

西南喀斯特流域水循环研究进展

石 朋^{1,2}, 侯爱冰², 马欣欣², 陈 喜^{1,2}, 张志才²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098 ;

2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要 在分析我国西南喀斯特流域水文地质条件的基础上,总结了现阶段西南喀斯特流域水循环研究的主要方法,即流域水文模型方法和试验方法。指出利用流域水文模型方法进行定量研究的优缺点,在实际应用中遇到的困难,以及用试验方法研究喀斯特流域水循环过程所存在的问题。对未来西南喀斯特流域水循环研究的发展方向提出了一些看法。

关键词 喀斯特流域 水文地质 水循环 流域水文模型

中图分类号 :TV121⁺.7

文献标志码 :A

文章编号 :1006-7647(2012)01-0069-05

Research progress in hydrologic cycle in karst area of Southwest China//SHI Peng^{1,2}, HOU Yuan-bing², MA Xin-xin², CHEN Xi^{1,2}, ZHANG Zhi-cai² (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : By analyzing the hydrogeological conditions in the karst area of Southwest China, the main methods for the researches on hydrologic cycle in the karst area are summarized, that is, hydrological modeling method and experimental method. The advantages and disadvantages of the hydrological modeling method for quantitative researches and the difficulty in its practical application as well as the existing problems in the experimental method for the hydrologic cycle in the karst area are put forward. On such a basis, some ideals about the researches on the hydrologic cycle in the karst area of Southwest China in the future are proposed.

Key words : karst area ; hydrogeology ; hydrologic cycle ; hydrological model

“南石(石漠化)北沙(沙漠化)”一直是制约我国西部地区可持续发展的两大生态环境问题。西南喀斯特地区面积约 54 万 km²,包括以贵州为中心的广西、云南、四川、湖南、湖北、广东、江西、重庆八省(市),是全球三大喀斯特集中分布区中连片裸露碳酸盐岩面积最大的区域。该区内山地面积大,降水丰沛,土层浅薄,可溶岩成土速率缓慢,水土流失危险度高,属非地带性的脆弱生态带^[1]。同时,该区内人口达 1 亿多,贫困人口相对集中,人地矛盾非常突出。坡地植被一旦被破坏,土壤侵蚀作用将会加剧,往往导致薄土层全部流失,造成严重的石漠化,水分、养分调蓄能力迅速降低。目前的石漠化土地面积已达 17 万 km²,占该区喀斯特面积的 31%,近 2 000 万人的生存环境受到严重威胁。更严重的是,石漠化面积还在不断扩大,不仅使土地生产力下降,地表植被覆盖率锐减,系统水源涵养能力削弱,地表

水源枯竭,更造成土地资源丧失,粮食减产。另外,该区地处长江和珠江两大水系的上游,一旦生态屏障崩溃,将严重危及中国半壁江山的生态安全。因此,西南喀斯特流域水循环研究一直是国家的科研重点。

1 西南喀斯特流域的水文特性

1.1 喀斯特流域的空间结构特征

由可溶岩组成的非均质含水介质,构成了岩溶喀斯特流域所特有的二元三维空间结构系统。该系统在水流侵蚀和溶蚀的双重作用下,由地表、地下 2 个子系统构成,其中,地表子系统包括溶沟、溶隙、峰丛、天窗、漏斗及落水洞等,地下子系统则主要由溶洞、管道、伏流及地下河等组成。地表成为喀斯特径流中的发生场和分配场,地下则成为喀斯特径流中的输送场和调蓄场,而最终会通过地表河或地下河

基金项目 :国家自然科学基金(41001011,41101018,40930635,51079038);河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室专项(2009586412,2009585312)

作者简介 石朋(1976—),男,天津人,副研究员,主要从事流域水文模拟及分布式流域水文模型研究。E-mail :ship@hhu.edu.cn

以较大的落差汇入江河。在岩溶系统的整个发展过程中,3种结构的岩溶含水层或含水体系得到了普遍认可,分别是:①细小结构体系,以封闭的空隙占优势;②粗大结构体系,以基本上未封闭的空隙占优势;③复活体系。因此,喀斯特流域在结构上有4个基本特性^[2],即不均一的双重含水介质结构、二元流场形态结构、三维空间地域结构以及功能上的耗散结构。

1.2 喀斯特流域的地貌水文效应

长期以来,人们对喀斯特流域不同于常态的水文和地貌问题做了大量的研究工作,但大多只侧重于单方面的研究。水文问题和地貌问题之间有着十分密切的联系,从长的时间尺度来看,喀斯特水是喀斯特地貌演化的直接动力,而从短的时间尺度来看,地貌形态几乎是稳定的,流域内不同的地貌组合是导致区内特殊水文过程的根本动因。近年来,国内外的一些学者也认识到这一点,并注重于水文地貌系统的研究,把喀斯特流域的水文地貌看作是一个相互作用、相互影响、互为因果的有机系统,不但从水的角度出发考虑地貌问题,同时也从地貌的角度出发研究水文现象,进而促进了水文学和地貌学的交叉学科——水文地貌学的兴起。

整个喀斯特流域地貌大系统中除了有构造地貌系统、岩石地貌系统和气候地貌系统外,还有水文地貌系统。水文与地貌这两大要素之间相互制约、相互影响,一方面在不同的水文条件下,发育了不同的喀斯特地貌;另一方面,不同的喀斯特地貌也制约着不同的水文过程。

在喀斯特地貌系统中,不同的水文过程作用往往使喀斯特系统在时空上表现出不同的水文地貌效应(如以水流侵蚀为主的地貌结构或以水流溶蚀为主的地貌结构);与此相应的,喀斯特地貌的多样性和差异性必然也会导致流域水文过程不同。一般来说,喀斯特流域地貌结构对水体过程的作用可归纳为3类:蓄水作用、滞水作用和导水作用。表层溶蚀裂隙的入渗强度大、厚度小,往往表现为滞水作用;在峰林平原、峰林盆地中,土层厚度较大,具有较强的蓄水作用,而诸如地表、地下河及谷地等,则往往表现为导水作用。

1.3 喀斯特流域的地下水运动特征

在我国,西南地区的喀斯特岩溶介质比北方地区的具有更强的非均质性和各向异性。大气降水和地表水通过岩溶地表渗入地下转化为地下水,对岩溶地下结构不断进行改造,从而逐渐形成岩溶通道(管道、洞穴等),并有序构成岩溶地下河系^[3]。在这样的地下河系统中,水流以管道流为主,岩溶管道或

地下河构成地下径流的主干。在2个管道流之间,地下水在层理、节理和溶孔中运动,此时的运动状态与一般的渗流相似。管道流由于流动阻力小,流速非常大。据有关资料^[4]统计,一般情况下地下河发育区的岩溶水流速枯水期为8.64~17.28 km/d,平水期为17.28~43.20 km/d,洪水期为43.20~129.60 km/d,极端流速可达172.80 km/d,可见在管道流或地下河发育区的地下水运动已不符合达西定律。此外,岩溶地下河系统中还包含岩溶裂隙、岩溶裂缝和岩溶孔隙等多种介质体,形成了一个多重的复合体系,具有高度的非均质性,使得地下河系统中的水流运动常呈现出达西流与非达西流并存的现象^[5],这也为如何准确描述岩溶地下水的运动规律增加了困难。

2 喀斯特流域水循环的研究方法

2.1 流域水文模型方法

过去对岩溶喀斯特流域的水循环过程往往偏重于定性研究,直到20世纪90年代以后才陆续出现一些针对岩溶流域水循环过程定量研究的水文模型。我国西南岩溶流域具有特殊的二元三维地质结构的极其复杂的地下河系统。在长期风化侵蚀作用下,喀斯特流域中大量的裂隙、溶沟、漏斗、天窗和落水洞使得其水文循环极其复杂。降雨时,地面径流通过这些大型管道迅速进入地下成为地下径流,使一次雨洪过程中地下径流占较大比重,这与非岩溶流域的特征不同,加之多重复合体系的多种水流运动介质体及达西流与非达西流并存的现象,给岩溶流域建立水文模型带来相当的困难。

目前在岩溶喀斯特地区建立的水文模型大体可概括为以下3类:

第1类通过对在非岩溶流域上成功使用的概念性集总式流域水文模型进行适度改造,使其在一定程度上能够适用于岩溶地区。如袁道先^[6]在水箱模型的基础上开发出的桂林“Y吉模型”是最早在西南岩溶地区成功建立的流域水文模型之一。此类模型^[7-12]虽然在模型构建时对流域进行了一定的单元划分,但由于对水文过程、输入变量及边界条件的概化,对流域空间变异性的忽略,以及对喀斯特流域产汇流空间分布的不明确,使得该类模型从严格意义上说仍属于黑箱模型,且在实际应用中存在诸多问题。当将此类集总式模型应用于地形地貌空间变异性高度发育的喀斯特流域时,会发现模型与客观实际严重偏离,从而影响模型的计算精度和可信程度。

第2类是结合灰色理论、分形方法及人工神经网络等现代数学方法所建立起来的数理统计模型^[13-14]。束龙仓等^[15]将门限自回归模型与小波BP

神经网络相结合应用于后寨河流域出口流量的预测 石朋等^[16-17]基于线性矩法和 MK 等方法分析了贵州岩溶流域径流过程的年度和季节变化、洪枯水变化规律及其演变的空间特征 陈宏峰等^[18]利用 BP 人工神经网络建立了湖南洛塔河地区表层岩溶泉的径流预测模型等。以数学方法为基础的数理统计模型往往需要大量长系列的历史观测资料,然而,我国西南岩溶流域处于经济发展相对落后的地区,除少数试验流域近年来在国家重大研究项目的资助下开展了一些连续观测外,大部分地区资料匮乏甚至无资料,从而使统计模型在理论上难以获得支撑。由于此类方法缺乏必要的物理基础,所建模型用于模拟尚可,用于预测则存在较大的不确定性,因此在岩溶水文循环研究中很难有进一步发展的空间。

第 3 类是非岩溶流域上适用的分布式/半分布式水文模型,尝试将其应用于岩溶流域。与集总式模型不同,分布式模型能够同时考虑流域水文过程和植被、土壤、地形地貌等地理因素的时空变异性及其对水文过程的影响,一些固有的自然地理要素往往被作为模型要素加以考虑,因此,分布式模型能够较好地描述流域内细部的水文过程。任启伟^[19]在 SWAT 模型基础上改建的刁江半分布式模型可视为分布式模型在我国西南喀斯特流域上的有益尝试。张志才等^[20]在 DHSVM 模型基础上所建立的岩溶试验流域分布式模型以及蒙海花等^[21]基于落水洞所构建的一个半分布式水文模型也有一定的计算精度。在建模理论上分布式水文模型是适用于复杂条件下的西南喀斯特流域的,但也存在一些亟待解决的问题:①岩溶产流模式的确定。由于表层岩溶带的存在使得岩溶流域的产流模式明显不同于非岩溶流域的产流模式^[22-24],表层岩溶带裂隙率高,渗透性好,地表径流只出现在连续降雨且雨强极大的降雨过程中^[25]。因此,需要明确表层岩溶带在降水入渗补给和产流中的作用^[26-27]。②复杂下垫面条件的模型描述。落水洞等岩溶洼地往往是地表水快速汇集进入地下水系的连接处^[28]。分布式水文模型根据 DEM 采用填洼法进行栅格汇流演算,不能将该模型直接照搬到喀斯特流域,而应在喀斯特地貌识别基础上建立地表与地下水水系的连接关系。③岩溶径流成分及汇流路径的确定。目前栅格型汇流主要根据地形坡度进行计算,而产生于表层岩溶带的水流不仅受地形影响,还取决于岩溶裂隙带渗透系数的各向异性。因此,喀斯特产汇流受喀斯特地貌、土壤、喀斯特裂隙及地表和地下水系控制,目前尚无可直接套用或引用的模式,需要在详细调查、岩溶水动态加密监测基础上开展深入研究^[29]。④下垫面

空间异质性导致的尺度效应问题。基于小尺度建立的物理模型及数值解在流域尺度上由于维数灾、参数灾,增加了模型的不确定性,降低了模型的适用性。需要关注从基本尺度得到的基本规律如何应用到流域及区域尺度上。就目前而言,分布式模型在喀斯特地区的应用尚不多见,仍需要更多的实践检验。

2.2 室内外试验方法

针对西南喀斯特流域下垫面条件的高度空间异质性,众多学者开始关注不同类型下垫面条件的水文特性,从而开展了大量的室内外试验。此类试验大体上可归纳为 2 类:一是对局地水文地质参数的求证;二是对地表以下水流路径的探测。

在水文地质参数的求证方面,章程等^[30-31]通过野外溶蚀试片法证明了不同土地利用类型下溶蚀量存在显著差异性,同时还利用多参数自动记录仪探讨了岩溶泉的水位、水温等与降雨的响应关系 张志才等^[32]利用时域反射仪测定山体不同位置在不同植被覆盖条件下的土壤含水率,分析了喀斯特峰丛山体土壤水的空间分布规律及其影响因素 刘延惠等^[33]在岩溶流域设置径流小区,通过实地观测分析不同植被类型下岩溶地表径流的差异 王腊春等^[34]通过脉冲试验和降雨天然脉冲分析,论述了后寨河流域岩溶水文特征与流域贮水结构、地质地貌结构的相互关系,以及裂隙流与管道流的转化关系。鲁程鹏等^[35]利用电导率与溶质浓度的正相关关系,在示踪试验基础上提出一套估算地下水流速及含水层渗透系数的方法 邓振平等^[36]采用弱酸性红 A 荧光燃料类试剂作为示踪材料,分析了岩溶落水洞和地下河出口的连通性,以及地下分水岭的分布特征。上述试验研究对非均一含水介质岩溶水运动研究及岩溶水文模拟具有一定的参考意义,但考虑到喀斯特流域的特殊情况,这些试验的结论是否具有代表性,能否在流域尺度上加以推广值得商榷。

在地表以下水流路径的探测方面,目前国内尚少有此方面的研究性论文,现有的方法仍是以水文地质钻探方法为主。此类方法工程量较大,在一般的研究流域难以实施。近年来,连续电导率剖面仪及地质雷达的出现在一定程度上提高了效率,但同时仍存在问题。以 RH-4 型连续电导率剖面仪为例,其在地表以下 10 ~ 500 m 能够精细地反演地下情况,但自地表至地表以下 10 m 为其探测盲区,而这 10 m 范围恰恰是西南喀斯特流域中表层岩溶带强烈发育的区段。再如地质雷达,其优点是灵活便携,且能在各种复杂地形条件下正常使用,但缺点是易受干扰,外界微弱的电磁信号即会影响其工作

结果。此外,地表土层厚度、土壤含水量等均会影响其探测结果,而对于探测结果的反演也是见仁见智,并无严格统一的标准,这样一来,对一些细小的或由破碎岩石构成的地下水流通通道,往往难以被识别出来。

3 喀斯特水循环研究的发展方向

3.1 岩溶环境下产流过程的研究

岩溶流域特殊的地质结构使得其下垫面条件不同于非岩溶流域。表层岩溶带的存在使其包气带结构更为复杂。那么,如何在此类特殊包气带条件下探讨其产流机制和产流模式,将是未来岩溶流域水循环研究的一个重点。尽管已有的研究表明,岩溶流域虽土层浅薄,但仍属蓄满产流模式,但此种蓄满不仅仅是土壤的蓄满,同时需要考虑表层岩溶带的蓄满,而表层岩溶带内的水流运移储存方式又不同于土壤,那么,如何构建出这种“土壤+表层岩溶带”的复合蓄满产流模式将是一个难点。

3.2 岩溶环境下汇流过程的研究

岩溶地下河系统中的水流运动常呈现出达西流与非达西流并存且地表河与地下河交替出现的情况。对于这种复杂的水流情态,如何通过合理的数学物理方法加以描述将是岩溶环境下汇流过程研究的主要难点。在此类环境下,除非在某些重点区域进行钻井等强化观测,对于大部分地区,由于难以确定边界条件,传统的水动力学方法显然不再适用,如单纯使用线性水库进行演算,则又回归到黑箱模型中。因此,如何在其中找到一个合适的切入点显得尤为重要。目前,将分形技术用于模拟复杂的地下河系统与管道裂隙系统并概化出理想地下河系统响应函数是一种有益的尝试。

3.3 喀斯特流域水循环过程的量化研究

由于水文模型能够给出流域降雨径流的变化过程,因此,在喀斯特流域开展流域水文模型研究仍将是今后的主要研究内容之一。但水文模型的研究方法需要与研究侧重点相适应,如研究重点在于考虑较大尺度上流域或区域的水资源量问题,则宜采用结构简单又不完全失其物理意义的概念性集总式水文模型;当以面积较小的试验流域为研究对象,重点关注岩溶水循环过程的具体细节时,需要构建分布式岩溶流域水文模型,通过划分网格或代表性单元,尽可能真实地反映降雨径流的时空变化。考虑到目前的具体情况,采用一些半分布式模型并加以改进,也不失为一种折中的方法。

3.4 喀斯特流域的地貌水文学研究

地貌水文学研究在非岩溶流域中一直是地貌学

家和水文学家都十分关注的领域,而在岩溶流域中,此方面的研究更值得重点关注。不同的岩溶地貌类型及特殊地质单元,诸如峰丛、峰林、天窗、落水洞等,对产流和汇流都会造成巨大的影响。如果能够建立某种模式,通过地形地貌来确定不同岩溶类型下的产汇流特征,对于岩溶环境下的水循环研究将具有划时代的意义。

3.5 喀斯特流域的生态系统研究

喀斯特空间变异性及地表-地下双重结构对水文-生态链接具有重要控制作用。近年来,人类非理性的活动对西南喀斯特山地生态水文格局的破坏十分严重,地表生态水文过程已经丧失了协调发展的趋势。因此,选择西南喀斯特典型流域,针对地貌、植被高度空间异质性和地表-地下双重结构水文地质特征研究流域尺度的水循环动力过程对生态环境的影响,对喀斯特流域生态系统的恢复和重建具有重要意义,势必将成为未来重点研究内容之一。

3.6 新技术新方法的应用研究

尽管现有的地质雷达、连续电导率剖面仪等设备应用于岩溶流域时还存在诸多问题,但弄清岩溶地下管道的具体位置及其连接情况,对于研究岩溶地下水的运移具有十分重要的意义。因此,在上述仪器设备基础上,进一步开发适用于岩溶地下勘探的新技术新方法显得尤为重要。随着3S技术的不断进步,将3S技术应用到岩溶流域特殊地质结构的识别,可能是今后一个值得关注的发展方向。

4 结 语

西南岩溶流域地处我国长江和珠江两大水系的上游,具有重要的生态和环境意义,岩溶流域水循环研究对于该地区的环境保护和可持续发展具有十分重要的意义。在总结现有国内外学者对我国西南岩溶流域水循环相关研究的基础上,指出了目前研究中存在的一些问题,并对未来可能的研究方向提出了一些浅见。

参考文献:

- [1] 李阳兵,王世杰,容丽,等.西南喀斯特山地石漠化及生态恢复研究展望[J].生态学杂志,2004,23(6):84-88.
- [2] 梁虹,杨明德.喀斯特流域水文地貌系统及其识别方法探讨[J].中国岩溶,1994,13(1):1-9.
- [3] 郭纯青.中国岩溶地下河系及其水资源[J].水文地质工程地质,2001(5):43-45.
- [4] 朱远峰.中国岩溶水系统和岩溶水资源研究进展[C]//工程地质、水文地质、环境地质论文集.北京:地震出版社,1993:194-199.
- [5] 郭琳,陈植华.岩溶地区地下河系统水资源定量评价的

- 问题与出路[J]. 中国岩溶, 2006, 25(1): 1-6.
- [6] 袁道先. 中国南方裸露型岩溶峰丛山区岩溶水系统及其数学模型的研究: 以桂林 Y 吉村为例[M]. 南宁: 广西师范大学出版社, 1995.
- [7] 卢卫中. 岩溶流域水文模型初步研究[J]. 水文, 1995(2): 29-33.
- [8] 王腊春, 史运良. 非闭合流域岩溶水模型[J]. 水科学进展, 1995, 6(4): 318-323.
- [9] 史运良, 王腊春. 岩溶水概念分布模型[J]. 南京大学学报: 地理版, 1992(13): 134-161.
- [10] 程根伟. 新安江岩溶水文模型[J]. 水电能源科学, 1991, 9(2): 139-144.
- [11] FLEURY P, PLAGNES V, BAKALOWICZ M. Modelling of the functioning of karst aquifers with a reservoir model: application to fortaïne de Vaucluse (South of France) [J]. Journal of Hydrology, 2007, 345: 38-49.
- [12] RIMMER A, SALINGAR Y. Modelling precipitation-streamflow processes in karst basin: the case of the Jordan River sources, Israel [J]. Journal of Hydrology, 2006, 331: 524-542.
- [13] COMTE V B, JOUDE H, ROESCH A, et al. Time series analyses for karst river interactions assessment: case of the Coulazou River (Southern France) [J]. Journal of Hydrology, 2008, 349: 98-114.
- [14] 张保祥. 基于神经网络和遗传算法的济南市岩溶地下水预报模型研究[J]. 山东农业大学学报, 2004, 35(3): 436-441.
- [15] 束龙仓, 董贵明, 陶玉飞. 地下河天窗水位变化分析及预测[J]. 水利学报, 2009, 40(5): 529-534.
- [16] SHI Peng, CHEN Xi, QU Si-min, et al. Regional frequency analysis of low flow based on L-moments: case study in karst area, southwest China [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2010, 15(5): 370-377.
- [17] 杨涛, 陈喜, 谢海文, 等. 贵州近 50 年来的径流过程时空演变特征及驱动因素探讨[J]. 地球与环境, 2009, 37(3): 207-213.
- [18] 陈宏峰, 朱明秋, 夏日元. 湖南洛塔干河猪场表层岩溶泉 BP 神经网络分析[J]. 中国岩溶, 2005, 24(4): 300-304.
- [19] 任后伟. 基于改进 SWAT 模型的西南岩溶流域水量评价方法研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2006.
- [20] 张志才, 陈喜, 石朋, 等. 喀斯特流域分布式水文模型及植被生态水文效应[J]. 水科学进展, 2009, 20(6): 806-811.
- [21] 蒙海花, 王腊春, 苏维词, 等. 基于落水洞的岩溶半分布式水文模型的构建及其应用[J]. 地理科学, 2009, 29(4): 550-554.
- [22] 贺中华, 梁虹, 黄法苏, 等. 基于 DEM 的喀斯特流域地貌类型的识别[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(3): 46-53.
- [23] 蒋忠诚, 袁道先. 表层岩溶带的岩溶动力学特征及其环境和资源意义[J]. 地球学报, 1999, 20(3): 302-308.
- [24] 邹胜章, 张文慧, 梁小平, 等. 表层岩溶带调蓄系数定量计算: 以湘西洛塔赵家湾为例[J]. 水文地质工程地质, 2005(4): 37-42.
- [25] 彭韬, 王世杰, 张信宝, 等. 喀斯特坡地地表径流系数监测初报[J]. 地球与环境, 2008, 36(2): 125-129.
- [26] 姜光辉, 吴吉春, 郭芳, 等. 森林覆盖的喀斯特地区表层岩溶带的产流阈值[J]. 水科学进展, 2008, 19(1): 72-77.
- [27] 姜光辉, 郭芳. 我国西南岩溶区表层岩溶带的水文动态分析[J]. 水文地质工程地质, 2009(5): 89-93.
- [28] PERRIN J, JEANNIN P, ZWAHLEN F. Epikarst storage in a karst aquifer: a conceptual model based on isotopic data, Milandre test site, Switzerland [J]. Journal of Hydrology, 2003, 279: 106-124.
- [29] 覃小群, 蒋忠诚. 表层岩溶带及其水循环的研究进展与发展方向[J]. 中国岩溶, 2005, 24(3): 250-254.
- [30] 章程, 谢运球, 吕勇, 等. 不同土地利用方式对岩溶作用的影响: 以广西弄拉峰丛洼地岩溶系统为例[J]. 地理学报, 2006, 61(11): 1181-1188.
- [31] 章程, 袁道先, 李强, 等. 典型表层岩溶动力系统的敏感性研究: 以广西弄拉峰丛洼地岩溶系统为例[J]. 水文地质工程地质, 2005(1): 78-80.
- [32] 张志才, 陈喜, 石朋, 等. 贵州喀斯特峰丛山体土壤水分分布特征及其影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(5): 803-807.
- [33] 刘延惠, 张喜, 崔迎春, 等. 贵州开阳喀斯特山地几种不同植被类型的地表径流研究[J]. 贵州林业科技, 2005, 33(2): 8-10.
- [34] 王腊春, 许有鹏, 张立峰, 等. 贵州普定后寨地下河流域岩溶水特征研究[J]. 地理科学, 2000, 20(6): 557-562.
- [35] 鲁程鹏, 束龙仓, 苑利波, 等. 基于示踪试验求解岩溶含水层水文地质参数[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2009, 39(4): 717-721.
- [36] 邓振平, 周小红, 何师意, 等. 西南岩溶石山地区岩溶地下水示踪试验与分析[J]. 中国岩溶, 2007, 26(2): 163-169.

(收稿日期: 2011-05-05 编辑: 骆超)

