

西南喀斯特山区土壤水分研究

陈洪松^{1,2}, 王克林^{1,2}

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 湖南 长沙 410125; 2. 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: 西南喀斯特地区是一种受地质背景制约的脆弱生态环境, 具有地表水缺乏、土层浅薄且不连续、植被覆盖率低等基本特征。由于喀斯特山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相当复杂, 具有许多和其它类型区不同的规律和特点。在介绍西南喀斯特山区土壤水分生态环境特征和土壤水分研究现状的基础上, 概述了西南喀斯特山区土壤水分测定方法、有效性、入渗规律、空间变异性等几个方面的研究进展。今后土壤水分研究应以岩石-土壤-植被系统为对象, 注重多学科交叉以及新方法与新技术的应用, 加强喀斯特生态系统各因子的相互作用关系及其对生态过程影响的研究, 重视植被对异质性生境的响应及其适应性调控机理的研究, 以实现喀斯特山区水土资源的协调利用和植被的恢复重建。

关键词: 西南喀斯特地区; 土壤水; 植被恢复

中图分类号: S152, S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-0275(2008)06-0734-05

Soil Water Research in Karst Mountain Areas of Southwest China

CHEN Hong-song^{1,2}, WANG Ke-lin^{1,2}

(1. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan 410125, China;

2. Huanjiang Observation and Research Station for Karst Eco-systems, Huanjiang, Guangxi 547100, China)

Abstract: The karst regions of southwest China are fragile geology-controlled eco-environment, and have the basic characteristics of the shortage of surface water and soil resources and low vegetation coverage. Soil water movement is very complicated due to the complexity of hydrological geological structure and the diversity of small habitats in karst mountainous regions, which has many different characteristics compared with other regions. Based on the introduction of the eco-environmental characteristics of soil water and its research status, some advances on measurement methods, availability, infiltration, and spatial variability of soil water were briefly summarized in karst regions of southwest China. In order to utilize soil and water resources harmoniously and restore vegetation successfully in this region, rock, soil, and vegetation should be considered as a united system, and the intersection of various subjects and the application of new technology and methods should be paid attention to. The further study on soil water should be focused on investigating the mutual relationships of environmental factors and their effects on ecological processes, and understanding the response of vegetation to heterogeneous environment and their adaptable control.

Key words: karst region in southwest China; soil water; vegetation restoration

喀斯特(岩溶)地区是世界上主要的生态脆弱带之一, 其生态环境问题是当今国际地学研究的热点^[1,2]。我国是世界上喀斯特面积最大、分布最广的国家, 其总面积达 344.3 万 km², 主要集中在西南部, 面积约 55 万 km²^[3]。西南喀斯特地区是全球三大喀斯特集中分布区(欧洲地中海沿岸、美国东部、中国西南部)中连片裸露碳酸盐岩面积最大的地区, 集“老、少、边、山、穷”于一体, 面临环境退化和人口密集、经济-社会落后的多重难题^[4]。该地区可溶岩造壤能力低, 长期强烈喀斯特作用产生的水土资源不协调的双层空间结构, 加上近现代人类不合理的土地利用, 导致植被严重破坏, 水土流失不断加剧, 产生了以石漠化为特征的土地退化, 并陷入了“环境脆弱-贫困”的恶性循环, 成为西部大开发战略实施的重点和难点地区, 也维系着我国长江、珠江中下游地区以及大型水利水电设施的生态安全^[5,6]。

在降雨充沛的西南喀斯特地区, 由于缺乏植被系统的调节, 加上土层浅薄、土壤总量少、储水能力低以及岩石渗漏

性强等原因, 土壤水分的亏缺仍然是植被恢复重建的主要障碍因子。因此, 如何进行植被的恢复重建、实现水土资源的协调利用是该地区环境治理和消除贫困的关键。西南喀斯特山区地形地貌复杂多变、小生境类型多样, 景观格局具有高度空间异质性, 导致该地区土壤水分运移相当复杂, 研究难度较大, 具有许多与其它类型区不同的规律和特点^[6]。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^[7-10], 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^[6, 11-15]。但是, 总体而言, 西南喀斯特山区土壤水分研究还处于探索阶段。本文试图在分析西南喀斯特山区土壤水分生态环境特征的基础上, 概述西南喀斯特山区土壤水分研究现状与进展, 以期促进该地区植被恢复重建和生态环境建设进程。

1 西南喀斯特山区土壤水分生态环境特征

西南喀斯特山区土壤水分生态环境受地质背景的制约,

基金项目: 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-08); 国家自然科学基金项目(40501034); 中国科学院“西部之光”人才培养计划项目。

作者简介: 陈洪松(1973-), 男, 湖北通山人, 博士, 副研究员, 研究方向: 土壤物理与水土保持。

收稿日期: 2008-08-10; **修回日期:** 2008-09-10

与复杂多变的地形地貌和类型多样的小生境紧密关联。喀斯特山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(>2mm)含量及风化壳持水性能等方面都有较大差异^[7-9]。白云岩的风化深度和程度都大大超过灰岩,其溶蚀残余物质能相对均匀地分布地表,但多含碎石且二元水文结构不发育;而灰岩区土粒易聚集在岩体的裂隙和地下空隙系统中,岩石渗透性较强,土层厚度往往较浅且分布极不均匀,空间异质性较大。碳酸盐岩风化形成的石灰土,其理化性质有别于地带性土壤,表现为富钙、偏碱性、有效营养元素供给不足且不平衡,质地偏粘,有效水分含量偏低。喀斯特山区土壤与母岩之间界面明显,缺乏过渡层,结合力差,非常容易水土流失。由于碳酸盐岩风化成土作用缓慢,致使这些地区土层瘠薄,一旦流失就很难恢复。

喀斯特山区土壤在较大取样面积呈集群分布,受控于裂隙的空间展布和地貌部位;在较小取样面积呈均匀分布和随机分布,常分布于石沟、石缝等肥沃生境^[7]。降雨资源的再分配及与此相应的土壤资源再分配(通过侵蚀和沉积),是土壤斑块异质性形成的最主要的影响因素。喀斯特环境的土壤可以与石面、石缝、石沟、石洞、石槽、溶洞等组合形成多种小生境类型,即地表土被不连续但可以与地下空间广阔、低水平持续供应养分的生境相结合形成多层生态空间^[7]。由于喀斯特山区气候、地形、地质构造、喀斯特作用、土壤等条件的不同,各圈层发生着地质地貌组合→水文土壤组合→植被和小生境组合结构的作用过程,不同组合结构的喀斯特生态系统具有特殊的功能和圈层的耦合作用,其本底稳定性与脆弱性各异,从而形成不同区域喀斯特生态系统及生境类型的多样性,集中表现为生境类型及其组合多样且时空变化无序^[7]。即使在岩石裸露率较高的情况下,不同生境的组合类型并不相同,相应的生境严酷程度也不相同。部分研究者得出的林、灌、草保水固土功能的差异,可能就与喀斯特地区类型多样的小生境有关^[1],其中地质背景、枯枝落叶层和石生植物(地衣、藻类、苔藓等)的差异可能是重要原因之一^[12,10]。

植物对各种类型小生境的利用特点为喀斯特环境不同岩石裸露率地段采取相应的植被恢复途径、方式提供了理论依据。在土层浅薄的喀斯特山区,植物根系具有穿插岩石吸收裂隙水的功能^[16-18],植被类型、大小及覆盖度主要受喀斯特裂隙的发育程度及规模所控制^[2,7]。在植被的恢复过程中,土壤水分生态环境随植物群落的正向演替发生相应的变化:裸露岩石(风化作用)→地衣植物群落(分泌有机酸腐蚀岩石表面,植物群体参加土壤的聚集和水分含蓄)→苔藓植物群落(聚集土壤能力更强,土壤水分、养分条件改善)→草本植物群落(土壤增厚,土壤蒸发减少,土壤细菌、真菌、小动物活动增强)→木本植物群落(腐殖质层增厚,土壤涵养水分能力增强,植物根系发育,固土能力增强)^[7]。以生物量增长和土壤形成成为纽带,灰岩出露后喀斯特系统演进趋势为石质喀斯特→生物喀斯特→土壤喀斯特→生态系统喀斯特,最终成为以生物活动和土壤媒体过程为主导的喀斯特生态系统^[10]。在稳定的生态系统下,表层带喀斯特作用实质上已成为地质作用与土壤作用、生物作用相融合,有机—无机—生物过程相互作

用的地球表层圈层的藕合。

2 西南喀斯特山区土壤水分研究现状

水分驱动机理和养分循环特征是理解喀斯特生态系统功能,尤其是生态系统生产力及其稳定性的关键基础。随着喀斯特地区以石漠化为主要特征的生态环境恶化日益严峻,国内外对喀斯特地区的研究重点有了明显变化,从原来的侧重地质成因、地貌过程、水文特征的研究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。联合国教科文组织(UNESCO)和国际地质对比计划(IGCP)资助的喀斯特地区生态环境研究计划,从“地质、气候、水文和岩溶的形成(1990-1994)”、“岩溶作用和碳循环(1995-1999)”到“全球岩溶生态系统对比(2000-2004)”、“岩溶含水层与水资源全球研究(2005-2009)”也反映了这一趋势。在我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要》(2006-2020)和“十一五”规划纲要中,也明确将“岩溶生态脆弱区域生态系统功能的恢复重建”列为优先主题之一。在此期间,土壤水分的研究也逐渐得到部分专家学者的关注和重视。以国家自然科学基金为例,近10年来相关的项目主要有:“贵州六盘水岩溶山区石漠化与表层岩溶水循环相关性研究”(蒋忠诚,1999-2001);“喀斯特地区土壤退化过程中土壤水动力机制研究”(杨胜天,2003-2005);“我国西南峰丛山区生态环境调蓄表层岩溶水的功能研究”(蒋忠诚,2006-2008);“西南岩溶山区土-石坡面土壤水分运移及调控机理研究”(陈洪松,2006-2008);“我国西南岩溶地区生态恢复重建的水文响应典型研究”(王腊春,2006-2008);“我国西南岩溶含水层演化机理研究”(袁道先,2007-2009);“基于稳定同位素的喀斯特山地先锋植物水分利用策略研究”(容丽,2009-2011);“岩溶峰丛洼地地区的坡面流研究”(姜光辉,2009-2011);“基于树干液流和稳定氢氧同位素技术确定植物利用表层岩溶水分的研究”(黄玉清,2009-2011)。在新近立项的第一个西南喀斯特地区的国家重点基础研究发展计划“西南喀斯特山地石漠化与适应性生态系统调控”(刘丛强,2006-2011)中,设立的有关土壤水分的课题为“喀斯特地区水循环动力过程及其水文生态效应”(陈喜,2006-2011)。这些项目的实施,无疑极大地推动了喀斯特地区土壤水分研究的相关进展。

目前,西南喀斯特山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与蒸发的影响、不同利用方式(或不同生境)土壤水分含量差异、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部分有益的探索,取得了一些重要进展^[11-15]。近年来,借助于稳定同位素示踪技术,部分研究者还探讨了植物水分利用效率及水分来源,分析了降水、土壤水、地表水、壤中流(裂隙水)、地下水的相互转化关系与转化方式^[20-23]。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许多不足,还难以揭示不同地貌类型区、不同地质背景、不同退化程度小流域土壤水分运移规律及调控机理。

3 西南喀斯特山区土壤水分研究进展

3.1 西南喀斯特山区土壤水分测定方法

在西南喀斯特山区洼地,大部分地段土层相对较厚(60–100cm)且连续性较好,土壤水分测定相对简单,可以采用中子仪、TDR 等常规方法测定土壤水分含量。但是,由于土壤质地粘重,当土壤水分含量较低时,管式 TDR(如 TRIME-T3)因管壁与土壤间空隙较大而导致测量结果可能有较大偏差。而且,当土中碎石含量较多时,中子仪或 TDR 可能需要特殊的标定才能比较准确地测定土壤含水量。在喀斯特山区坡地,土层浅薄(10–30cm)且不连续,土壤水分一般只能采取烘干法(土钻取土)测定,但也有研究者利用中子仪测定风化基岩的供水性能^[18]。在以石灰岩分布为主的喀斯特山区,虽然小生境类型多样,石面、石沟、石缝、石槽等与土面交错分布,但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山区,浅薄土层常含碎石,土壤水分的测定具有较大的难度:针式 TDR 探针因难以以下插而容易折断,普通土钻则常因碎石的存在而难以应用。当碎石含量较多、粒径较大且大口径(直径为 10cm)土钻都不适用时,只能采用挖坑取土的方法来测定土壤含水量。

由于碎石对土壤水分性质有很大的影响,所以在水分测定过程中需要确定地表碎石覆盖率和土中碎石体积含量。按照美国农业部的分级标准^[24],碎石可以分为四大类(表 1)。不过,大部分研究者关注的是砾石(2–75mm)含量,其又可以细分为三级:小(2–5mm)、中(5–20mm)、粗(20–75mm)。在计算碎石地表覆盖率时,一般可以采用计点法或线形交叉法(point-count and/or line-intersect methods)来确定,也可以采用数码摄影的方法通过相关软件计算确定^[24, 25]。在计算土中碎石体积含量时,如果其含量较少且粒径小于 20mm,可以直接采用 200、300cm³ 环刀采样并结合排水法(测定碎石体积)来确定。如果碎石含量较多且粒径大部分为 20–75mm,最好采用挖坑(长、宽 30–50cm,高 10–20cm)采样并结合灌水(或灌沙)法(测定土坑体积)和排水法来确定。如果碎石粒径大于 75mm,由于称重困难,最好采用计点法或线形交叉法估算碎石体积比^[24]。考虑到样点的变异性,可以在 10m×10m 的范围内采集 5 个重复,即四角和对角线交叉点。

表 1 美国农业部碎石分级标准^[24]

形状	分级标准		名称
	分级依据	尺寸 (mm)	
圆球状 立方体 等轴体	直径	2–75	砾石 (pebbles)
		75–250	鹅卵石 (cobble)
		250–600	石头 (stones)
		≥600	大石头 (boulders)
扁平状	长度	2–150	石片 (channers)
		150–380	石板 (flagstones)
		380–600	石头 (stones)
		≥600	大石头 (boulders)

3.2 西南喀斯特山区土壤水分有效性

土壤水分的有效性是指土壤水分能够被植物吸收利用的难易程度,反映了不同类型土壤的抗旱性能。喀斯特山区土壤质地粘重,粘粒(<0.002mm)含量较高,其有效含水量一

般也相应较低。根据离心机测定的广西区环江县古周村峰丛洼地地表层(0–15cm)土壤水分特征曲线,通过拟合曲线(幂函数)计算了相应的水分特征参数,即田间持水量、毛管断裂含水量、凋萎含水量,相应的吸力分别为 0.03、0.1、1.5MPa。由于喀斯特生境土壤的高度异质性,不同土地利用方式田间持水量、毛管断裂含水量、凋萎含水量有较大的差异,但速效含水量和有效水含量差异较小,分别在 3.9% 和 10.7% 左右(表 2)。与坡耕地和洼地玉米相比,虽然次生林、灌草丛田间持水量较高,但是凋萎含水量也相应较高。因此,在进行不同利用方式土壤水分状况评价时,不能单纯根据土壤含水量的高低来判断。当然,由于坡地土层浅薄,加上植物根系具有穿插岩石吸收裂隙水的功能,所以上述指标不能作为评价坡地植物抗旱性能的唯一指标。

表 2 广西区环江县古周村喀斯特峰丛洼地不同利用类型土壤水分有效性

土地利用方式	粘粒含量(%)	田间持水量(%)	毛管断裂含水量(%)	凋萎含水量(%)	速效水含量(%)	迟效水含量(%)	有效水含量(%)
次生林	51.6	36.8	33.0	25.9	3.8	7.1	10.9
灌草丛	38.3	29.9	26.1	19.3	3.8	6.8	10.6
坡耕地	34.1	26.3	22.6	15.9	3.7	6.7	10.4
洼地玉米	28.4	24.8	20.7	13.7	4.1	6.9	11.0

注:土壤含水量都为重量百分比。

在西南喀斯特山区,虽然也有部分学者^[26, 27]探讨了不同利用方式土壤有效水含量的大小,但是目前田间持水量的土壤水吸力标准还没有统一,具体测定过程中也没有考虑碎石的影响。若以田间持水量对应的土壤水吸力为 0.01MPa,李阳兵等^[26]在重庆市北碚岩溶山区的研究结果表明,不同土地利用方式土壤有效水含量变化范围为 10%–20%,主要受有机质、>0.25mm 水稳性团聚体、粘粒等含量的影响。蒋太明等^[27]在贵州省修文县喀斯特山区的研究结果表明,黄壤旱耕地剖面土壤有效水含量很小,虽然部分表层可达 9.5% 左右,但是大部分层次仅为 2.0% 左右。与陕西长武黄土、广西环江和湖南桃源红壤相比,大部分石灰土有效水含量相对偏低,更易受干旱胁迫。

3.3 西南喀斯特山区土壤水分入渗规律

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(一般 0.3–0.6,部分可达 0.8 以上),降雨可通过竖井、落水洞、漏斗等迅速汇入地下,常形成“地下水滚滚流、地表水贵如油”的特殊景观。由于喀斯特山区降雨入渗率高,土壤水分沿坡面的分布主要取决于土地利用类型的差异;在植被类型相对一致、坡面较为均一的条件下,坡位对土壤水分沿坡面的分布影响较小^[6]。不过,在岩石裸露率较高的局部地段,土壤水分可能会因岩石表面雨水的汇集而出现相对较高的现象。喀斯特山区浅薄且连续性差的土层常含碎石,其主要通过影响土壤孔隙度和水分运移通道的弯曲程度来影响土壤水分入渗。但是,土中碎石的存在可能增加也可能减少入渗^[28],这与碎石在土中的位置及其尺寸大小有关^[29, 30]。土壤表面覆盖碎石,一般能防止土壤孔隙堵塞而增加入渗,但当碎石埋在土中时,则会促进结皮的形成,导致入渗减少而径流增加^[29]。碎石尺寸对石质土壤入渗的影响存在一个临界值,当碎石尺寸大于临界值时,石质土壤的入渗将随水分运移通道的减少而降低^[30]。不过,关于碎石对土壤水分入

渗的影响,国外研究较多且取得许多重要的成果^[11, 28-30],而国内目前虽有部分相关研究^[31-35],但还处于探索阶段,尤其在西南喀斯特山区。

在中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站(岩石类型以白云岩为主),不同利用方式坡面(投影面积 $>1000\text{ m}^2$)降雨产流的观测结果表明降雨入渗率高达0.9以上,而且不同利用方式间差异不明显。当然,坡面不同利用方式降雨产流相关结果及其主要影响因素还有待于较长时间数据的验证。至于碎石对土壤水分入渗的影响,与碎石含量、粒径、土石体积比等都有关系。室内模拟试验表明^[36],碎石体积含量(10%、20%、30%)及粒径(5–10mm、10–20mm、20–30mm)对土壤入渗有较大的影响。当碎石粒径不变时,随着碎石体积含量由10%增加到30%,土壤水分入渗有一个“减小—增大”的过程。当碎石含量不变时,碎石粒径对土壤水分入渗的影响较为复杂,但较大粒径碎石有促进入渗的作用。用盘式入渗仪对特定土—石坡面土壤水分入渗的研究表明^[37],大部分地段表层土壤碎石的体积含量可达20%–50%,土壤稳定入渗率可达0.70–2.10mm/min,其与碎石体积含量呈递增的指数函数关系。显然,土—石坡面石灰土稳定入渗率高于黄土的稳定入渗率(0.33–1.13mm/min)^[38]。不同粒级碎石含量与土壤入渗关系比较复杂,但75–20mm碎石含量同稳定入渗率具有显著的正相关关系。野外测定结果表明,洼地剖面各层土壤透水性能差异较大,具有随土层深度的增加而减小的趋势,但碎石能在一定程度上增加土壤水分入渗。

3.4 西南喀斯特山区土壤水分空间变异性

一般认为,土壤水分空间变异性的影响因素主要有气候(降雨、太阳辐射等)、地形(坡度、坡向、海拔、上坡汇水面积等)、土壤性质(机械组成、有机质含量、结构、大孔隙等)、植被类型以及土壤平均含水量等^[39]。西南喀斯特山区土壤水分具有明显的时空变异性,其空间变异性与该地区复杂多变的地形地貌和类型多样的小生境密切相关^[38]。在喀斯特山区洼地(古周)相对平坦地块,旱季表层土壤水分的空间格局主要受石丛和地形两个尺度环境因素的影响和控制,呈现比较简单的斑块状分布^[40]。在土被连续分布区域,土壤水分具有较小的总体方差和较大的变程,土壤水分空间连续性较好;在石丛分布区域,土壤水分具有较大的基台值和较小的变程,土壤水分空间连续性差。因此,在研究不同性质斑块土壤水分的变异特征时,需要选取不同的采样设计。

降雨量(土壤平均含水量)、土地利用方式、微地貌、土壤物理性质、有机质含量等对喀斯特山区土壤水分的空间分布与变异都有重要影响,但旱季、雨季有所差异^[42]。洼地土壤水分受地形、微地貌、土地利用方式等的影响呈不规则的斑块状分布,空间变异程度各异。土壤水分的空间异质性随平均含水量的增加而减小,变程在平均含水量中等时较大,在极干旱或降雨之后较小^[43]。与雨季相比,洼地旱季土壤水分的块金值和基台值明显增大。旱季斑块支离破碎,土壤水分空间变异程度很大,而雨季斑块数目明显减少,土壤水分空间异质性有所降低^[24]。坡面土壤水分表现出明显的季节变化,但都为中等变异。坡面横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,反映了坡面石丛与土壤相间分布、

生境高度破碎化的特征^[44]。喀斯特山区土壤水分的空间结构具有一定的尺度效应,变程具有随采样尺度增大而变大的特征^[11, 12]。当研究区域存在多重尺度的变异结构时,需要根据研究的目的是和精度确定合理的采样尺度。

4 结论

西南喀斯特地区是一种受地质背景制约的脆弱生态环境,具有地表水缺乏、土层浅薄且不连续、植被覆盖率低等基本特征。该地区岩石与浅薄土层的相互镶嵌,是导致喀斯特生境高度异质性和土壤生态功能差异的重要原因,增加了植被恢复重建的难度。在地形地貌错综复杂、小生境类型多样的喀斯特山区,土壤水分运移相当复杂,具有许多和其它类型区不同的规律和特点。国内虽然在喀斯特地区开展了部分相关研究,但目前总体上还处于探索阶段,还难以弄清不同地貌类型区、不同地质背景、不同退化程度小流域土壤水分运移规律及调控机理。今后土壤水分研究应以岩石—土壤—植被系统为对象,在分析地质因素对生态环境的控制和影响程度的基础上,揭示不同地质背景、不同植被类型土壤水分差异的成因,阐明不同水文地质结构小流域土壤水分运移规律及调控机理。同时,在注重土壤学、植物学、水文地质学、生态学等学科交融融合的基础上,加强喀斯特生态系统各因子的相互作用关系及其对生态过程影响的综合研究,重视植被对异质性生境的响应(如植物水分来源及水分利用效率)及其适应性调控机理的研究,以实现喀斯特山区水土资源的协调利用和植被的恢复重建。

参考文献:

- [1] LeGrand, H.E. Hydrological and ecological problems of karst regions [J]. Science, 1973, 179: 859–864.
- [2] 袁道先. 我国西南岩溶山地的环境地质问题[J]. 世界科技研究与发展, 1997, 19(5): 41–43.
- [3] 李阳兵, 侯建筠, 谢德体. 中国西南岩溶生态研究进展 [J]. 地理科学, 2002, 22(3): 365–370.
- [4] 蔡运龙. 中国西南岩溶山石贫困地区生态重建[J]. 地球科学进展, 1996, 11(6): 602–606.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] White W B. Karst hydrology: recent developments and open questions [J]. Engineering Geology, 2002, 65: 85–105.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Cousin I, Nicoulaud B, Coutadeur C. Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soil[J].

- Catena, 2003, 53: 97–114.
- [12] 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.
- [13] 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): 544–549.
- [14] 张继光, 陈洪松, 苏以荣, 等. 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.
- [15] 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): 54–58.
- [16] Zwieniecki M A, Newton M. Seasonal pattern of water depletion from soil-rock profiles in a Mediterranean climate in southwestern Oregon [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1996, 26: 1346–1352.
- [17] Anderson M A, Graham R C, Alyanakian G L, et al. Late summer water status of soils and weathered bedrock in a giant sequoia grove [J]. Soil Science, 1995, 160: 415–422.
- [18] Hubbert K R, Beyers J L, Graham R C. Roles of weathered bedrock and soil in seasonal water relations of *Pinus jeffreyi* and *Arctostaphylos patula* [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2001, 31: 1947–1957.
- [19] 潘根兴, 曹建华. 表层带岩溶作用: 以土壤为媒介的地球表层生态系统过程—以桂林峰丛洼地岩溶系统为例 [J]. 中国岩溶, 1999, 18(4): 287–296.
- [20] 容丽, 王世杰, 杜雪莲. 贵州花江峡谷区常见乔灌木叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值对喀斯特石漠化程度的响应 [J]. 林业科学, 2007, 43(6): 38–44.
- [21] 杨成, 刘丛强, 宋照亮, 等. 喀斯特山区植物碳同位素组成特征及其对水分利用效率的指示—以贵州花溪杨中小流域为例 [J]. 中国岩溶, 2007, 26(2): 105–110.
- [22] Doctor D H, Alexander Jr E C, Petri?, M., et al. Quantification of karst aquifer discharge components through end-member mixing analysis using natural chemistry and stable isotopes as tracers [J]. Hydrogeology Journal, 2006, 14(7): 1171–1191.
- [23] Querejeta J I, Estrada-Medina H, Allen M F, et al. Water source partitioning among trees growing on shallow karst soils in a seasonally dry tropical climate[J]. Oecologia, 2007, 152: 26–36.
- [24] Soil Survey Division Staff. Soil survey manual, USDA Handbook 18 [M]. Washington: U.S. Gov. Print. Office, 1993.
- [25] 朱元骏, 邵明安. 黄土高原水蚀风蚀交错带小流域坡面表土砾石空间分布[J]. 中国科学(D辑), 2008, 38(3): 375–383.
- [26] 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.
- [27] 蒋太明, 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.
- [28] Brakensiek D L, Rawls W J. Soil containing rock fragments: effects on infiltration[J]. Catena, 1994, 23: 99–110.
- [29] Poesen J, Lavee H. Rock fragments in top soils: significances and processes[J]. Catena, 1994, 23: 1–28.
- [30] Valentin C. Surface sealing as affected by various rock fragments covers in West Africa[J]. Catena, 1994, 23: 87–97.
- [31] 李燕. 紫色土砾石的分布及其对土壤水分性质的影响 [D]. 重庆: 西南大学, 2006.
- [32] 王慧芳, 邵明安. 含碎石土壤水分入渗试验研究. 水科学进展, 2006, 17(5): 604–609.
- [33] 朱元骏, 邵明安. 不同碎石含量的土壤降雨入渗和产沙过程初步研究. 农业工程学报, 2006, 22(2): 64–67.
- [34] 周蓓蓓, 邵明安. 不同碎石含量及直径对土壤水分入渗过程的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(5): 801–807.
- [35] 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.
- [36] 许明祥, 刘国彬, 卜崇峰, 等. 圆盘入渗仪法测定不同利用方式土壤渗透性试验研究 [J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 54–58.
- [37] Famiglietti J S, Rudnicki J W, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas [J]. Journal of Hydrology, 1998, 210: 259–281.
- [38] 朱守谦, 祝小科, 喻理正. 贵州喀斯特区植被恢复的理论和实践[J]. 贵州环保科技, 2000, 6(1): 31–35, 41.