一般而言,随着石漠化程度的加深,土壤有效水含量不断减少。在喀斯特地区,林地土壤的总有效含水量显著大于草地土,林地土壤对植物的供水能力高于草地土,这表明退化土壤的供水能力显著下降<sup>[35]</sup>。同时,碎石含量对土壤有效水含量也有一定影响,有研究表明,土壤有效水随碎石含量增加而增加<sup>[36]</sup>。在西南喀斯特地区,虽然有部分学者探讨了不同土地利用方式土壤有效水含量的大小<sup>[37-38]</sup>,但是目前田间持水量的土壤水吸力标准还不统一,具体测定过程中也没有考虑碎石的影响,对该地区土壤水分有效性的研究尚处于初级阶段。

**3.3.2 土壤水分的入渗规律** 土壤渗透性能是土壤导水性能的一个重要指标。在西南喀斯特地区,降雨量丰富且时间集中,良好的土壤渗透性能对于减少地表径流,减少水土流失,防止石漠化的发展具有重要意义。目前,测定土壤入渗速率的主要方法有模拟降雨法、水文法和注水法。影响土壤水分入渗的因素<sup>[39]</sup>有:土壤性质、地形地貌、降雨和耕作管理措施等。其中,土壤的物理性质是影响土壤入渗能力的重要因素,土壤质地越粗,渗透性越强;容重越小,入渗速率越大。

在具有地表地下双层空间结构的喀斯特山区,岩石渗透性较强,降雨入渗率很高。目前,国内外土壤水分入渗规律的研究比较一致地认为,入渗速率随时间呈递减趋势。关于碎石对土壤水分入渗的影响,国外研究较多,而国内虽有部分相关研究,但还处于探索阶段,尤其在西南喀斯特地区。符素华<sup>[40]</sup>认为,土壤中碎石含量的差异,会引起土壤物理性质、化学性质和作物产量的较大差异。喀斯特地区浅薄且连续性差的土层常含碎石,土壤中大量碎石的存在对其入渗速率具有显著的影响。当碎石自由散落土表时,通常会阻止土壤的封闭并增加入渗,但是,如果是镶嵌在土表,它们将参与构成连续的结皮,抑制入渗使得径流量增加。同时,碎石的大小形状对土壤的入渗性能也有一定的影响,球形的碎石越多,土壤的饱和导水率就越低<sup>[41]</sup>。

### 3.4 西南喀斯特地区土壤水库容特征

土壤水库容可以分为无效水库容、有效水库容、通透库容和总库容。土壤完全饱和时的蓄水量是总库容。由凋萎含水量产生的库容是无效水库容,该部分土壤水分是不能被作物利用的。田间持水量和凋萎含水量之间蓄水量为有效水库容。通透库容由总库容减去贮水库容而得,它与土壤水分入渗、蒸发等密切相关,该部分库容只起滞蓄作用,通透库容占总库容的比

例反映了土壤水分在土体中的运动能力。

在西南喀斯特地区,受到石漠化的影响,通透库容减小,加上植被覆盖度低,土壤固持能力弱,因而水分在土体中的下渗能力减弱,当降雨强度稍大时就易饱和,造成土壤冲刷、侵蚀严重,进一步加剧了石漠化的发展。同时,该地区土层浅薄,有效水库容较小,不能满足作物需水要求,因而容易发生干旱<sup>[35]</sup>。有研究表明,贵州中部黄壤的无效水库容比例过高,绝大部分土壤水分是不能被作物利用的。砂粒和粉粒含量增加,孔隙度增大,黄壤有效库容降低;粘粒含量增高,容重增大,黄壤有效库容随之增大<sup>[40]</sup>。由上述结论可以看出,要改善西南喀斯特地区土壤水分供应状况,必须加强土壤改良研究,改善土壤质地与结构,才能逐步减缓该地区石漠化的发展进程。

## 4 结论与展望

(1) 喀斯特地貌在世界分布广泛,因其脆弱的生态地质环境,加上植被破坏和土地不合理垦殖,以土地石漠化为主要特征的环境问题日益严峻,引起国内外学者的广泛关注。随着石漠化的发展,土壤持水性能下降。在西南喀斯特地区虽然降雨丰富,但土壤蓄水能力弱,土壤水分的亏缺仍然是该地区生态恢复与重建的主要障碍因子。要减缓西南喀斯特地区石漠化的发展进程,必须改善该地区土壤水分供应状况,加强土壤改良研究,充分利用该地区降雨丰富、雨热同期的自然条件,种树植草以增强土壤蓄持水分的能力,减少土壤流失。

(2) 目前,西南喀斯特地区土壤水分的研究已取得了一些进展,但由于喀斯特地区水文地质结构的复杂性和小生境类型的多样性,该地区土壤水分运移状况相当复杂,具有诸多异于其它类型区的规律和特点。因此,其研究还处于探索阶段,研究方法和技术手段还存在许多不足。在未来的研究中应进一步突出喀斯特地区土壤水分运动规律的研究,同时注重土壤学、植物学、水文地质学、生态学等学科交叉融合,关注土壤水分含量与石漠化的关系、喀斯特石漠化地区水土流失机理与过程、喀斯特地区水循环动力过程及水文生态效应、植被对土壤水分的影响及其适应性调控机理等方面的研究工作,以实现喀斯特地区水土资源的协调利用和生态恢复与重建。

## 参考文献

- [1] Sweeting M M. Reflections on the development of Karst geomorphology in Europe and a comparison with its development in China [J]. *Z. Geo-morph.*, 1993, 37: 127-136.

- [2] 傅伯杰,刘国华.中国生态区划方案[J].生态学报,2001,21(1):1-6.
- [3] Yuan Daoxian.Rock desertification in the subtropical karst of south China[J].Z Geomorph N F,1997,108:81-90.
- [4] WANG Shijie,Liu Qiming.Karst rocky desertification in southwestern China:geomorphology,land use,impact and rehabilitation[J].Land Degradation and Development,2004,15:115-121.
- [5] 王德炉,朱守谦,黄宝龙.石漠化的概念及其内涵[J].南京林业大学学报(自然科学版),2004,28(6):87-90.
- [6] 李阳兵,王世杰,容丽.中国西南石漠化的若干问题[J].长江流域资源与环境,2003,12(6):593-598.
- [7] 李阳兵,王世杰,容丽.西南岩溶山地石漠化及生态恢复研究展望[J].生态学杂志,2004,23(6):84-86.
- [8] 赵中秋,后立胜,蔡运龙.西南喀斯特地区土壤退化过程与机理探讨[J].地学前缘,2006,13(3):185-189.
- [9] Wang S J,Zhang D F,Li R L.Mechanism of rocky desertification in the karst mountain areas of Guizhou province southwest China[J].International Review for Environmental Strategies,2002,3(1):123-135.
- [10] 李阳兵,王世杰,李瑞玲.不同地质背景下岩溶生态系统的自然特征差异—以茂兰和花江为例[J].地球与环境,2004,32(1):9-16.
- [11] White W B.Karst hydrology:recent developments and open questions[J].Engineering Geology,2002,65:85-105.
- [12] Wang S J,Li R L,Sun C X,et al.How types of carbonate rock assemblages constrain the distribution of karst rocky desertified land in Guizhou Province,PR China:Phenomena and mechanisms[J].Land Degradation and Development,2004,15:123-131.
- [13] 何师意,冉景丞,袁道先,等.不同岩溶环境系统的水文和生态效应研究[J].地球学报,2001,22(3):265-270.
- [14] 陈洪松,傅伟,王克林,等.桂西北岩溶山区峰丛洼地土壤水分动态变化初探[J].水土保持学报,2006,20(4):136-139.
- [15] 张继光,陈洪松,苏以荣,等.喀斯特洼地表层土壤水分的空间异质性及其尺度效应[J].土壤学报,2008,45(3):544-548.
- [16] 张继光,陈洪松,苏以荣,等.喀斯特山区洼地表层土壤水分的时空变异[J].生态学报,2008,28(12):6339-6342.
- [17] 刘海隆,蒋大明,刘洪斌,等.不同土地利用方式对岩溶山区旱坡地土壤水分时空分异的影响[J].土壤学报,2005,42(3):428-429.
- [18] 张继光,陈洪松,苏以荣,等.喀斯特峰丛洼地坡面土壤水分空间变异研究[J].农业工程学报,2006,22(8):54-57.
- [19] 张继光,陈洪松,苏以荣.湿润和干旱条件下喀斯特地区洼地表层土壤水分的空间变异性[J].应用生态学报,2006,17(12):2277-2282.
- [20] 袁春,周常萍,童立强.贵州土地石漠化的形成原因及其治理对策[J].现代地质,2003,17(2):181-185.
- [21] 路洪海,冯绍国.贵州喀斯特地区石漠化成因分析[J].四川师范学院学报,2002,23(2):189-191.
- [22] 周锦忠,吕英娟.石漠化的成因机理与防治对策[J].湖南地质,2003,22(1):43-46.
- [23] 刘建伟.桂西北喀斯特峰丛洼地石质土壤入渗试验研究[D].重庆:西南大学,2008.
- [24] 陈洪松,王克林.西南喀斯特山区土壤水分研究[J].2008,29(6):735-737.
- [25] 逢春浩.土壤水分测定方法的新进展—TDR 测定仪[J].干旱区资源与环境,1994,8(2):69-72.
- [26] 张晓虎,李新.几种常用土壤含水量测定方法的研究进展[J].陕西农业科学,2008(6):115-117.
- [27] 时新玲,王国栋.土壤含水量测定方法研究进展[J].中国农村水利水电,2003(10):85-86.
- [28] 黄保健,甘露,张之涂.岩溶地区中子水分仪的野外标定[J].中国岩溶,2000,19(3):219-223.
- [29] 张学礼,胡振琪,初士立.土壤含水量测定方法研究进展[J].土壤通报,2005,36(1):118-119.
- [30] 傅伟,陈洪松,王克林.喀斯特坡地不同土地利用类型土壤水分差异性研究[J].中国生态农业学报,2007,15(5):61-62.
- [31] 范新瑞,苏维词,鄢贵权,等.黔中典型喀斯特地区土壤水分时空特性分析[J].中国岩溶,2009,28(1):69-72.
- [32] 张继光,苏以荣,陈洪松,等.典型喀斯特峰丛洼地土壤水分时空动态研究[J].农业环境科学学报,2007,26(4):1433-1437.
- [33] 李孝良,陈效民,周炼川,等.西南喀斯特石漠化过程对土壤水分特性的影响[J].水土保持学报,2008,22(5):198-203.
- [34] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [35] 赵中秋,蔡运龙,付梅臣等.典型喀斯特地区土壤退化机理探讨:不同土地利用类型土壤水分性能比较[J].生态环境,2008,17(1):393-395.
- [36] Ingelmo F, Cuadrado S,Ibanez A, et al.Hydric properties of some Spanish soils in relation to their rock fragment content:implications for runoff and vegetation[J].Catena,1994,23:73-95.
- [37] 李阳兵,高明,魏朝富,等.岩溶山地不同土地利用土壤的水分特性差异[J].水土保持学报,2003,17(5):63-66.
- [38] 蒋大明,魏朝富,谢德体等.贵州中部喀斯特地区黄壤持水性能的研究[J].水土保持学报,2006,20(6):25-29.
- [39] 戴智慧,蒋大明,刘洪斌.土壤水分入渗研究进展[J].贵州农业科学,2008,36(5):78-79.
- [40] 符素华.土壤中碎石存在对入渗影响研究进展[J].水土保持学报,2005,19(1):171-175.
- [41] Mehuis G R,Stolzy L H,Letey J,et al,Effects of stones on the hydraulic conductivity of relatively dry desert soils[J].Soil Science Society of America Proceedings,1975,39:37-42.