

喀斯特小流域坡面与流域降雨产流产沙特征

杜波¹, 唐丽霞¹, 潘佑静^{1,2}, 杨智³

(1. 贵州大学 林学院, 贵阳 550025; 2. 贵州省瓮安县水务局,
贵州 瓮安 550400; 3. 贵州省水土保持技术咨询研究中心, 贵阳 550002)

摘 要:基于贵州省关岭县蚂蝗田水土保持监测站坡面及小流域的监测数据,分析了喀斯特坡面和小流域两个不同尺度下的降雨产流产沙特征。结果表明:次降雨量达到 9.1 mm(雨强大)和 10.5 mm(雨强小),坡面发生产流产沙。产流产沙的次降雨量(P)、平均雨强(I)、最大 30 min 雨强(I_{30})、最大 60 min 雨强(I_{60})、降雨历时(T)分别主要集中在 10~40 mm, 2~10 mm/h, 5~30 mm/h, 5~20 mm/h, 1~10 h;与产流产沙相关度的高低为: $P>I_{60}>I_{30}>T$ 。不同措施径流小区产流产沙存在显著性差异,荒草地产流产沙量最高;经果林+玉米的坡耕地次之;水保林、岩石裸露率高的荒草地最低。小流域与径流小区产流产沙的月变化趋势相似,但数值差异极大,产流产沙不同步,径流小区的数据不能完全反映喀斯特地区产流产沙特征。

关键词:喀斯特; 径流小区; 小流域; 降雨; 产流产沙

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)01-0001-06

Characteristics of Runoff and Sediment Yields in the Karst Hillslope and Small Watershed

DU Bo¹, TANG Lixia¹, PAN Youjing^{1,2}, YANG Zhi³

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Weng'an County Water Authority in Guizhou, Weng'an, Guizhou 550400, China;

3. Technical Consulting Research Center of Soil and Water Conservation in Guizhou, Guiyang 550002, China)

Abstract: The objective of this study was to analyze characteristics of runoff and sediment yields at two different scales (hillslope and watershed) in karst area. Data were collected in a soil and water loss monitoring station in Mahuangtian of Guanling County, Guizhou Province. The results showed that runoff and sediment began to produce when the accumulated rainfall of single event reached 9.1 mm with high rainfall intensity and 10.5 mm with low rainfall intensity. After runoff and sediment production, rainfall (P), average rainfall intensity (I), maximum 30 min rainfall intensity (I_{30}), maximum 60 min rainfall intensity (I_{60}) and rainfall duration (T) were 10~40 mm, 2~10 mm/h, 5~30 mm/h, 5~20 mm/h, 1~10 h, respectively. Statistical analysis showed that the levels of correlation between the rainfall characteristics and runoff/sediment yield decreased in the order: $P>I_{60}>I_{30}>T$. The differences in runoff and sediment yields were significant under the different measures. The waste-grassland without measures produced the highest runoff and sediment yields following by the slope cropland with economic fruit forest+maize, and the waste-grassland, and runoff and sediment yields in the water conservation forest and waste land with higher bare-rock rate were the lowst. Runoff and sediment yields from the small watershed and hillslope have same monthly change trend, but the yields were different. Runoff and sediment production processes were out of sync for the small watershed and hillslope. Therefore, the results from hillslope cannot fully reflect the characteristics of the runoff and sediment yield in the karst area.

Keywords: karst; runoff plot; small watershed; rainfall; runoff and sediment yield

我国西南喀斯特生态环境脆弱,水土流失严重,加之其独特的水文二元结构,使得该区生态治理、水土流失防治已成为众多领域研究的关注点。与常态地貌相比,喀斯特地区水土流失研究起步晚,理论研究和 技术较为落后,缺乏长期定位监测资料及研究^[1-2],水土流失规律不明确^[3]。喀斯特岩溶地区地形条件复杂多变,不同尺度(坡面、流域和区域)上的水土流失规律有很大的不同^[4]。当前喀斯特土壤侵蚀机理研究主要集中在小尺度的坡面径流小区^[5-9],小尺度上研究又因为区域差异性大而适用性不足,无法推广到大尺度上运用^[10],而较大尺度(流域或区域)上的研究又比较欠缺。本文利用蚂蝗田小流域和流域内坡面径流小区的监测资料,分析喀斯特坡面和小流域产流产沙特征,以及不同尺度之间产流产沙的均质性和异质性。期望进一步了解喀斯特岩溶地区不同尺度产流产沙的规律,为该地区不同尺度水土流失治理提供参考依据。

1 研究区概况

研究区位于贵州省安顺市关岭县花江镇蚂蝗田水土保持监测站,东经 105°34′36″、北纬 25°49′02″,所属河流为珠江流域北盘江水系蚂蝗田小流域。小流域以水

力侵蚀为主,属亚热带湿润季风气候,多年平均降雨量 1 236 mm,多年平均气温 19.2℃,土壤为黄壤;地貌以低中山丘陵岩溶峰林、峰丛、洼地、谷地为主,海拔 1 160~1 775 m,高差大;流域周围多溶洞出现,岩溶石漠化发育。流域内林地面积最大,其次是旱地、水田、居民地、草地,植被多为次生乔木林、疏幼林,乔木品种主要有:杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、柳杉(*Cryptomeria fortunei*)、光皮桦(*Betula lumini fera*)等。

2 材料与方法

2.1 径流小区与卡口站

2008 年 6 月蚂蝗田小流域建立径流小区 6 个(表 1),坡度、坡向、土壤、地貌基本一致,1 号、3 号、5 号、6 号为标准径流小区,集雨面积 100 m²,2 号、4 号径流小区坡长 20 m,宽 10 m,集雨面积 200 m²。1—5 号小区施加水土保持生物措施,1 号、4 号、5 号种植经果林(黄花梨),2 号、3 号种植水土保持林(女贞),6 号为荒草地。主要监测降雨、径流、土壤侵蚀量。小流域于 2009 年 4 月布设卡口监测站,控制流域集雨面积 2.26 km²,布设仪器包括 SWZ 型周记式水位计、流速仪等,并正式开展水位、泥沙的观测取样和实验室样品处理分析等观测项目。

表 1 径流小区基本情况

径流 小区	长/m	宽/m	坡度	土壤 类型	原地貌	基岩 种类	岩石 裸露/%	措施	黄花梨/ 女贞数量
1 号	20	5	15°	黄壤	坡耕地	石灰岩	0	黄花梨+玉米	41
2 号	20	10	20°	黄壤	荒草地	石灰岩	53	女贞	12
3 号	20	5	20°	黄壤	荒草地	石灰岩	46	女贞	15
4 号	20	10	20°	黄壤	坡耕地	石灰岩	30	黄花梨+玉米	46
5 号	20	5	20°	黄壤	坡耕地	石灰岩	30	黄花梨+玉米	26
6 号	20	5	20°	黄壤	荒草地	石灰岩	0	荒草地	

注:现场调查,2 号、3 号、4 号、5 号小区的生物措施期较短,苗木小,而 1 号小区苗木较大。

2.2 数据处理

根据数据的完整性,选取蚂蝗田水土保持监测站径流小区 2012—2013 年的监测数据,卡口站点水位监测选取 2012 年 5—10 月(仪器故障,5 月份数据不全)监测数据。径流小区产流共 30 次,统计分析径流小区次降雨量(P)、平均雨强(I)、最大 30 min 雨强(I_{30})、最大 60 min 雨强(I_{60})、降雨历时(T)、径流深、径流系数、产沙量等指标,指标间进行相关性分析,径流小区间进行比较;统计小流域和径流小区同时间段(2012 年 5—10 月)降雨产流产沙情况,进行不同尺度下的对比分析。运用 Excel 和 SPSS 17.0 软件进行数据分析处理。

3 结果与分析

3.1 次侵蚀性降雨特征

根据监测数据统计,研究区 2012 年、2013 年降雨总量分别为 1 039.7 mm 和 740.4 mm,径流小区分别产流产沙 16 次和 14 次,侵蚀性降雨分别为 537.4 mm 和 355.4 mm。因仪器故障,2012 年 5 月 1 日和 7 月 1 日雨强数据缺失。有研究表明^[11-12],次降雨过程坡面产流量与雨强密切相关,尤其与 I_{30} 显著相关,所以统计 2012—2013 年径流小区 30 次侵蚀性降雨特征值包括: P 、 I 、 I_{30} 、 I_{60} 、 T (图 1),对应的变化范围为 9.1~87.7 mm,1.22~14.1 mm/h,4.8~49.4 mm/h,2.5~41.7 mm/h,0.95~20.37 h,分别

集中在 10~40 mm,2~10 mm/h,5~30 mm/h,5~20 mm/h,1~10 h,聚集了 73.33% 以上的侵蚀性降雨次数,是次侵蚀性降雨特征值的主要分布范围。 P 与 I , I_{30} , I_{60} , 降雨历时的决定系数 R^2 为 0.084, 0.389, 0.503, 0.213。最小两次降雨量为 2013 年 5 月 9 日的 9.1 mm(前期 12 h 未降雨)和 2013 年 5 月 2 日的 10.5 mm(前期 28 h 未降雨)。5 月 9 日降雨历时短,只有 65 min,但雨强大, I , I_{30} , I_{60} 分别为 8.40 mm/h, 19.60 mm/h, 9.10 mm/h; 5 月 2 日降雨历时较长,达到 666 min, I , I_{30} , I_{60} 是 30 次产流产沙中最小,分别只有 0.95 mm/h, 4.80 mm/h 和 2.50 mm/h。彭韬等^[13] 研究中显示喀斯特地区日降雨达到 7.4 mm 时没有产流,但 3 d 连续降雨量到达 15 mm 时就可以产流。本文以次降雨作为分析,得出喀斯特地区次降雨量达到 9.1 mm 和 10.5 mm 时,坡面都可以产流产沙,但前者的雨强远大于后者。

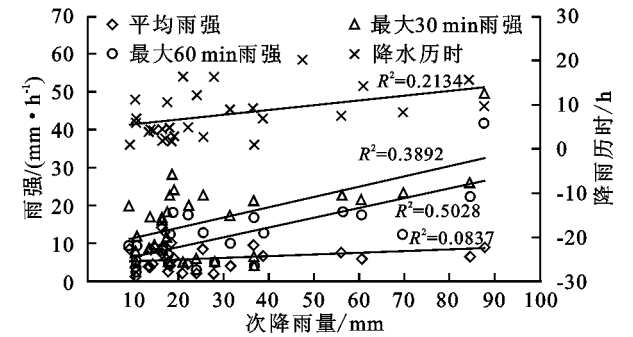


图 1 产流产沙次降雨分布特征

3.2 径流小区产流产沙分析

径流小区面积不统一,采用径流深来表示产流量。不同小区间因为原地貌、生物措施、岩石裸露率等存在差异,对应径流小区产流产沙也存在一定的差异。相同措施小区产流产沙差异小,不同措施小区产流产沙差异大。同种措施小区又因为岩石裸露、措施量的多少而存在一定差异(表 2)。1—6 号小区径流深变化为:0.23~3.56 mm,0.10~1.71 mm,0.10~2.80 mm,0.15~2.57 mm,0.23~5.40 mm,0.34~9.32 mm,径流系数变化为:0.010~0.206,0.004~0.056,0.006~0.100,0.006~0.084,0.011~0.149,0.014~0.166,产沙量变化为:0.070~2.238 t/km², 0.003~0.570 t/km², 0.003~1.094 t/km², 0.005~1.643 t/km², 0.003~1.871 t/km², 0.121~4.507 t/km²。径流小区平均产流大小为:2 号<3 号<4 号<1 号<5 号<6 号,平均产沙量为:2 号<3 号<4 号<5 号<1 号<6 号,平均径流系数大小为:2 号<3 号<4 号<5 号<1 号<6 号。标准差方面:径流深、径流系数和产沙量以 6 号小区最大,1 号、4 号、5 号次之,2 号、3 号最小。而变异系数方面:没岩石裸露的 1 号、6 号小区径流深和产沙量变异程度最小,离散程度小,产流产沙波动变化小,但径流系数波动比较大;有岩石裸露的 2—5 号小区变异度大,产流产沙波动变化大。

表 2 径流小区产流产沙情况

小区 编号	产流 次数	径流深/mm					径流系数					产沙量/(t·km ⁻²)				
		min	max	mean	SD	Cv	min	max	mean	SD	Cv	min	max	mean	SD	Cv
1 号	30	0.23	3.56	1.36	1.06	0.78	0.01	0.21	0.05	0.02	0.40	0.07	2.24	0.65	0.57	0.88
2 号	30	0.10	1.71	0.42	0.46	1.10	0.00	0.06	0.01	0.01	0.71	0.00	0.57	0.14	0.14	1.04
3 号	30	0.10	2.80	0.62	0.70	1.13	0.01	0.10	0.02	0.01	0.48	0.00	1.09	0.26	0.27	1.03
4 号	30	0.15	2.57	0.83	0.70	0.84	0.01	0.08	0.03	0.01	0.34	0.01	1.64	0.38	0.39	1.03
5 号	30	0.23	5.40	1.46	1.33	0.91	0.01	0.15	0.05	0.02	0.41	0.00	1.87	0.61	0.75	1.23
6 号	30	0.34	9.32	3.03	2.35	0.78	0.01	0.17	0.11	0.05	0.47	0.12	4.51	1.23	1.09	0.88

注:min 为最小值;max 为最大值;mean 为平均值;SD 为标准差;Cv 为变异系数。

运用 LSD 多重比较法检验不同小区之间的径流深、径流系数和产沙量,分析不同类型小区产流产沙的差异显著性。表 3 结果显示:1 号与 4 号、5 号均是黄花梨+玉米种植,在产流产沙方面没有显著差异,而与 2 号、3 号、6 号达到差异显著;2 号与 3 号、4 号没有显著差异,与 1 号、5 号、6 号差异极显著;3 号与 4 号没有显著差异,与 5 号、6 号差异显著;4 号与 5 号没有显著差异,与 6 号差异极显著;6 号与其他小区差异极显著。径流系数方面,6 号>1 号、5 号>2—4 号,且达到差异极显著。总的来说,未经任何措施处理的荒草地产流产沙和径流系数值最大,套种经

果林(黄花梨)的玉米坡耕地次之,而种植的水保林(女贞)的荒草地,种植树木量少,且岩石裸露率高达 50% 左右,径流泥沙容易随着岩石发生向下流失,形成地下流,所以产流产沙和径流系数值最低,有研究认为裸岩可以降低地表径流速度,岩石裸露高的地区产流产沙有减弱趋势^[14],灌草坡的产流产沙量远比林地的高^[6]。

径流小区降雨—径流—泥沙相关指标 Pearson 相关性分析(表 4)表明:1—6 号小区径流深与降雨量, I_{30} , I_{60} 在 0.01 水平下均显著相关,与降雨量相关程度最高,相关系数 $r=0.86\sim0.94$,其次是 I_{60} , $r=$

0.64~0.77,最小的是 I_{30} , $r=0.54\sim0.65$;1—6 号小区径流系数与降雨量, I_{30} , I_{60} 在 0.05,0.01 水平上均无显著相关, $r<0.35$;1—6 号小区产沙量与降雨量、径流深在 0.01 水平上均达到显著相关,与径流深的相关性高于降雨量。总的来说,1—6 号小区产流

产沙与次降雨量相关程度最高,其次是 I_{60} , I_{30} ,降雨历时;径流系数与次降雨、雨强、降雨历时没有明显相关关系。李瑞等^[9]研究得出喀斯特不同种植的径流小区降雨量和产沙量相关系数均超过了 0.5,雨强和产沙量关系并不明显,本文结论与其相一致。

表 3 径流小区间产流产沙显著性分析

径流小区	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号
径流深/mm	1.36Bb	0.42Cc	0.62BCc	0.83BCbc	1.46Bb	3.03Aa
径流系数	0.05Bb	0.01Cc	0.02Cc	0.03Cc	0.05Bb	0.11Aa
产沙量/(t·km ⁻²)	0.65Bb	0.14Cc	0.26BCc	0.38BCbc	0.61Bb	1.23Aa

注:同一行中,不同小写字母表示差异显著($p<0.05$),不同大写字母表示差异极显著($p<0.01$)。

表 4 径流小区产流产沙相关性分析

指标	径流 小区	径流 系数	产沙量/ (t·km ⁻²)	I_{30} / (mm·h ⁻¹)	I_{60} / (mm·h ⁻¹)	降雨 历时/min	次降 雨量/mm
径流深/mm	1 号	0.36	0.76**	0.54**	0.64**	0.46*	0.91**
	2 号	0.47**	0.81**	0.65**	0.77**	0.42*	0.89**
	3 号	0.60**	0.63**	0.62**	0.71**	0.33	0.86**
	4 号	0.36	0.55**	0.63**	0.74**	0.44*	0.94**
	5 号	0.47**	0.60**	0.57**	0.67**	0.45*	0.94**
	6 号	0.25	0.49**	0.58**	0.69**	0.26	0.88**
径流系数	1 号		0.37*	-0.05	0.04	0.05	-0.03
	2 号		0.46*	0.24	0.35	0.03	0.14
	3 号		0.38*	0.21	0.33	0.06	0.20
	4 号		0.11	0.14	0.21	0.05	0.09
	5 号		0.37*	0.16	0.26	0.11	0.19
	6 号		0.09	0.04	0.06	0.37*	-0.16
产沙量/ (t·km ⁻²)	1 号			0.35	0.36	0.31	0.62**
	2 号			0.64**	0.76**	0.43*	0.66**
	3 号			0.48*	0.48*	0.22	0.58**
	4 号			0.43*	0.50**	0.33	0.62**
	5 号			0.45*	0.49**	0.59**	0.55**
	6 号			0.16	0.21	0.22	0.51**

注:* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关,** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

3.3 小流域与小区产流产沙对比分析

卡口站监测资料显示:小流域和径流小区产流产沙均在 5—10 月份,由于 5 月份仪器故障,无法正常监测到流域水位变化,5 月份的监测值比实际值小。不同区域尺度下的产流产沙并不同步,例如:2012 年 10 月份小流域监测到径流泥沙(少量),但是径流小区却没有产流产沙出现。为减小误差和便于比较,以月为单位统计小流域和径流小区(10 月没产流)的月降雨量—径流量—泥沙量。流域日降雨量与径流量变化(图 2),5—10 月的降雨量分别为 211.1 mm,178.0 mm,298.0 mm,86.1 mm,84.2 mm,52.8 mm,径流小区 5—9 月产流次数分别为 3 次、4 次、7 次、1 次、1 次,产流主要集中在降雨量最多的 7 月份。

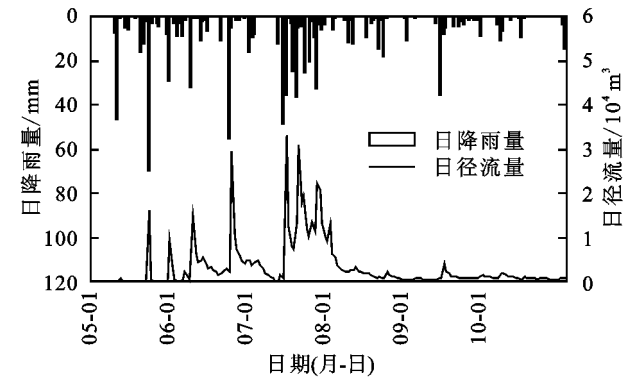


图 2 2012 年小流域日降雨径流情况

小流域和坡面径流小区的径流深、径流系数、产沙量变化趋势相似(图 3—5),但小流域 5 月份的变化趋势不太一致,值比较偏低,这恰好与本月仪器出现故障有

关。流域与小区7月份的径流深最大,降雨越多的月份径流深越大,小流域5—10月径流深为13.42 mm, 62.51 mm, 135.38 mm, 23.38 mm, 12.90 mm, 10.16 mm, 远大于6个径流小区径流深,径流深最大的6号小区5—9月径流深仅为10.75 mm, 11.99 mm, 24.39 mm, 2.74 mm, 3.01 mm, 分别只有小流域的80.15%(异常), 19.18%, 18.01%, 11.72%, 23.36%。流域年径流深为257.75 mm, 1—6号径流小区为23.15 mm, 6.56 mm, 9.30 mm, 14.03 mm, 25.38 mm, 52.88 mm, 流域分别是1—6号径流小区的11倍、39倍、28倍、18倍、10倍、5倍。这表明小流域的产流能力远高于流域内的坡面径流小区,降雨产流汇入沟道(卡口站)时,从坡面地表径流汇入的较少,而主要是以地下径流汇入河道为主,这有可能是导致如此巨大差异的原因,因为喀斯特岩溶地区岩石裂隙、地下暗河发育,水循环方式独特,降雨入渗率高,地表缺水而地下水丰富,水流以垂向运动为主^[3],降雨入渗到地下,从地下流入到沟道等低洼处。有研究认为,喀斯特岩溶地区地表漏水严重,首先到达地面的降雨有90%迅速渗入地下^[15]。

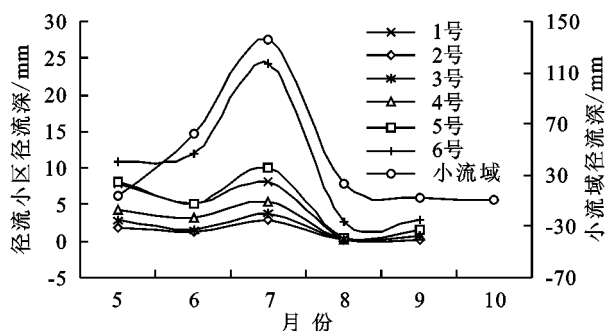


图3 小流域与径流小区产流量变化

小流域径流系数同样远高于坡面径流小区(图4), 径流系数的月变化与径流深变化趋势基本一致(除6号小区)。小流域径流系数5—10月分别为: 6.36%, 35.12%, 45.43%, 27.16%, 15.33%, 19.24%, 年径流系数为28.32%; 径流系数最高的6号径流小区5—9月径流系数只有6.99%, 9.50%, 12.11%, 15.93%, 7.77%, 是小流域的110.01%(异常), 27.05%, 26.65%, 58.65%, 50.69%。1—6号径流小区年径流系数更低, 只有4.31%, 1.35%, 1.92%, 2.61%, 4.72%, 9.84%。小区径流系数的监测结果与相关研究一致, 彭韬等^[13]针对喀斯特地表径流系数监测中得出喀斯特径流小区径流系数很小, 只有0.01%~12.81%, 地表径流容易转为地下径流; 陈洪松等^[3]研究得出, 喀斯特地区无论平水年还是丰水年, 坡面次降雨径流系数0.01%~4.57%, 降雨产流很少, 几乎全部入

渗; 魏兴萍等^[16]也得出岩溶区水土流失比非岩溶区小得多, 地表径流系数平均值为2.31%~14.72%。

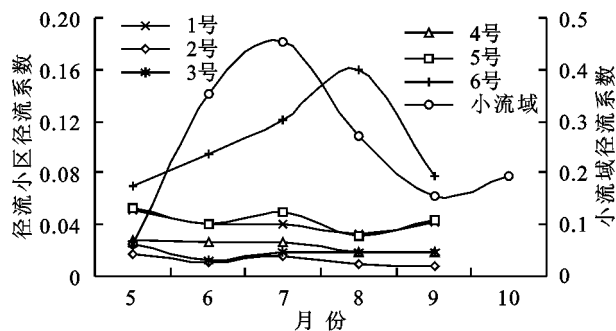


图4 小流域于径流小区径流系数变化

小流域和径流小区产沙量变化同样以7月最大, 降雨越多的月份产沙量越大(图5)。小流域5—10月单位面积产沙量为13.43 t/km², 39.76 t/km², 65.37 t/km², 17.64 t/km², 5.10 t/km², 2.79 t/km², 产沙量最大的6号小区5—9月产沙量只有6.48 t/km², 3.54 t/km², 10.21 t/km², 3.23 t/km², 1.00 t/km², 只占小流域的48.23%(异常), 8.91%, 15.61%, 18.33%, 19.70%, 小流域2012年土壤流失量为144.10 t/km², 1—6号径流小区2012年土壤流失量为11.62 t/km², 1.94 t/km², 3.92 t/km², 6.19 t/km², 10.29 t/km², 24.47 t/km², 流域的泥沙侵蚀量远高于各径流小区, 分别是1—6号径流小区的12倍、74倍、37倍、23倍、14倍、6倍。喀斯特地区有关研究中, 陈洪松等^[3]得出不同利用方式地表侵蚀产沙模数有较大差异, 侵蚀模数<30 t/(km²·a), 李生等^[7]得出不同植被类型侵蚀模数差异极显著, 平均达到45.88 t/(km²·a); 彭韬等^[5]研究中认为喀斯特坡地径流场年土壤流失量较小, 但是变化范围大, 为0.05~62.25 t/km²。

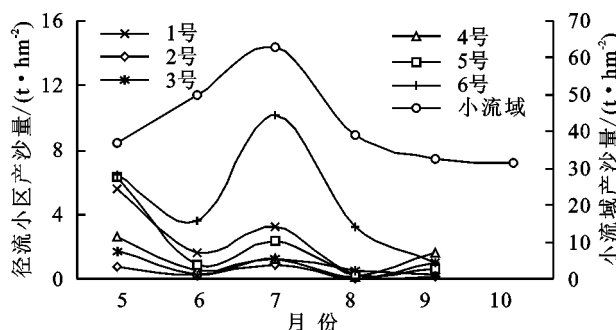


图5 小流域与径流小区产沙量变化

4 讨论与结论

4.1 讨论

喀斯特地区林地的产流产沙量比灌草、坡耕地等非林地低, 本研究的径流小区为荒草地、坡耕地(虽施加生物措施, 但措施期短, 苗木小, 对产流产沙影响

小),在流域内产流产沙量相对于林地较高,而由于研究尺度不同,却出现了流域单位面积产流产沙量远高于坡面径流小区,可能有以下原因:(1)坡面产流时,最先形成面流,产生面蚀,侵蚀量小,然后面流汇集成股流形成侵蚀沟谷,冲刷大量泥沙,侵蚀量大大增加,这是径流小区没法监测到的;(2)小流域内高差较大,溶沟、溶槽发育,流域外有溶洞,地表和地下流失相互叠加,泥沙容易随径流从地下流失,而后在控制站点(低点)流出;(3)流域地表虽然是闭合流域,但有可能地下并不闭合,外流域的径流泥沙可从地下流入流域,并在流域到控制站点流出。本研究也存在一定问题,缺少林、灌植被类型的径流小区的监测。今后可加强喀斯特地区不同尺度产流产沙的研究,进一步揭示不同尺度下产流产沙机理。

4.2 结论

(1)引起产流产沙的次降雨量,平均雨强, I_{60} , I_{30} 和降雨历时 73% 以上集中在 10~40 mm, 2~10 mm/h, 5~30 mm/h, 5~20 mm/h, 1~10 h 之间。30 次产流产沙中,次降雨量最小为 9.1 mm,但雨强 I 最大,为 8.40 mm/h;次降雨量为 10.5 mm,但雨强 I 最小,为 0.95 mm/h;两次降雨均使坡面产流产沙。产流产沙与次降雨量相关度最高,其次是 I_{60} , I_{30} , 降雨历时。

(2)不同措施的径流小区产流产沙存在着一定的显著性差异。产流量大小为:2号<3号<4号<1号<5号<6号,产沙量大小为:2号<3号<4号<5号<1号<6号,径流系数大小为:2号<3号<4号<5号<1号<6号。1号、6号小区产流产沙波动变化小,2—5号小区产流产沙波动变化大。没任何措施的6号荒草地径流系数及产流产沙量最高,经果林+玉米的坡耕地1,4,5号次之,水保林、岩石裸露率最高的荒草地2号、3号最低。

(3)小流域2012年径流深达到257.75 mm,分别是1—6号径流小区的11倍、39倍、28倍、18倍、10倍、5倍;土壤流失量达到144.10 t/km²,分别是1—6号径流小区的12倍、74倍、37倍、23倍、14倍、6倍。不同区域尺度下的产流产沙不同步,小流域与径流小区单位面积产流产沙量的月变化趋势基本一致,但数值差异极大,以往的研究多以径流小区监测数据来分析喀斯特地区产流产沙特征。但喀斯特地

区小尺度区域差异性大,得到的结论无法推广到大尺度区域,所以径流小区的研究结果不能完全反映喀斯特地区的产流产沙特征。

参考文献:

- [1] 李晋,熊康宁.我国喀斯特地区水土流失研究进展[J].土壤通报,2012,43(4):1001-1007.
- [2] 熊康宁,李晋,龙明忠.典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J].地理学报,2012,67(7):878-888.
- [3] 陈洪松,杨静,傅伟,等.桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式坡面产流产沙特征[J].农业工程学报,2012,28(16):121-126.
- [4] 王魁.典型岩溶小流域水土流失监测体系研究[D].南宁:广西大学,2013.
- [5] 彭韬,杨涛,王世杰,等.喀斯特坡地土壤流失监测结果简报[J].地球与环境,2009,37(2):126-129.
- [6] 黄承标,谭卫宁,覃文更,等.木论喀斯特森林水土流失规律研究[J].水土保持研究,2012,19(4):34-37.
- [7] 李生,任华东,姚小华,等.典型石漠化地区不同植被类型地表水土流失特征研究[J].水土保持学报,2009,23(2):1-6.
- [8] 纪启芳,张兴奇,张科利,等.贵州省喀斯特地区坡面产流产沙特征[J].水土保持研究,2012,19(4):1-5.
- [9] 李瑞,李勇,刘云芳.贵州喀斯特地区降雨与坡面土壤侵蚀关系研究[J].水土保持研究,2012,19(3):7-11.
- [10] 张文源,王百田,杨光熹,等.喀斯特黄壤区侵蚀性降雨及产沙特征分析[J].生态环境学报,2014,23(11):1776-1782.
- [11] Zhang Q, Zhao L, Wang J, et al. Spatiotemporal variability and simulation of tillaged loess microtopography in water erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014,69(4):343-351.
- [12] Zhang Z, Cui B, Fang F, et al. Multifractal analysis to characterize urban surface dust volume-size distribution[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012,13:2394-2401.
- [13] 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.
- [14] Kheir R B, Abdallah C, Khawlie M. Assessing soil erosion in Mediterranean karst landscapes of Lebanon using remote sensing and GIS[J]. Engineering Geology, 2008,99(3):239-254.
- [15] 彭晚霞,王克林,宋同清,等.喀斯特脆弱生态系统复合退化控制与重建模式[J].生态学报,2008,28(2):811-820.
- [16] 魏兴萍,谢世友,张志伟,等.重庆南平镇岩溶槽谷区不同土地利用类型地表水土流失[J].农业工程学报,2011,27(6):42-46.