

岩溶石山区山坡表层径流水文动态特征对比分析

——以桂林丫吉试验场为例

陈国富^{1,2,3}, 姜光辉¹, 周文亮^{1,2}, 王开然^{1,2}

(1.岩溶地质研究所岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004;

2.西南大学地理科学学院, 重庆 400700; 3.陕西省地产开发服务总公司, 陕西 西安 710075)

摘要:选择桂林丫吉试验场溶洞—硝岩洞及其上方的汇水坡面作为研究区,通过在不同降雨条件下,对坡面径流和硝盐洞中流水水文动态进行监测并做对比分析研究。结果表明:(1)降雨强度、降雨持续时间与各含水系统前期含水情况决定了岩溶石山区坡面地表和包气带水文动态变化过程;(2)在不同降雨条件下,地表坡面流和经过上部包气带调蓄过的硝盐洞水文动态都表现为暴涨暴落,坡面径流表现的更为明显,一般坡面径流的整个水文过程持续几个小时到十几个小时,而硝盐洞中流水水文过程持续 1~3d;(3)一般大到暴雨条件下,坡面流最大流量大于硝盐洞,但由于持续时间短,其一场降雨后所获得的水量远不如下渗到包气带—硝盐洞中滴水水量。

关键词:包气带;表层岩溶带;水文动态;坡面径流;洞穴流水

中图分类号:P641.134

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2013)05-0058-06

1 引言

在我国南方喀斯特峰丛洼地系统中,由于长期强烈岩溶化作用产生了地表和地下双层空间结构,峰丛洼地岩溶石山区形成了土层浅薄,土壤总量少,降水入渗系数大,地下水位深等特征^[1]。虽然在西南岩溶区降雨丰富,但季节分配严重不均,导致旱雨季节分明,并且岩溶水文动态具有大起大落的现象,一旦发生干旱,很容易导致缺水,区域生态十分脆弱。

对于岩溶区产流模式的探讨从新安江模型建立时就开始了,当时就提出岩溶区的产流模式主要为蓄满产流模式^[2],但岩溶区除了拥有非岩溶区的产流特点外,还存在特有的表层岩溶带径流以及裂隙管道等侧向水流。20世纪80、90年代一些学者对岩溶地区各含水系统进行了划分和描述,并对岩溶石山区产汇流特征进行了分析^[3-6];20世纪80年代末袁道先等首先将表层岩溶带引入我国并进行了系统的研究,他认为岩溶地区对降雨有很强的吸收能力,因此只有在大雨或

暴雨的情况下才有坡面流的产生,而其余形式的降雨都被表层带吸收;姜光辉等在桂林丫吉试验场通过水量和水化学的方法对岩溶泉的径流成分进行了划分^[7],此外,一些专家学者建立水文模型对岩溶地区水文过程进行研究^[8,9],"丫吉模型"是在水箱模型的基础上建立并做了改进^[8],用以解释岩溶石山区的水量转化问题。本文在前人对岩溶石山区水量分配和转化研究的基础上,在不同降雨条件下对坡地和包气带硝盐洞从水量和水文过程进行实地观测研究,以了解其水文动态变化特征,解释岩溶水文动态变化的原因。

2 研究区概况

研究区位于桂林市区的东南郊约8km的丫吉村附近,在该村东南约1km处峰丛洼地与桂林峰林平原的交界地带,试验场自成一个岩溶水文地质系统,其总面积2km²。研究区位于亚热带季风区,降雨在季节分配上的不均匀性是该地区基本的气候特点,降雨主要集中在3~8月,平均年降雨量达到1900mm,从9月到

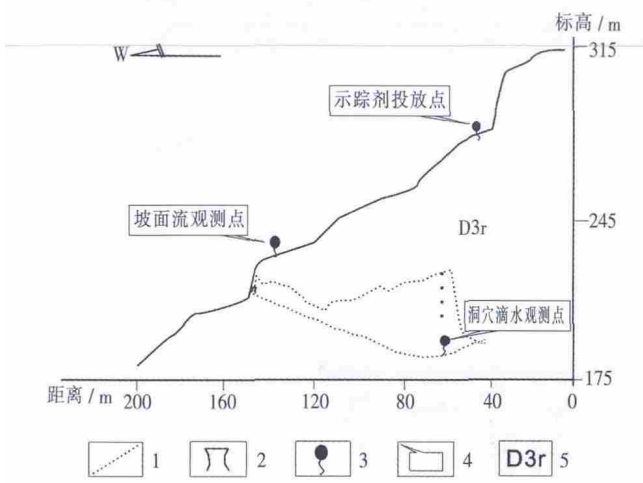
收稿日期:2012-10-09

基金项目:国家自然科学基金项目:岩溶峰丛洼地地区坡面流研究(40802063);国家自然科学基金项目:气候变化对岩溶地区蒸散作用及水文过程的影响(41172231);国土资源公益性行业科研专项:地下水典型试验场科学观测与综合研究(200911004)

作者简介:陈国富(1985—),男,甘肃定西人,硕士生,主要从事岩溶水文学研究。E-mail:chenguofuatts@163.com

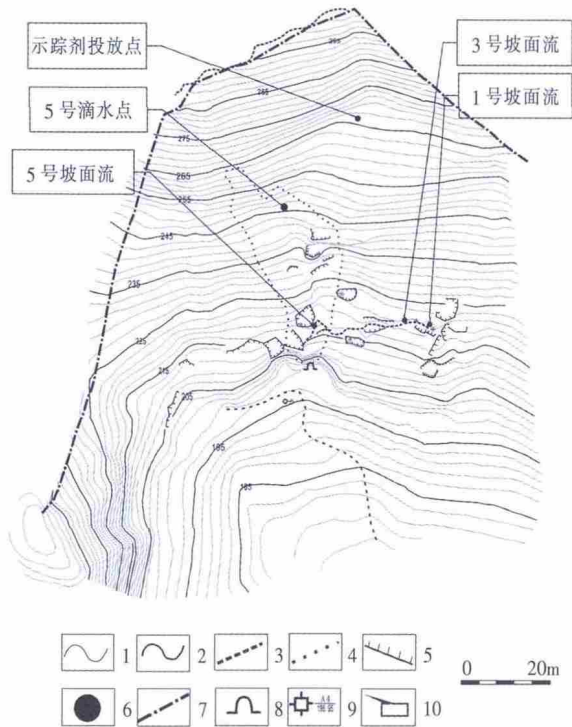
通讯作者:姜光辉(1977—),男,江西徐州人,博士,副研究员,主要从事岩溶水文地质研究。E-mail:bmxz@126.com

次年3月为旱季,4~8月的降雨量占年降雨量的70%。该区的气温变化也很明显,多年平均气温18.8℃。试验场裸露的石灰岩表面和土壤层的下部形成了厚度为10m的表层岩溶带,表层岩溶带的下部是包气带,主要由不连续的垂向溶蚀裂隙构成,其厚度随地形而变化。



1.硝盐洞;2.硝盐洞口;3.观测点;4.标注;5.泥盆纪上统融县组灰岩

图1 硝岩洞系统水文地质剖面图
Fig.1 Profile of the slope



1.等高线;2.等高线及高程;3.小路;4.硝盐洞;5.陡坎;
6.观测点;7.地质界线;8.硝盐洞口;9.控制点;10.标注

图2 坡面地形与径流观测点图

Fig.2 The terrain of slope and monitoring sites of runoff

硝盐洞的洞口标高197m,比岩溶泉口高50m,洞长100m,宽1~50m,高5~30m(见图1)。通过CAD软件计算出硝岩洞上部坡面汇水范围约为10546.89m²。整个坡面在地形上表现为中间成凹槽,而坡面两侧凸起,从上至下被小陡坎分割成阶梯起伏状。由于长期的降雨冲蚀,在坡面中间的凹槽中有数条深浅不一的溶蚀槽,有利于大雨或暴雨后雨水的汇集并流入山坡下部,而山坡下部在降雨后形成5股水流,分别为1、2、3、4、5径流(见图2)。

3 研究方法

3.1 示踪试验

为了验证硝盐洞同坡面的水力联系情况,在坡面上进行野外调查,然后根据地形和地表径流分布在坡面最顶部一陡崖下选择示踪剂投放点,认为所选投放点即为坡面汇水区最顶部,然后在5月29号在所选点投放200g荧光素钠,在经过6月5~8日之间不同场次的降雨后,连续4d在坡面流观测点和硝盐洞滴水点分别取水样,并在后面一个月在每个观测点不定时取样,所取水样带回重庆西南大学用岛津荧光分光光度计进行示踪剂浓度测试。

3.2 流量观测方法

降雨量数据采用本试验场气象站雨量筒所获取的相关时间段降雨量数据进行统计分析。坡面流观测地点分为洞顶坡面流的观测点和洞中观测点。观测方法包括Diver水位仪的监测并结合人工的现场监测;对坡面5处径流的其中三处安置长1m,宽25cm,高20cm的铁槽直角三角堰,降雨前在槽内放入荷兰生产的Diver水位仪对降雨期间流量槽中水位变化进行自动监测,同时再结合人工监测的水位高度对其进行校正,计算单位时间内流量。在洞中集中滴水点处支起一块大帆布接收洞顶的滴水,然后将水流引入长2m,宽40cm,高30cm的铁槽直角三角堰槽中,并结合水位自动监测仪跟人工监测对流经槽中的水位高度进行校正(见图3)。

3.3 数据处理与方法

将水位仪所获取的水位数据利用直角三角堰流量槽流量计算公式 $Q=Ch^{5/2}$ 将各个不同时间段的水位数据转化为流量数据,其中水头高度 $h=10.1\sim15.0$ 时, $C=0.0140$; $h=25.1\sim30.0$ 时, $C=0.0137$ 。使用Excle2003对相关时间段降雨量数据同流量数据进行统计分析并使用Origin8.5作图。



图3 1、5号坡面流观测点

Fig.3 The runoff monitoring sites

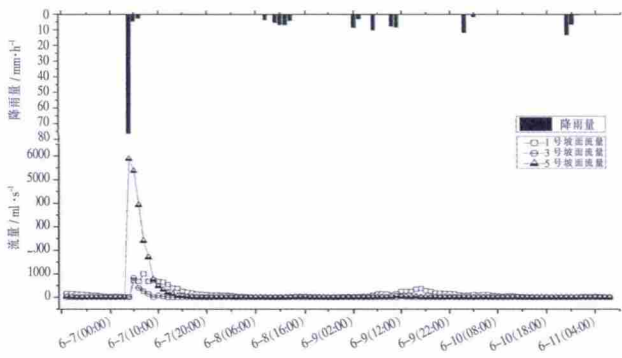


图4 长时间尺度降雨——径流水文动态变化图

Fig.4 The relationship between the precipitation and runoff in a long time scale

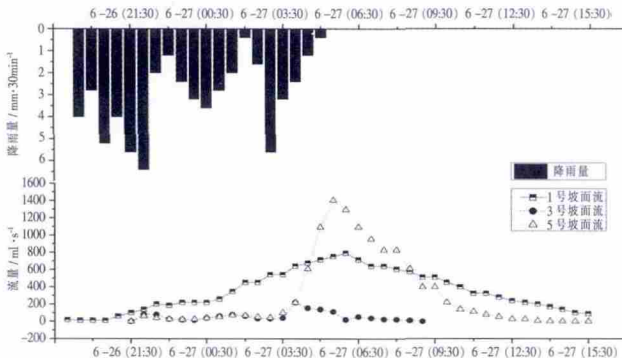


图5 短时间尺度降雨——径流水文动态变化图

Fig.5 The relationship between the precipitation and runoff in a short time scale

4 结果与分析

4.1 坡面示踪剂的投放与检测结果分析

通过在研究区做示踪试验的结果表明:首先,坡面水流在示踪剂投放点与坡面流观测点以及硝盐洞滴水观测点有很好的连通性;其次,在经过6月5~8日之间多场降雨后,还可以接收到示踪剂,说明在降雨后,除一大部分水流以集中快速流排泄后,还有另一部分要经过表层岩溶带和包气带中岩石裂隙的调蓄后才缓慢被后面的降雨带出岩石裂隙或管道,反映出岩溶山区岩溶含水系统特有的属性。

4.2 坡面径流水文动态分析

通过降雨时现场观察,坡面径流大部分为地表径流汇集到坡面的溶蚀渠道形成的集中流,还有一部分为经过调蓄过的表层岩溶带水和一部分土壤水,这在不同几处坡面水文动态得到体现,如图4、图5所示。

图4表示集中且较强的降雨后,坡面水文动态变化过程及其对比关系。在6月8~11日数次不同强度的降雨过程中,坡面水文动态同降雨强度呈很好地对应关系。从图5中可以看出降雨主要集中在6月26日19:30到10:30,本次降雨累积降雨量达到66.7mm,降雨2h后,3和5号差不多同时出现坡面流,而由于之前降雨经表层带调蓄还没有排泄完,因此在本场降雨初1号坡面就有18ml/s的流量,但随着降雨的持续,几处径流差不多都在经历本场降雨开始10h后,流量峰值达到最大,其中3号坡面在6月27日04:00达到最大流量155ml/s;5号坡面在05:30达到最大流量1405ml/s;1号坡面在06:00左右达到最大流量794ml/s。而从整个水文过程来看,1号坡面水文过程变化相对平缓,但整个过程都有流水且保持一个较高的出流量;5号坡面水文过程涨落最明显,最高水位也明显高于其他几处,且在整个水文过程中出流量最

多;3号坡面流持续时间短,水文过程变化也较平缓且出流量明显小于其他几处。可以认为1号坡面流为表层带调蓄过的流水;3号径流为典型地表坡面流;而5号坡面流既包括坡面集中汇集到凹槽中的地表坡面水流,另包括一部分经表层带调蓄的岩石裂隙中的流水。

由于坡面径流本身在降雨强度和降雨持续时间达到一定条件下才形成水流,而洞顶径流中一部分水是经表层岩溶带调蓄之后才汇集成水流并流到山坡下,因此,径流从形成到最大流量再到衰退的过程相对降水有一定的滞后性;而由于岩溶石山薄而零星的土壤层对降水的入渗调蓄不足,降雨后,一大部分雨水很快在地表凹槽中汇集流到山脚,因此地面径流很明显反应出岩溶石山地区地表水文动态的暴涨暴落。其中5号坡面流最有代表性,且5号坡面流经路线正好在硝盐洞顶,便于和硝盐洞滴水水文动态一起进行对比分

析,后面的分析都以5号坡面流和硝盐洞最大滴水点进行对比分析。

4.3 降雨量与水文动态变化相关关系分析

图6~9表示2012年6月22日17:00~28日19:00这一时间段降雨数据同5号地面径流以及硝盐洞内洞穴滴水的流量变化关系。总体来看,将这一时间段的降雨可分为四场比较集中的降雨,每次地面径流和硝盐洞中水文动态有着很好的对应关系,各自在图中明显的表现为四个峰值。

第一次比较集中的降雨是6月24日06:00~14:00(见图6),这段时间段累积降雨量达到77mm。本场降雨从早上3:10开始,主要降雨集中在09:00~11:00,2h累积降雨量达到48.8mm,占整场降雨量的63%。从图上可以看出,从降雨开始7h后的10:05出现坡面径流,而之前7h的降雨量不足以产生坡面流,说明坡面径流的产生明显与降雨量相关,随后硝盐洞中水文动

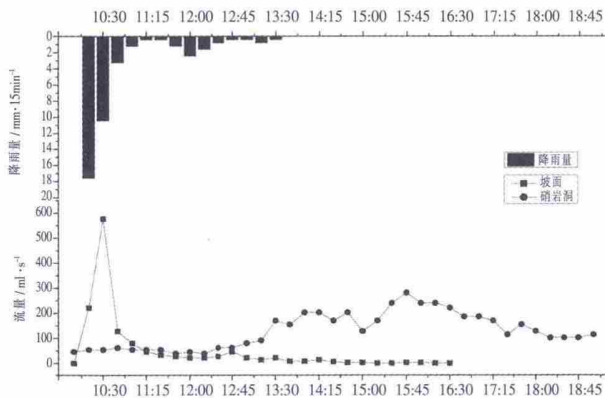


图6 6月24日降雨和坡面径流与洞穴水文动态关系图

Fig.6 The relationship between the precipitation and hydrology dynamic changes of runoff in surface and cave shaft flow on the 24th June

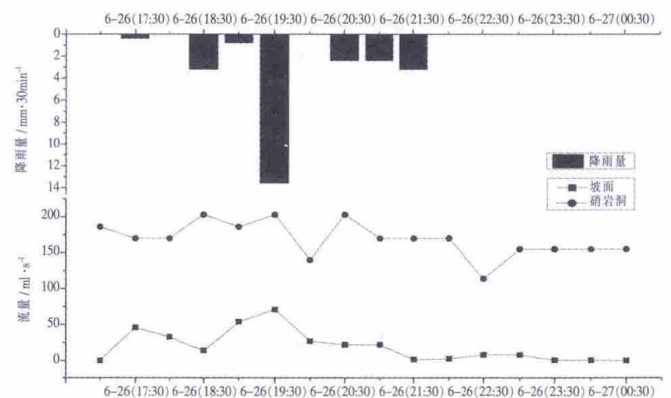


图7 6月25~26日降雨和坡面径流与洞穴水文动态关系图

Fig.7 The relationship between the precipitation and hydrology dynamic changes of runoff in surface and cave shaft flow from 25 to 26 June

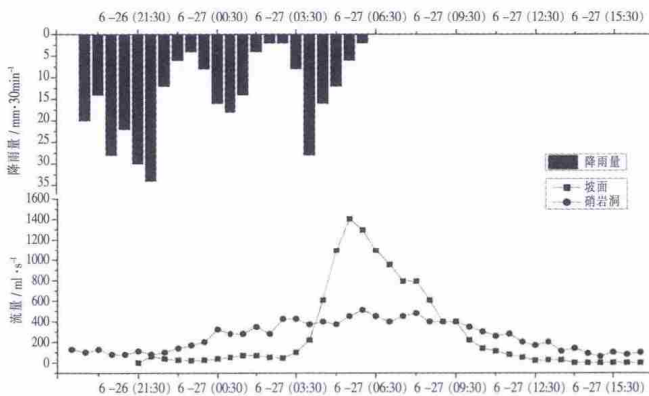


图8 6月26~27日降雨和坡面径流与洞穴水文动态关系图

Fig.8 The relationship between the precipitation and hydrology dynamic changes of runoff in surface and cave shaft flow from 26 to 27 June

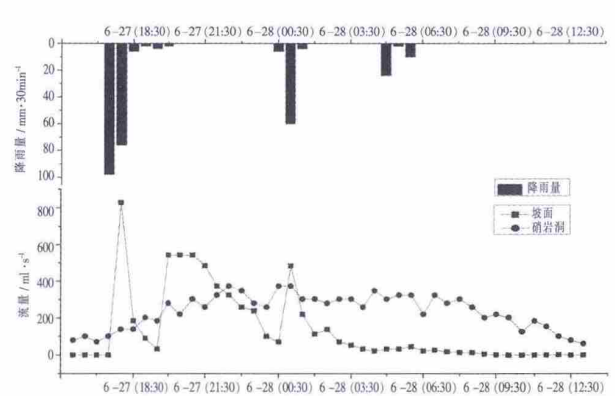


图9 6月27~28日降雨和坡面径流与洞穴水文动态关系图

Fig.9 The relationship between the precipitation and hydrology dynamic changes of runoff in surface and cave shaft flow from 27 to 28 June

态也有较大变动。本场降雨的最大雨强在 10:00~10:30, 在这半个小时累积降雨量达到 28mm。而在最大雨强的同时出现坡面径流, 并随着雨强的增大坡面径流在 15min 后达到最大, 然后随着雨强的减弱而减弱, 坡面流量也在 1h 内从最高的 577ml/s 递减到 33ml/s。很明显的反映出地表水文动态的暴涨暴落。相对于坡面, 硝盐洞中的水文动态变化相对滞后且变化缓和, 这与表层岩溶带对降雨的调蓄有关, 从图 4 中可以看出, 硝盐洞中滴水流量在降雨后 12h 后的 13:00 左右才明显上升, 并在 3h 以后的 15:45 达到最大流量, 其后逐渐缓慢递减。

第二次集中的降雨是 6 月 25 日 20:00~23:00 (见图 7), 这个阶段的降雨量为 25.2mm。由于本阶段雨强较小, 坡面径流的反应极小且持续时间短, 相对于坡面, 硝盐洞中水文动态变化明显, 达到第二个峰值。分析原因是由于前期频繁的降雨已经使表层带岩石裂隙中持水达到最大, 所以后面的连续降雨大都不被各层含水介质所吸收, 而通过大的裂隙以及岩溶管道形成垂向的渗漏流及渗透流到包气带中, 然后在硝盐洞以滴水的方式排泄。

6 月 26 日 20:00~27 日 07:00 之间为第三次集中的降雨 (见图 8), 图上可以看出本次降雨集中且累计降雨量达到 66.7mm, 较强的降雨强度和长时间的降雨, 再加上前期一段时间频繁的降雨对含水介质的补充, 使坡面水文动态和硝盐洞中滴水水文动态跟降雨量都有着很好的对应关系, 在图 8 中坡面径流跟硝岩洞滴水表现为第三次峰值; 其后的 6 月 27 日 18:00~28 日 06:00 为第四次集中的降雨 (见图 9), 本次降雨累积降雨量为 56.8mm, 但降水分不均, 就 6 月 27 日 17:00~18:00 之间 1h 的降雨量达到 35.6mm, 相对应的地表和岩洞中的水文动态表现为第四次峰值, 且由于降雨分配不均, 水文动态曲线起伏显著, 主要表现在坡面径流水文动态上的大起大落。

通过以上分析可以看出, 坡面径流与硝盐洞滴水的产生以及水文动态与降雨强度、降雨持续时间以及降雨前含水系统含水情况有着很好的对应关系, 一般是大雨或暴雨时, 雨水很快渗入土壤及表层带, 并将坡面坑洼进行填注, 随着降雨的持续, 表层带裂隙由于发育的不均一性和向下的尖灭作用, 一定量的降雨就使其达到饱和, 便产生了侧向流动的表层带水流, 表层带的水流在其一定潜水面流经一段距离后, 便在坡面下部溢出地表, 汇入地表坡面流中, 降雨在下渗及填注后

达到某一水平时, 便产生了地表的坡面径流, 地表径流汇集到坡面的溶蚀渠道形成集中流并流到坡脚; 另一部分则通过表层带中的大裂隙及向下尖灭的小裂隙形成垂向的渗漏水流及渗流, 再通过硝盐洞滴水 and 流水点进行排泄。

5 结论与讨论

(1) 岩溶石山地区特殊的含水介质决定了其产流模式与非岩溶区产流模式大相径庭, 表层岩溶带的存在使岩溶区产流模式不仅仅表现为蓄满产流模式, 并且还包括表层带的侧向水流以及裂隙管道流等 (见图 10)。

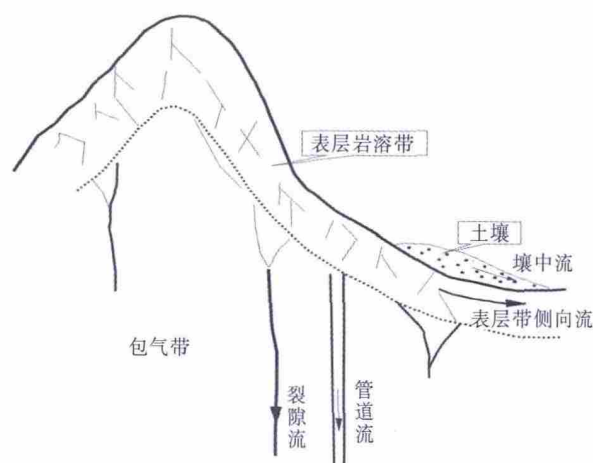


图 10 岩溶区山坡径流类型

Fig.10 The runoff type in karst mountainous slope

(2) 降雨强度、降雨持续时间和各含水系统的前期含水情况决定了岩溶石山区坡面地表和包气带水文动态变化过程: 一般当降雨强度达到大到暴雨的情况下才会产生坡面径流, 并且坡面径流整个水文动态受降雨持续时间的影响; 而经过表层带和上部包气带调蓄过的滴水水文动态变化除受降雨强度和降雨持续时间的影响外, 前期降雨使表层带和包气带岩石裂隙中持有较多的水分, 后期降雨就不再过多的地消耗于被各含水介质吸收, 而是大多汇集到一起, 通过大的裂隙和管道通过硝盐洞滴水点排泄。

(3) 在不同降雨条件下坡面径流跟洞穴滴水水文动态都表现为暴涨暴落: 坡面流表现的更为明显, 一般在降雨强度大的情况下, 半个小时内就会出现坡面径流, 并很快达到峰值, 伴随着降雨强度的减弱和停止, 坡面流也很快变小, 并且在数个小时到十几个小时内停流; 洞穴中流水水文动态表现就相对的缓和, 一般滴

水变化要滞后于降雨 3~5h,整个水文动态从上升再到衰减一般持续 1~3d。从一定程度上,坡面径流和洞穴流水分别代表了地表—表层岩溶带、表层岩溶带—上部包气带对降雨后水文动态的调蓄情况。

(4)一般在大到暴雨条件下,坡面流流量最高峰值高于洞穴流水,但由于坡面径流整个过程持续时间短,其一场降雨后所获得的水量远不如下渗到硝盐洞中的水量,并且坡面流本身流到山脚下后又通过落水洞或大的岩石裂隙渗入地下。因此,岩溶石山区在降雨后地表水流少且在地表储存时间短,成为当地人民生活、生活用水短缺的原因,考虑如何能更好的利用降雨后的地表坡面径流以及尝试如何将地下水进行研究利用一直是岩溶石山区一大问题,需要进一步的研究解决。

参考文献:

- [1] 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):543-548.(ZHANG Jiguang, CHEN Hongsong, SU Yirong, et al. Karst depression surface soil moisture space heterogeneity and scale effect [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008,45(3):543-548.(in Chinese))
- [2] 庄一鹤,张泉生,张建云,等.兴安江模型在岩溶地区的应用[J].河海大学学报(自然科学版),1989,(4):43-55. (ZHUANG Yiling, ZHANG Quansheng, ZHANG Jianyun, et al. Application of Xinanjiang model to karst region[J]. Journal of Hohai University(Natural Science Edition), 1989,(4):43-50.(in Chinese))
- [3] 严启坤. 桂林岩溶区的水量转化问题 [J]. 中国岩溶,1985,3:58-65. (YAN Qikun. Guilin karst area water transformation problem[J]. Carsologica Sinica, 1985,3:58-65.(in Chinese))
- [4] 梁虹.喀斯特流域地貌产流机制与产流特征[J].贵州师范大学学报(自然科学版),1995,13(2):23-27. (LIANG Hong.Geomorphological runoff yield mechanism and characteristics of karst drainage basin[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Science Edition), 1995, 13(2): 23-28. (in Chinese))
- [5] 严启坤.概念性岩溶水文模型中几个疑难问题的探讨[J].中国岩溶,1993,12(4):295-303. (YAN Qikun. Several problems discussed on conceptual karst hydrological model [J]. Carsologica Sinica, 1993,12(4):295-303.(in Chinese))
- [6] 梁虹,杨明德.喀斯特峰丛洼地(谷地)流域产汇流特征分析[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),1992,10(1):10-17.(LIANG Hong,YANG Mingde. Analysis of the characteristics of runoff yield and flow concentration in the drainage basin of the karst Feng-cong depression district[J]. Journal of Guizhou Normal University(Natural Science), 1992,10(1):10-17.(in Chinese))
- [7] 姜光辉,陈坤琨,于爽,等.峰丛洼地的坡地径流成分划分[J].水文,2009,29(6):14-19.(JIANG Guanghui, CHEN Kunkun, YU Shi, et al. Separating karst slope runoff in peak cluster areas [J]. Journal of China Hydrology, 2009, 29 (6):14-19.(in Chinese)).
- [8] 袁道先,戴爱德.中国南方裸露型峰丛山区岩溶水系统及其数学模型的研究[M].桂林:广西师大出版社,1996.(YUAN Daoxian, DAI Aide. Karst Water System of a Peak Cluster Catchment in South China Bare Karst Region and Its Mathematic Model [M]. Guilin: Guangxi Normal University Publishing House,1996.(in Chinese))
- [9] 卢卫中. 岩溶流域水文模型初步研究 [J]. 水文,1995,(2):29-33.(LU Weizhong. Hydrologic model preliminary study in karst watershed[J]. Journal of China Hydrology,1995,(2):29-33.(in Chinese))

Comparative Analysis of Surface Runoff Hydrologic Dynamic Characteristics in Karst Mountainous Areas: Taking Yaji Experimental Station as Study Case

CHEN Guofu^{1,2,3}, JIANG Guanghui¹, ZHOU Wenliang^{1,2}, WANG Kairan^{1,2}

(1. Karst Dynamic Laboratory, Institute of Karst Geology, Guilin 541004, China;

2. School of Geography Sciences, Southwest University, Chongqing 400700, China;

3. Shanxi Real Estate Service Company, Xian 710075, China)

Abstract: Choosing the Xiaoyan Cave located on Yaji Karst Experimental Site in Guilin and the above catchment slope as research area, this paper made a study via conducting dynamic monitor of the slope runoff and cave shaft flow in different rainfall conditions, the results show that (1) The slope runoff and vadose zone hydrologic dynamic change process in karst mountainous areas are decided by rainfall intensity, rainfall duration and the condition of the water-bearing medium prophase water situation; (2) In different rainfall conditions, the hydrologic dynamic changes of slope runoff and cave shaft flow rise and fall rapidly, and the slope runoff even more rapidly than the cave shaft flow. In general, the hydrologic dynamic change process of slope runoff last for a few hours to ten hours, but the cave shaft flow can last one to three days; (3) When the time of heavy rain or downpour, the slope maximum runoff is greater than the cave shaft flow, but the water volume in slope runoff are less than the cave shaft flow due to the short duration of the slope runoff hydrology dynamic.

Key words: vadose zone; epikarst; hydrologic dynamic; slope runoff; cave shaft flow