

典型喀斯特流域地表产流输出特征

涂成龙¹, 陆晓辉², 刘瑞禄³, 李勇³, 李瑞³, 孙泉忠³, 李龙波⁴

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081;

2. 贵州师范大学, 贵州 贵阳 550081;

3. 贵州省水土保持监测站, 贵州 贵阳 550081;

4. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 由于喀斯特区域表层岩溶带的结构和构造表现为高度的异质性, 以及大量缺失定位观测资料, 使得该区域目前还没有较为完善的产汇流模型。对特定小流域地表产流输出过程的分析, 有利于对流域内部各种水文过程的认识。本研究正是基于这一背景, 通过对一完整自然年的地表产流输出进行分析发现, 流域地表径流输出主要发生在5~10月份; 受雨强和壤中流向地表径流转化过程的影响, 5月份的地表径流产流输出为突发衰弱型伴有明显的迟滞效应, 其他月份主要为渐进增强衰弱型, 迟滞效应较5月份明显减弱; 如去除5月份的影响, 6~10月份流域地表径流输出量与降雨量呈显著正相关关系($p < 0.05$, $r = 0.99$); 壤中流向地表径流转化具有明显的季节性差异; 就全年而言, 经由卡口站地表径流输出的量占全年降雨总量的23.1%。

关键词: 喀斯特; 流域; 地表产流; 输出

中图分类号: TV121

文献标识码: A

文章编号: 1004-8227(2016)12-1879-07

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201612011

目前有资料显示喀斯特区域地表产流过程与降雨强度和降雨量呈显著相关关系, 与岩石裸露率、地下空隙度呈反向相关关系^[1-3]。土壤的石砾含量及其颗粒组成同样对水分的入渗和地表的产流过程有明显影响^[4, 5]。然而, 尽管我们已经从直观上认知我国西南喀斯特区域, 表层岩溶带是喀斯特地区水分重要的赋存与运移空间。但表层岩溶带的结构和构造在空间上表现出高度异质性, 使得建立符合喀斯特流域水文地质特征的分布式水文模型目前还存在较大困难, 同样亦难以确定地表-地下的降雨产流阈值^[6]。

由于特殊的地质背景和地形条件使得表层岩溶带上的结构和构造缺乏连续性和一致性。土壤的分布表现为大区域的地带性分布与小区域的垂直分布相互交错。在碳酸盐岩出露, 坡度较陡的坡面地带土壤的发生分布通常表现为: 面发生、不连续、溃缩于负地形内呈点状分布。这种岩石

与土壤交替错落出现, 对地表水分的入渗和汇流产生了显著的影响。在缺失长期大量定位观测资料的情况下, 目前难以形成较为合理的产汇流模型。而以流域为单位, 通过对流域出口的产流过程进行监测, 有利于反推流域内汇流、产流过程, 以及流域内对水分的截留、蒸发和渗漏过程。因此, 本研究在贵州省选择一个表层较为封闭的流域, 通过持续对卡口站流量的实时监测, 建立流量变化与时间和降雨过程的相互关系, 从流域尺度来把握喀斯特区域地表产流输出的特征, 能够为有效预防区域内由于降雨而产生的地质灾害和高效利用水资源奠定基础。

1 研究区域概况和研究方法

研究区域位于贵州省关岭县花江镇境内, 东经 $105^{\circ}34'36''$ 、北纬 $25^{\circ}49'2''$ 。依据区域俗名, 定名为蚂蝗田小流域观测点。蚂蝗田监测站建立于

收稿日期: 2016-06-03; 修回日期: 2016-09-12

基金项目: 水利部公益性项目(201401050) [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China (201401050)]; 国家重大科学研究计划(2013CB956702) [National Key Scientific Research Program (2013CB956702)]; 国家自然科学基金面上项目(41261058) [National Natural Science Foundation of China (41261058)]; 黔科合J字[[2013]2298号] [Qian Ke He J ((2013)2298)]

作者简介: 涂成龙(1978~), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为表生地球化学过程研究. E-mail: chenglongtu@163.com

2008年。除2012年外，其他年份均存在仪器设备运转不顺畅，导致部分月份监测数据有所缺失。2012年降雨量相对小于其他年份，但其降雨和产流过程与往年基本一致，且监测数据较为完整。故此，本研究选择该年份作为一个自然年的监测数据进行分析。

蚂蝗田小流域观测点面积2.43 km²，属亚热带湿润季风气候，多年平均降雨量为1 236 mm，平均气温为19.2 °C。现有植被类型多为次生乔木林、疏幼林，乔木品种主要有：柳杉、杉木、马尾松，女贞、滇柏等，土壤多为黄色石灰土，黑色石灰土和少量黄壤。区内有少量梯平地，多数山体坡度在20°~35°，主体地貌类型为中山沟谷。该小流域为半封闭型，流域地表外无其他输入源。自北向南在流域的西侧有一条冲沟，为该区域物质汇集输出的主要渠道。在该渠道的出口建设有卡口站一座，设置自动水位计1台(图1)。可设置30 s至10 min的监测间隔。此外，在卡口站楼上设置了一台HOBO小型气象站，用于雨量、气温等气象资料的观测。该区域的岩溶地貌发育的外在形态，土壤类型的分布，以及土地利用方式在空间上的变化反映了黔中喀斯特区域的典型特征，是目前贵州省喀斯特水文过程定位观测的重要点位之一。

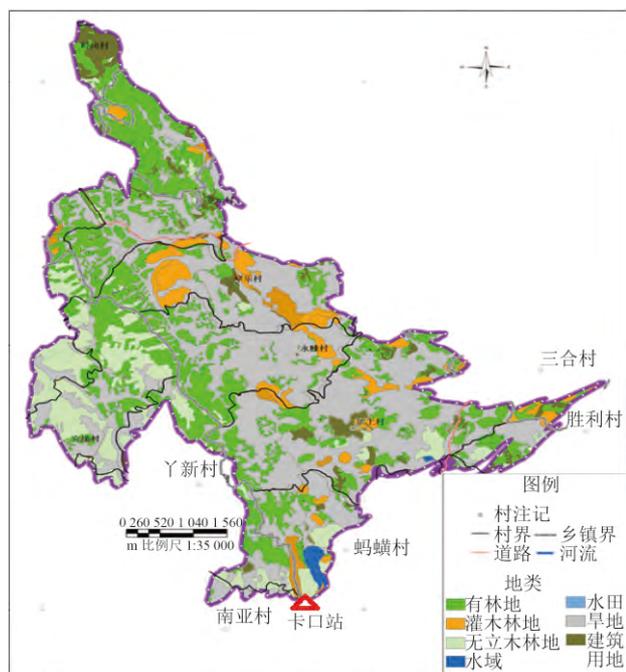


图1 蚂蝗田监测点示意图

Fig.1 Sketch of Observation Site in Mahuangtian Watershed

2 结果与分析

2.1 降雨特征

该区域年降雨量存在较为明显的丰-缺交替现象。如2009年降雨量仅为879.5 mm，2010年增长为1 319.2 mm，2011年继而降低为888.7 mm。依据关岭县多年的统计年鉴显示，该县多年平均值在1 200 mm左右。尽管多年年降雨量有所变化，但降雨的频次和时间与往年相似，即降雨量多集中在每年的5~8月，主要差异体现在强降雨过程产生的频次，这与贵州省大多数区域的降雨特征相似^[7,8]。2012年蚂蝗田小流域全年降雨量为1 039.7 mm，较多年平均值有所减少，但较2011年有所增加，为相对丰雨年份。其中，7月降雨量达298 mm，为全年降雨最多月份；4月降雨量最少，仅为2.2 mm。全年除2月、4月和12月份外，其他月降雨量均达到20 mm以上，而5月、6月和7月份降雨量更是超过了170 mm。从降雨的日分布情况看，1月的降雨日数为24 d，为最长降雨日数，但降雨总量仅为40.6 mm。除4月外，全年其他月份降雨日数均在10日以上，降雨频次较为均匀。从日降雨发生过程看，24 h最大降雨量发生在5月，降雨量达57.4 mm，为暴雨级别^①。此外，6月还产生了一次日降雨量大于50 mm的暴雨过程。日降雨量大于20 mm的中雨过程仅在5月、6月、7月和9月发生。发生的次数分别为：3次、1次、3次和1次。而大于10 mm的中雨从5月至10月均有发生，次数分别为6次、4次、6次、2次、1次和2次。

由上可知，2012年有降雨日数分布相对均一，但降雨量主要集中在5月、6月和7月，约占全年的66%，且大于20 mm的大雨均发生在这3个月，共计产生8次。这种大雨的形成极易形成地表径流，对地表产生冲刷，或通过岩溶裂隙向下渗漏，对岩溶地下水进行补充。

2.2 产流特征

位于流域出口的卡口站沟渠流量数据显示(表2)，2012年5月10日开始产生地表径流，并经历几次短暂断流，持续到10月31日后呈现持续性断流。就流量而言，7月份的流量达到全年的峰值(305 964 m³)，约占全年产流量的53%，但7月9日至10日出现断流26小时；日最大经流量也出现在该月，约为33 212 m³；就产流天数而言，5月份产流仅为6天，为间歇性产流；从6月2日开始至10月

表 1 2012年监测点降雨资料统计表

Tab.1 Statistics of Rainfall in 2012

日期	降雨总量(mm/m ³)	日最大降雨量 (mm)	次最大30 min雨强(mm/h)	降雨日数(d)	>20 mm的天数 (d)	>10 mm的天数(d)
一月	40.6/98 658	6.2	3.00	24	0	0
二月	18.2/44 226	2.2	0.80	20	0	0
三月	25.4/61 722	5.9	10.40	12	0	0
四月	2.2/5 346	1.8	1.60	2	0	0
五月	211.1/512 973	57.4	57.00	15	3	6
六月	178.0/432 540	54.8	21.40	21	1	4
七月	298.0/724 140	48.7	26.00	19	3	6
八月	86.1/209 223	13.8	11.20	17	0	2
九月	84.2/204 606	31.4	17.00	19	1	1
十月	52.8/128 304	13.2	4.80	12	0	2
十一月	30.9/75 087	6.5	8.00	11	0	0
十二月	12.2/29 646	2.0	0.60	10	0	0

表 2 2012年卡口站流量资料统计表

Tab.2 Statistics of Runoff Flow Through Observation Site in 2012

日期	径流总量(m ³)	产流天数*(d)	日平均径流量(m ³)	>500 m ³ 的天数(d)	>1 000 m ³ 的天数(d)	日最大径流量(m ³)
五月	30 324	6	5 054	6	3	16 128
六月	141 254	29	4 871	27	26	29 429
七月	305 964	31	9 870	29	27	33 212
八月	52 849	31	1 705	27	19	5 310
九月	29 163	30	972	25	8	3 922
十月	22 960	30	765	25	4	1 853

注: *凡在一天内有地表径流产生, 均计为一天。

末, 位于流域出口的卡口站几乎每天都有地表径流输出。然而9月和10月份流量仅占全年产流量的5%和3%, 甚至低于5月份的产流量。受降雨补充的影响, 日径流量大于1 000 m³的天数主要集中在6~8月份, 分别为26, 27和19 d。就产流过程而言, 5月份产流特征表现为产流开始时, 流量最大, 然后逐渐衰减; 其他产流月份则有一个先增后减的过程。

2.3 产流与降雨的相互关系

根据已有的产流理论可知, 地表产流的主要条件是降雨强度超过地面下渗能力^[9, 10]。理论上, 降雨强度越大, 地表产流的量越大, 产流滞后时间越短^[11]。但特定区域产流的过程和强度, 除受降雨强度/降雨量影响外, 还受到地表粗糙程度, 以及近地表的结构和构造影响^[10]。此外, 当上层包气带达到饱和, 包气带与潜水带之间的界面也会形成壤中流^[10, 13]。在我国西南喀斯特地区, 由于山地系统的地形条件影响, 包气带与潜水带之间的水流在某些区域能够通过特定的露头转化为地表径流^[6, 14]。这就是多数地区降雨停止后, 在特定低洼地带仍然存在水流的主要原因。然而由于我国西南喀斯特区域表层岩溶带中岩土界面犬齿交错, 参差不齐, 且岩溶裂隙大小形态和空间分布不均匀, 目前还没有一种产流理论能够准确地模

拟和阐述这一区域的地表径流产流过程。从表2可知, 位于流域出口的卡口站监测数据显示, 流域地表对外输出径流产生于5月初, 结束于10月末。与此相对应, 全年单日降雨大于10 mm的时期亦集中在这段时间。其他时段日降雨量小于10 mm。但是单日产流量大于10 mm并非流域产流输出的阈值, 如5月19日和20日单日降雨分别达到15.8 mm和12.0 mm, 并没有监测到地表径流输出。这可能是由于前期持续无降雨产生, 表层包气带对降雨产生了明显的吸持作用。

就全年而言, 经由卡口站地表径流输出的量共计582 516 m³, 占全年降雨总量的23.1%。相邻地区观测资料显示, 林地、灌丛和裸地的实际蒸散发量分别为0.053、0.016和0.012 mm/h^[15-17]。根据流域内各种土地利用类型所占比重, 流域内平均蒸散发量约为0.036 mm/h, 全年估计蒸散发315 mm (约765 450 m³)。而在流域内固持和渗漏进入地下部分约为484 mm, 约占总降雨量的47%。从图2还可以看出, 7月份降雨量最大, 其卡口站地表径流输出率也最大, 达到了42.3%。但这并不表示月降雨量大, 地表径流输出率高。对产流各月份的输出量与降雨量的相关性进行分析显示, 如果去除5月份的影响, 6~10月份卡口站径流输出量与降雨量呈显著正相关关系($p < 0.05$, $r = 0.99$)。显然, 5月

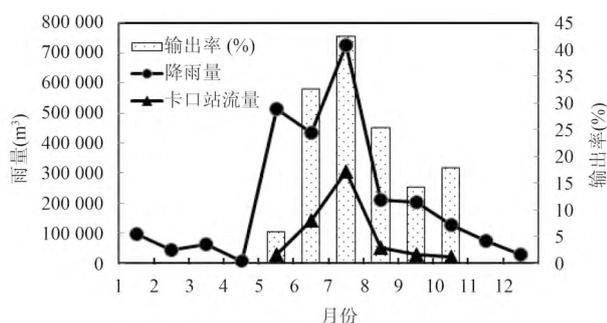


图 2 2012年度流域地表径流输出与降雨的月变化关系

Fig.2 Relationship Between Surface Runoff Output and Rainfall in 2012

前由于降雨较少，地表干燥程度较高，对水分的吸持能力较强。而5月过后，地表包气带和潜水带含水量提高，对水分的吸持能力降低，从而使得降雨易形成地表径流输出。

就地表径流系数而言，彭涛等^[18]人应用径流小区法观测所得6种喀斯特区域典型土地利用方式下地表径流系数为0.01%~12.81%。显然，本项目研究所用流域地表径流输出的观测值(23.1%)显著大于彭涛等^[18]人的观测结果。其主要原因可能是，我国西南喀斯特区域表层岩溶带存在高度的异质性，降雨进入表层岩溶带后，在特定区域表层岩溶带的壤中流，裂隙流会汇集转化成地表径流，从而提高流域的径流系数。与非喀斯特地区相比较，本项目所观测的喀斯特流域地表径流系数明显小于我国华南丘陵(>60%)，以及江淮地区等(30%~40%)^[19]。然而，由于喀斯特区域独特的二元结构，较小的地表径流系数并不代表表层岩溶带具有较强的水分滞留容纳能力，区域总的降雨输出率还有待于进一步对地下径流过程的观测。

从表3可以看出，2012年5月共产生了4场间歇性地表径流输出。第1场于5月10日4时产生，9时停止，历时6 h。初始流速和最大流速均为0.126 m³/s，为突发衰弱型。该次径流共计输出864 m³。在产生该场径流输出前和产流过程中，有一场持续性降雨过程，于5月9日11时产生，10日

7时结束，历时20 h。降雨量共计47.5 mm(约合115 425 m³)，降雨过程相对均匀，没有强降雨过程。对比降雨过程，该次产流时间比降雨初始时迟滞了17个小时，且输出量不足降雨量的千分之一。几乎全被区域内包气带和潜水带所滞留，或者向下漏失进入地下岩溶管道。第2场降雨产生于22日凌晨3时，同样为突发衰弱型，其初始流速和最大流速均为0.608 m³/s。由于该次降雨存在一次强降雨过程，产流滞后于降雨初始时间5 h，且输出率提高到约1%。第3次和第4次产流过程相差2 h，且第4次产流过程没有降雨发生。因此，第3次和第4次产流过程可视为同一场降雨触发形成。在卡口站产流前1 h左右，降雨强度突然提升至9.58 mm/h，从而促使该次产流同样为突发衰弱型。这两次产流输出共计13 051 m³，约占该次降雨量的15%。然而，在降雨停止后2 h左右，坡面及坡面上各沟渠均无明显汇流现象。仅距卡口站约500 m内的谷底沟渠有明显水流，且这两次径流输出持续了43 h，突出表现了受地形条件和地质构造的影响，壤中流向地表径流转化的过程，从而促进了该次径流输出占降雨量的比重。

根据已有的研究成果，产流滞后现象主要是由于下垫面地表对雨水的渗透和容留能力，以及降雨强度所决定^[2, 20]。自6月2日以后，卡口站出现了持续性地表径流输出。但直到6月下旬地表径流输出对降雨过程响应的时滞仍然还有较为明显的滞后现象。如6月21日降雨量达到55.1 mm，但卡口站的流量直到22日上午5点才增强至1.053 m³/s。其后，卡口站地表径流输出对降雨过程的响应通常较前段时间反应更为迅速，但亦根据最大雨强出现的时间有所变化(图3~图7)。从图4可以看出从7月3日至11日，连续9天无降雨。卡口站检测数据显示地表径流共计输出13 044 m³。但事实上，9日11时卡口站出现断流至10日12时，壤中流向地表径流输出转化时间为7 d时间。8月，9月和10月同样出现连续数日无降雨发生(8月22日~28日，9月

表 3 5月份卡口站径流变化与降雨过程表

Tab.3 Main Characteristics of Rainfall and Runoff Output Through Observation Site in May

产流次数	径流产生过程				降雨过程*			
	初始时间(日/时)	初始流速(m ³ /s)	最大流速(m ³ /s)	历时(h)	初始时间(日/时)	最大雨强(mm/h)	降雨量mm	历时**(h)
1	10/4	0.126	0.126	6	9/11	2.37	47.5	20
2	22/3	0.608	0.608	31	21/22	12.51	72.3	13
3	29/13	0.510	0.510	25	29/3	9.58	36.6	10
4	30/16	0.003	0.024	18		无降雨		

注：* 仅列出产流前12h和产流时的降雨过程；** 历时并不表示是连续降雨过程。

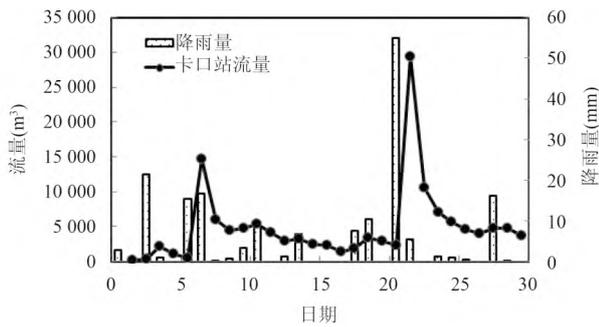


图 3 6月份降雨和卡口站日流量变化
Fig.3 Day Rainfall and Runoff Output in June

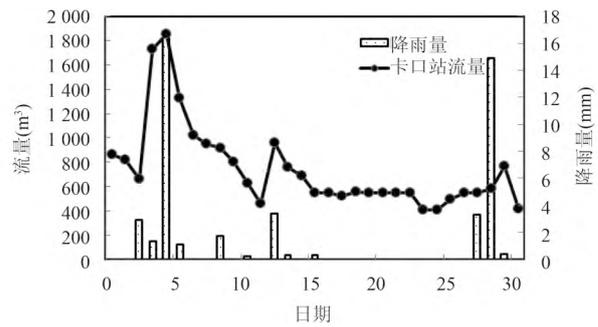


图 7 10月份降雨和卡口站日流量变化
Fig.7 Day Rainfall and Runoff Output in October

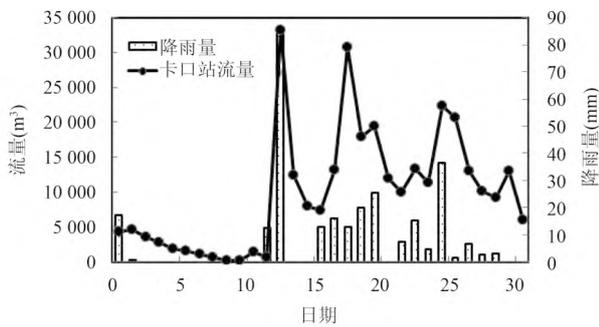


图 4 7月份降雨和卡口站日流量变化
Fig.4 Day Rainfall and Runoff Output in July

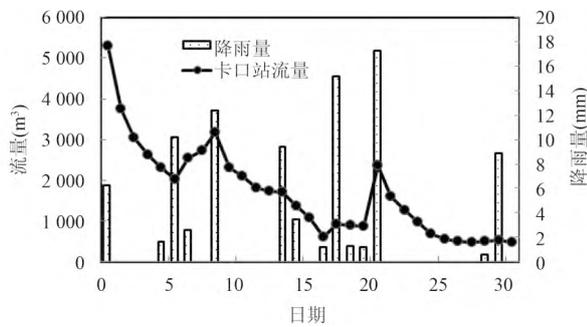


图 5 8月份降雨和卡口站日流量变化
Fig.5 Day Rainfall and Runoff Output in August

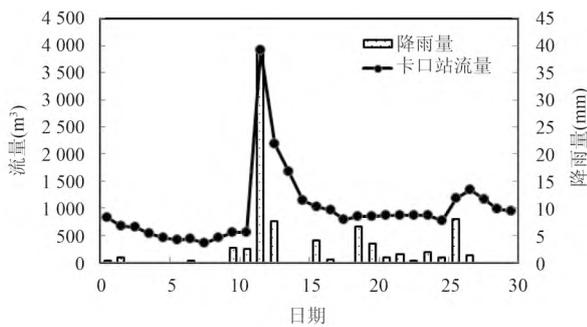


图 6 9月份降雨和卡口站日流量变化
Fig.6 Day Rainfall and Runoff Output in September

3日~9日和10月15日~27日), 输出量分别为6 037, 3 307和6 901 m³。尽管这几个月内地表径流未出现断流现象, 但径流量随时间的推移, 逐渐降低最小值0.005 m³/s。而在10月28日至30日虽然有18.6 mm的降雨补充, 地表径流还是持续性断流。显然, 壤中流向地表径流径流转化具有明显的季节性差异。尽管7月份降雨较为充沛, 但主要是作为表层岩溶系统中包气带和潜水带的补充, 加之气温较高, 地表蒸腾作用较为强烈, 壤中流向地表径流转化的时间较10月份短。此外, 我们对历次30 min最大降雨强度与径流流量变化进行了相关分析, 发现其有正相关趋势, 但是未达到显著水平。其产生机制过于复杂, 在此不做讨论。

3 结论

(1) 受雨强和壤中流向地表径流转化过程的影响, 流域地表径流输出可分为突发衰弱型、渐进增强衰弱型两类。突发衰弱型主要出现在长时无降雨, 突发强降雨过程后, 5月份发生得较为集中。渐进增强型为前期有一定降雨, 后期降雨过程较为均匀, 无强降雨现象时产生的径流输出。6月下旬后卡口站径流输出主要为渐进增强衰弱型。

(2) 就全年而言, 经由卡口站地表径流输出的量共计582 516 m³, 占全年降雨总量的23.1%。该值远大于应用传统径流小区收集池观测的径流系数。对产流各月份的输出量与降雨量的相关性进行分析显示, 如果去除5月份的影响, 6~10月份卡口站径流输出量与降雨量呈显著正相关关系($p < 0.05$, $r = 0.99$)。

(3) 5月前由于降雨较少, 地表处于相对干燥状态, 对雨水的吸持作用较强。5、6月卡口站的地

表径流输出对降雨量过程的响应存在明显的滞后效应。6月后,卡口站径流输出对降雨响应的滞后效应明显缩短,且存在显著的壤中流向地表径流转化的过程。5月份降雨量较大,但主要在流域内被滞留或向下渗漏,降雨量和降雨强度与地表径流输出没有明显相关性。

(4)从5月底开始,壤中流向地表径流的转化提升了流域地表径流输出占降雨量的比重。壤中流向地表径流输出转化过程是保证卡口站6月至10月持续无长时间断输出的关键,但壤中流向地表径流转化具有明显的季节性差异。

参考文献:

- [1] 杨智,戴全厚,黄启鸿,等.典型喀斯特坡面产流过程试验研究[J].水土保持学报,2010,24(4):78-81.
【YANG Z, DAI Q H, HUANG Q H, et al. Experimental study of runoff processes on typical karst slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(4): 78-81.】
- [2] 胡奕,戴全厚,王佩将.喀斯特坡耕地产流特征及影响因素[J].水土保持学报,2012,26(6):46-51.
【HU Y, DAI Q H, WANG P J. Runoff features and the influencing factors on karst sloping farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(6): 46-51.】
- [3] 易连兴,夏日元,唐建生,等.西南岩溶地下河流量重复统计问题及对策探讨[J].中国岩溶,2015,34(1):72-78.
【YI L X, XIA R Y, TANG J S, et al. Dealing with overestimates of underground river discharge in karst areas of southwestern China[J]. Carsologica Sinica, 2015, 34(1): 72-78.】
- [4] 毛天旭,朱元骏,邵明安,等.模拟降雨条件下含砾石土壤的坡面产流和入渗特征[J].土壤通报,2011,42(5):1214-1218.
【MAO T X, ZHU Y J, SHAO M A, et al. Characteristics of runoff and infiltration in stony soils under simulated rainfall conditions[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(5): 1214-1218.】
- [5] 杨奇勇,蒋忠诚,袁道先,等.广西典型岩溶区土壤水分含量空间自相关分析[J].中国岩溶,2015,34(3):260-265.
【YANG Q Y, JIANG Z C, YUAN D X, et al. Spatial autocorrelation analysis of soil water content in a karst region of Guangxi province[J]. Carsologica Sinica, 2015, 34(3): 260-265.】
- [6] 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.
【JIANG G H, WU J C, GUO F, et al. Threshold value of epikarst runoff in forest karst mountain area[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(1): 72-77.】
- [7] 张志才,陈喜,王文,等.贵州降雨变化趋势与极值特征分析[J].地球与环境,2007,35(4):351-356.
【ZHANG Z C, CHEN X, WANG W, et al. Analysis of rainfall trend and extreme events in Guizhou[J]. Earth and Environment, 2007, 35(4): 351-356.】
- [8] 熊亚兰,张科利,杨光敏,等.贵州省年降雨量和天然年径流量年际变化研究[J].水土保持学报,2009,23(1):36-40.
【XIONG Y L, ZHANG K L, YANG G X, et al. Periodic changes of the annual precipitation and annual natural runoff in Guizhou province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(1): 36-40.】
- [9] 芮孝芳.产流模式的发现与发展[J].水利水电科技进展,2013,33(1):1-6,26.
【RUI X F. The discovery and development of runoff formation models[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(1): 1-6, 26.】
- [10] 刘贤赵,康绍忠.降雨入渗和产流问题研究的若干进展及评述[J].水土保持通报,1999,19(2):57-62.
【LIU X Z, KANG S Z. Some developments and review of rainfall-infiltration-runoff yield research[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1999, 19(2): 57-62.】
- [11] 李军,刘昌明,王中根,等.现行普适降水入渗产流模型比较研究:SCS与LCM[J].地理学报,2014,69(7):926-932.
【LI J, LIU C M, WANG Z G, et al. Two universal runoff yield models: SCS vs. LCM[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(7): 926-932.】
- [12] 吕刚,吴祥云.土壤入渗特性影响因素研究综述[J].中国农学通报,2008,24(7):494-499.
【LV G, WU X Y. Review on influential factors of soil infiltration characteristics[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(7): 494-499.】
- [13] 芮孝芳.水文学原理[M].北京:中国水利水电出版社,2004.
- [14] 雷廷武,刘汗,潘英华,等.坡地土壤降雨入渗性能的径流-入流-产流测量方法与模型[J].中国科学D辑:地球科学,2005,35(12):1180-1186.
【LEI T W, LIU H, PAN Y H, et al. Method and model of measurement for soil runoff-infiltration in slope[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2005, 35(12): 1180-1186.】
- [15] 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.
【ZHANG Z C, CHEN X, SHI P, et al. Distributed hydrological model and eco-hydrological effect of vegetation in karst watershed[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(6): 806-811.】
- [16] 郭小娇,姜光辉,汤庆佳,等.典型岩溶石山包气带洞穴水流的水文过程浅析[J].中国岩溶,2014,33(2):176-183.
【GUO X J, JIANG G H, TANG Q J, et al. Analysis of hydrological process of drip water in the aeration zone of a typical karst stone hill[J]. Carsologica Sinica, 2014, 33(2): 176-183.】
- [17] 申双和,盛琼.45年来中国蒸发皿蒸发量的变化特征及其成因[J].气象学报,2008,66(3):452-460.
【SHEN S H, SHENG Q. Changes in pan evaporation and its cause in China in the last 45 years[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2008, 66(3): 452-460.】
- [18] 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.
【PENG T, WANG S J, ZHANG X B, et al. Results of preliminary monitoring of surface runoff coefficients for karst slopes[J]. Earth and Environment, 2008, 36(2): 125-129.】
- [19] 余新晓,毕华兴.水土保持学[M].3版.北京:中国林业出版社,2013.
【YU X X, BI H X. Soil and Water Conservation[M]. 3rd ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2013.】
- [20] 王永磊,李振,景雪,等.均匀降雨条件下不同下垫面产汇流特

性试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2012(2): 38-41.

【WANG Y L, LI Z, JING X, et al. Research on runoff-producing and flow concentration characteristics of different underlying surfaces

under uniform rainfall conditions[J]. China Rural Water and Hydropower, 2012(2): 38-41.】

OUTPUT CHARACTERISTICS OF SURFACE RUNOFF IN TYPICAL KARST WATERSHED

TU Cheng-long¹, LU Xiao-hui², LIU Rui-lu³, LI Yong³, LI Rui³, SUN Quan-zhong³, LI Long-bo⁴

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;

2. Guizhou Normal University, Guiyang 550081, China;

3. Soil and Water Conservation Station of Guizhou Province, Guiyang 550081, China;

4. Guiyang Engineering corporation. China Power. Guiyang 550081, China)

Abstract: Modeling on runoff dynamics in Karst region of Southwest of China is nearly impossible due to high heterogeneity of carbonate structure and composition, and the shortage of observed data in site. It is helpful to know the different water processes through observing and analyzing the variation of flow output in a small watershed exit. Based on the background, this research has analyzed flow output in a whole calendar year. The results indicated that the flow output emerged only from May to October. With the influences of rainfall intensity and conversion process of interflow to surface runoff, the flow output broken out after several hours of rain, then faded out slowly in May. But the flow output gathered strength with rain in June to October and the lag-effect was shorter than in May. With exception of May, the relationship between rainfall and flow output amount was significant from June to October. There were seasonal variations in conversion of interflow to surface flow, which determined the flow duration in exit of watershed. The amount of flow output accounted for approximately 23.1% of annual rainfall.

Key words: karst; watershed; surface runoff; output