

贵州省喀斯特地区坡面产流产沙特征

纪启芳¹, 张兴奇¹, 张科利², 杨 勇³, 杨光熹³, 顾再柯³

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院, 南京 210093;

2. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 北京 100875; 3. 贵州省水土保持监测站, 贵阳 550002)

摘 要:土壤侵蚀和石漠化严重影响了贵州喀斯特地区的可持续发展。为了有效防治该地区的土壤侵蚀,利用径流小区观测法,通过布设经济林地(梨树)、水保林地(香樟、柏树)、坡耕地(农作物)和裸地(对照)5种径流小区,对该地区不同地类坡面产流产沙特征进行研究。结果表明:坡度为 13° 的坡耕地和经济林地减流减沙效果显著,产流量分别减少了47.5%和25.8%,产沙量分别减少了78.5%和58.9%,香樟、柏树减流效果不明显,但产沙量分别减少了44.7%和79.3%;坡度为 18° 时,经济林地(梨树)、水保林地(香樟)、水保林地(柏树)、坡耕地(农作物)4种地类的产流量减少45.8%,4.9%,3.8%,16.6%,产沙量分别减少了91.3%,81.1%,77.4%,61.6%。 25° 的坡耕地产流量是对照的8.9倍,土壤侵蚀量大幅度增加。产流产沙量与降雨量(P)、最大30 min雨强(I_{30})和坡度(s)均呈幂函数关系,产沙量与产流量呈线性关系。

关键词:喀斯特; 土地类型; 产流产沙; 贵州省

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)04-0001-05

Runoff and Sediment Characteristics of Slope Land in Karst Areas of Guizhou Province

Ji Qi-fang¹, ZHANG Xing-qi¹, ZHANG Ke-li², YANG Yong³, YANG Guang-xi³, GU Zai-ke³

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing

210093, China; 2. School of Geography and Remote Sensing Science, Beijing Normal University,

Beijing 100875, China; 3. Guizhou Monitoring Station of Soil and Water Conservation, Guiyang 550002, China)

Abstract: Soil erosion and rocky desertification strongly affect local sustainable development in karst area. In order to prevent and control efficiently soil erosion in karst area of Guizhou Province, runoff and sediment characteristics of different types of slope land were studied by means of runoff plots observation. Five types of runoff plots were set including commercial forest (pear trees), water conservation forest (*Cinnamomum camphora*), water conservation forest (cypress), slope farmland (crops) and bare slope land. The results showed that when the slope gradient was 13° , the slope land covered with crops and pear trees were good in protecting soil erosion, which could reduce runoff by 47.5% and 25.8%, respectively, and sediment yield by 78.5% and 58.9%, respectively. The slope land covered with *Cinnamomum camphora* and cypress were not significant in runoff reduction, while they could reduce sediment yield by 44.7% and 79.3%, respectively. When the slope gradient was 18° , the slope land covered with pear trees, *Cinnamomum camphora*, cypress and crops could reduce runoff by 45.8%, 4.9%, 3.8% and 16.6%, respectively, and sediment yield by 91.3%, 81.1%, 77.4% and 61.6%, respectively. When the slope gradients was 25° , sediment yield of the slope farmland was almost eight times more than that of the bare slope farmland. Runoff and sediment yield had power function relationship with rainfall (P), maximum rainfall intensity of 30 min (I_{30}) and slope gradients (s). The sediment yield of slope land met linear function with the runoff of slope land.

Key words: karst; land types; runoff and sediment; Guizhou Province

贵州省是我国西南亚热带地区喀斯特强烈发育的省份,可溶性碳酸盐岩出露面积占全省国土面积的

73%,95%的县、市都有喀斯特分布^[1]。由碳酸盐岩风化形成的土壤,成土速度慢,土层浅薄,易受旱,植

收稿日期:2011-12-18

修回日期:2012-01-18

资助项目:贵州省水土保持监测站科研项目“西南喀斯特地区土壤侵蚀机理及水土流失预测研究”(2006200)

作者简介:纪启芳(1986—),女,山东枣庄人,在读硕士,研究方向:土壤侵蚀和水土保持。E-mail:jiquifang5052006@126.com

通信作者:张兴奇(1964—),男,贵州仁怀人,博士,副教授,主要从事水资源与水土保持研究工作。E-mail:zxqrh@nju.edu.cn

物生长缓慢^[2],加之贵州山区地表崎岖,坡耕地面积占耕地总面积的 61.01%^[3],坡耕地水土流失严重。另外,由于贵州喀斯特地区人地矛盾突出,陡坡开荒现象严重,加剧了水土流失。水土流失极易导致地表基岩裸露,形成石漠化。贵州省是石漠化最为严重的省份,目前石漠化面积已达 6 万 km²,占全省总面积的 1/3 以上。

贵州面临水土流失和石漠化两大环境问题,石漠化是水土流失的结果,要治理石漠化,首先必须防治水土流失。几十年来许多学者为贵州省的水土流失防治作了大量研究工作,主要集中在截流沟、横坡种植和植物篱等不同生物措施的减流减沙效益研究^[4-6],这些研究在指导水土保持工作中起了重要作用,但是,对不同水土保持措施产流产沙规律研究不多。掌握坡面产流产沙规律是预测预报区域产流产沙的基础,也是合理布设水土流失防治措施的前提。本文利用径流小区观测法,对贵州省喀斯特地区坡面产流产沙的

特点和规律进行分析和探讨,旨在为该地区水土保持措施选择和坡面产流产沙预测提供理论依据。

1 研究区概况与小区布设

汧洋水小流域地处贵州省遵义市遵义县西部乐山镇与鸭溪镇交界处,属乌江水系偏岩河支流的上游,流域内多地表水,地下水多以岩溶洞水和裂隙水的形式存在。为中低山丘陵地貌,土壤以黄壤土为主,呈酸性,有机质含量少,土壤肥力低下,由于坡耕地面积的不断扩大,陡坡耕作增加,土壤流失严重,有 70% 的坡耕地土层厚度小于 30 cm。研究区属中亚热带湿润季风气候,多年平均降雨量为 1 024 mm,降雨集中在 4—10 月,多年平均气温为 14.6℃。

根据喀斯特地区土壤侵蚀的特点,结合当地实际情况选择经济林地(梨树)、水土保持地(香樟)、水土保持地(柏树)、坡耕地(农作物)和裸地(对照)5 种地类共设置 18 个径流观测小区,小区的基本情况见表 1。

表 1 汧洋水小流域小区布设基本情况

地类	坡度 13°			坡度 18°			坡度 25°		
	小区 编号	株距×行 距/(m×m)	投影坡长× 宽/(m×m)	小区 编号	株距×行 距/(m×m)	投影坡长× 宽/(m×m)	小区 编号	株距×行 距/(m×m)	投影坡长× 宽/(m×m)
经济林地(梨树)	1~2	3×4	20×10	12~13	3×4	20×10	—		
水土保持地(香樟)	3~4	2×2	20×5	10~11	2×2	20×5	15~16	2×2	20×5
水土保持地(柏树)	5	1.5×1.5	20×5	14	1.5×1.5	20×5	—		
坡耕地(农作物)	6		20×5	9		20×5	18		20×5
裸地(对照)	7		20×10	8		20×5	17		20×5

注:“—”表示相应坡度未设置该类小区。

试验数据为 18 个径流观测小区 2009—2010 年 14 次侵蚀性降雨野外观测记录。每次降雨产流后,首先观测分流池、集流池中的水深,然后计算坡面径流深(mm);将分流池和集流池内径流液搅拌均匀,采集体积为 1 000 ml 的样品,静置、烘干称重,计算各坡面产沙量(t/km²);降雨过程由自记雨量计记录。

2 坡面产流产沙规律研究

2.1 不同地类坡面产流产沙量比较

地表产流产沙主要与降雨和下垫面两个因素有关。下垫面特征是由地形、土壤、地表覆盖等决定的^[7]。在气候、土壤和降雨条件相同的情况下,地表产流主要受地形和地表覆盖的影响。地形和地表覆盖的不同导致拦截雨水和入渗等方面差异很大,这种差异必然引起产流和产沙的变化。坡面径流小区 2009 年 5 月至 2010 年 10 月共 14 场产流降雨的特征值和产沙量统计结果见表 2。

2.1.1 不同土地利用方式对产流产沙的影响 在特定坡度下,不同地类的产流产沙量差别较大。当坡度

为 13°时,坡耕地(农作物)和经济林地(梨树)调节径流、减少土壤流失的作用较为显著,与裸地相比,二者的产流量分别减少了 47.5%和 25.8%,产沙量分别减少了 78.5%和 58.9%;水土保持地香樟和柏树的减流效果不明显,但产沙量分别比裸地减少了 44.7%和 79.3%。当坡度为 18°时,经济林地(梨树)、水土保持地(香樟)、水土保持地(柏树)、坡耕地(农作物)4 种地类的产流量分别比裸地减少了 45.8%,4.9%,3.8%,16.6%,产沙量分别减少了 91.3%,81.0%,77.4%,61.6%。当坡度为 25°时,水土保持地(香樟)的产流产沙量分别比裸地减少了 15.8%和 26.9%;坡耕地(农作物)的产流量增加了 17.1%,而产沙量增加了 788.9%(表 2)。

植被对地表径流的影响是由冠层、枯枝落叶层和土壤层的综合效能决定的^[8]。当坡度较小(13°和 18°)时,梨树的减流效果较好,而香樟和柏树的减流效果并不明显,这是林草综合作用的结果。一方面梨树为落叶树种,林冠及枯枝落叶层对雨水有明显的截留及缓冲作用,它们不仅能吸持一定的水分,而且能增加土壤水分的下渗^[8]。另一方面梨树的株行距较

大,加上贵州的水热条件十分利于草类的生长,所以林下杂草生长旺盛,杂草的根系分布在 20 cm 以上的土壤表层,具有改良表层土壤,增加土壤入渗和抗蚀性的功能。香樟和柏树为常绿树种,枯枝落叶较少,并且水保林的栽种密度大,在一定程度上抑制了林下杂草的生长,所以减流效果不明显。

表 2 不同地类坡面径流小区降雨产流产沙特征量

项目	降雨日期 (年-月-日)	雨量/ mm (mm·h ⁻¹)	I ₃₀ / (mm·h ⁻¹)	坡度 13°					坡度 18°					坡度 25°		
				梨树	香樟	柏树	裸地	农作物	梨树	香樟	柏树	裸地	农作物	香樟	裸地	农作物
径流深/ mm	09-05-01	17.1	3.4	0.38	0.76	0.90	0.83	0.34	0.40	0.74	0.68	0.74	0.81	0.77	0.52	0.64
	09-05-05	24.0	8.0	0.49	1.17	1.10	0.96	0.49	0.50	1.07	0.94	0.81	0.94	0.77	0.90	0.77
	09-05-13	35.7	28.0	1.48	1.38	1.66	2.21	1.32	0.81	1.68	1.62	1.48	1.62	1.64	1.67	1.54
	09-06-21	29.8	57.8	1.66	2.07	1.83	2.07	1.27	1.05	1.91	2.02	1.55	1.78	1.92	1.94	1.81
	09-08-05	28.0	10.6	1.08	2.13	2.55	3.04	1.27	1.08	2.24	2.63	2.76	2.37	2.21	2.18	2.76
	09-08-09	19.2	16.0	0.87	1.38	1.35	1.79	0.90	0.77	1.35	1.48	1.48	1.35	1.35	1.24	1.41
	10-05-06	32.1	—	0.94	1.45	1.52	1.52	0.83	0.77	1.48	1.21	1.21	1.21	1.22	1.54	1.41
	10-05-27	30.9	17.2	0.27	0.69	0.96	1.38	0.69	0.57	1.14	0.94	1.07	1.21	0.52	1.29	1.29
	10-06-19	46.1	43.6	4.48	5.17	2.76	3.45	1.72	2.19	3.70	—	2.97	2.29	1.98	2.44	2.95
	10-06-28	25.6	17.2	0.96	1.24	1.38	1.38	0.76	0.77	1.55	1.35	1.07	1.21	1.41	1.29	1.29
	10-07-10	121.2	53.6	5.34	7.94	4.75	5.34	2.71	3.83	5.32	7.68	6.41	4.01	4.51	5.90	6.65
	10-07-20	28.2	14.0	0.95	1.55	1.43	—	0.78	0.74	1.35	1.68	1.68	1.17	1.20	1.38	2.21
	10-09-09	43.0	70.0	1.71	2.61	2.94	3.55	1.52	1.14	2.04	3.04	2.89	1.90	2.19	3.24	5.16
	10-10-01	32.0	20.0	1.35	2.24	1.95	2.07	0.95	0.90	1.65	2.32	2.52	2.04	1.52	2.06	2.38
	合计	512.9	—	21.96	31.79	27.09	29.59	15.53	15.53	27.24	27.58	28.66	23.91	23.23	27.58	32.28
产沙量/ (t·km ⁻²)	09-05-01	17.1	3.4	0.23	0.43	0.14	0.05	0.09	0.12	0.40	0.59	0.24	0.52	0.81	0.44	0.21
	09-05-05	24.0	8.0	0.11	0.20	0.13	0.11	0.06	0.10	0.12	0.10	0.17	0.14	0.15	0.43	0.14
	09-05-13	35.7	28.0	0.28	0.59	0.36	0.40	1.16	0.19	0.53	0.19	0.27	1.43	0.40	0.81	0.28
	09-06-21	29.8	57.8	0.10	1.19	0.40	1.66	0.81	0.31	0.39	0.42	3.24	2.70	0.74	2.24	1.50
	09-08-05	28.0	10.6	0.64	0.87	0.33	1.55	1.42	0.71	2.63	2.29	4.94	3.40	1.01	1.72	2.16
	09-08-09	19.2	16.0	0.66	0.59	0.15	1.08	0.03	0.03	0.32	0.11	1.62	0.32	0.14	0.16	0.12
	10-05-06	32.1	—	0.27	0.47	0.38	0.53	0.38	0.38	0.43	0.63	1.51	0.84	0.23	1.29	0.24
	10-05-27	30.9	17.2	1.16	2.07	0.61	0.17	1.08	0.90	1.49	0.49	1.46	1.54	1.07	2.76	1.54
	10-06-19	46.1	43.6	0.89	1.82	0.69	1.40	0.57	0.37	0.54	—	4.97	8.80	0.60	0.26	0.60
	10-06-28	25.6	17.2	1.41	2.03	0.84	1.59	0.51	0.63	1.66	1.28	1.65	0.90	2.08	0.48	1.35
	10-07-10	121.2	53.6	5.76	4.81	0.40	24.44	0.15	0.79	2.71	4.58	31.17	1.95	1.23	1.26	32.27
	10-07-20	28.2	14.0	1.64	2.93	1.62	—	0.83	1.32	1.60	1.58	7.24	2.60	0.40	0.56	23.92
	10-09-09	43.0	70.0	0.37	0.93	0.53	2.00	0.24	0.21	0.60	1.28	13.52	0.94	0.24	0.78	42.10
	10-10-01	32.0	20.0	1.16	0.84	0.85	0.78	0.36	0.48	0.80	3.43	3.11	2.79	0.69	0.21	12.66
	合计	512.9	—	14.68	19.77	7.42	35.74	7.69	6.54	14.24	17.00	75.11	28.88	9.79	13.40	119.07

降雨及地表径流是水力侵蚀发生的动力^[9],在雨滴产生击溅侵蚀的同时,地表径流使表层土壤不断受到剥蚀和搬运。植被在径流形成过程中起着抑制作用,林冠及地被物杂草对雨水的截留效应增加了降雨的入渗,减少了雨滴和薄层水流造成的溅蚀和面蚀;植物根系在土中交织,盘根错节,起到固土作用^[10],有效地防止了水土流失。所以,经济林地(梨树)、水保林地(香樟)和水保林地(柏树)相对于裸地均具有良好的保土作用。

2.1.2 坡度对产流产沙的影响 5 种地类平均径流深和产沙量随坡度的变化如图 1 所示,径流深和产沙量均随坡度的增加而增大。因为随着坡度的增加,径流重力在斜坡方向上的分力增大从而加快了径流的速度,使击溅雨滴沿坡面向下落得更远,有利于增加径

流;坡面土壤的不稳定性与坡度的大小成正比,坡度愈大,坡面土体受到斜坡重力切向分力愈大,坡面上土体不稳定性愈大^[11],在外力作用下发生下移的可能性变大,这一点在人为干扰(土壤翻耕和除草)较大的坡耕地上表现的尤为突出。所以当坡度增加到 25°时,坡耕地(农作物)土壤侵蚀量大幅度增加,超过裸地。

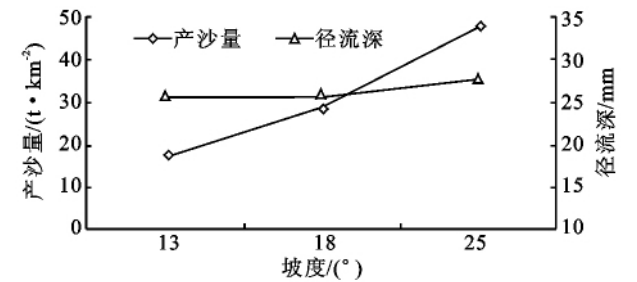


图 1 5 种地类平均径流深和产沙量随坡度变化

坡度对产流产沙的影响是一个复杂的过程,一方面产流产沙量随着坡度的增大而增加;另一方面在投影面积一定的情况下,随着坡度的增大,坡面面积增大,单位面积上承受的雨量变小,承雨强度降低,单位面积径流量及冲刷量也相应变小^[11]。

2.2 坡面产流与坡度和降雨特征的关系

国内外许多学者在评价坡度对土壤侵蚀的影响时,多采用幂函数关系来表达。由图 1 可知坡度与径流深、侵蚀量的关系也大体呈幂函数关系,可以用幂函数进行曲线回归。径流小区的土壤均为黄壤,直接对各地类分别建立坡面径流深与坡度的关系。

降雨特征是指每次降雨的雨型、雨量和雨强特征^[8]。对坡面产流影响较大的两个因素分别是降雨量和时段雨强^[12],本文选取降雨量和最大 30 min 雨强,因为平均雨强概括了降雨过程中不同时间段的降雨量,不能揭示降雨影响径流的物理机制,它既夸大了雨强很小时段的降雨径流作用,又缩小了高强度降雨时段的产流能力^[13]。

在 SPSS 16.0 中对不同坡度坡面径流深与降雨特征的关系进行曲线拟合(表 3),发现坡面径流深与降雨特征之间存在较好的幂函数关系。当坡度为 13°

时,5 种地类坡面径流深与降雨量的 R^2 值介于 0.60~0.70,与最大 30 min 雨强的 R^2 值介于 0.48~0.74;当坡度为 18°时, R^2 值对应的变化范围是 0.69~0.79 和 0.46~0.56;当坡度为 25°时, R^2 值对应的变化范围是 0.53~0.80 和 0.45~0.70,总体效果较好。由于坡面径流深受降雨量和土壤渗透能力的影响,而渗透能力与时段雨强关系密切。因此当同时考虑降雨量和最大 30 min 雨强两个因素时,其与径流深之间的联系就更加密切。

根据两年 14 次降雨侵蚀观测资料,对坡面径流深与坡度和降雨特征的关系采用多元幂函数回归分析,其表达式为:

$$H=AP^aI_{30}^bs^c$$

式中: H ——某一特定坡面一次降雨径流深(mm); P ——降雨量(mm); I_{30} ——一次降雨的最大 30 min 雨强(mm/h); s ——为坡度(°); A,a,b,c ——统计参数。

回归分析结果见表 3,5 种地类的径流深与降雨量、最大 30 min 雨强和坡度之间的幂函数关系密切,复相关系数均在 0.8 以上,且经 F 检验,所建立模型均达到极显著水平。

表 3 径流深与坡度和降雨特征值的回归关系模型

地类	模型概况			
	模型方程	复相关系数 R	F 值	Sig. F 值
经济林地(梨树)	$H=0.1181P^{0.873}I_{30}^{0.281}s^{-0.626}$	0.846	18.434**	0.000
水土保持(香樟)	$H=0.1801P^{0.762}I_{30}^{0.172}s^{-0.326}$	0.828	25.427**	0.000
水土保持(柏树)	$H=0.0540P^{0.767}I_{30}^{0.164}s^{0.127}$	0.862	20.252**	0.000
坡耕地(农作物)	$H=0.0042P^{0.628}I_{30}^{0.248}s^{1.004}$	0.886	42.804**	0.000
裸地(对照)	$H=0.1527P^{0.742}I_{30}^{0.217}s^{-0.263}$	0.882	39.756**	0.000

注: * $p<0.05$, ** $p<0.01$,下同。

2.3 坡面产沙与坡度和降雨特征的关系

降雨在导致坡面产流的同时,与地面形成的薄层水流一起,使表层土壤不断受到剥蚀和搬运,表 4 是产沙量(S)与降雨量、最大 30 min 雨强和坡度之间

的回归关系模型。回归模型的复相关系数介于 0.508~0.602,差异不大,所建立模型除水土保持(柏树)产沙量与降雨量、最大 30 min 雨强和坡度的关系模型未达到显著水平外,其余均达到显著和极显著水平。

表 4 产沙量与坡度和降雨特征值的回归关系模型

地类	模型方程	复相关系数 R	F 值	Sig. F 值
经济林地(梨树)	$S=1.1275P^{1.65}I_{30}^{-0.397}s^{-2.009}$	0.602	4.165*	0.018
水土保持(香樟)	$S=0.6460P^{1.022}I_{30}^{-0.173}s^{-0.988}$	0.543	4.870**	0.006
水土保持(柏树)	$S=0.0002P^{0.961}I_{30}^{-0.012}s^{1.797}$	0.508	2.436	0.093
坡耕地(农作物)	$S=1.052E-05P^{0.835}I_{30}^{0.407}s^{2.513}$	0.580	5.912**	0.002
裸地(对照)	$S=0.0143P^{1.103}I_{30}^{0.481}s^{-0.337}$	0.597	6.283**	0.002

2.4 坡面产流与产沙的关系

径流是泥沙流失的主要载体。坡面径流可以冲刷土壤、挟带泥沙造成土壤侵蚀,尤其是在降雨强度较大的情况下,产流增大,挟带的泥沙量也逐渐增大^[14],因此产流量与产沙量之间关系密切。根据表 2 的统计数据,分别将 5 种地类在不同坡度的径流深和产沙量进行平均并对其进行拟合,5 种地类产流量与

产沙量之间的线性关系曲线见图 2a—f。

拟合 R^2 值介于 0.38~0.82,拟合效果较好。不同地类的坡面产沙量总体上均随径流深的增加而增加,由线性模型的斜率 k 值大小可知,坡耕地(农作物)的增加速度最快,裸地次之,经济林地(梨树)、水土保持(柏树)和水土保持(香樟)的增加速度低于 5 种地类的平均值。说明林地的水土保持功能明显好于非林地。

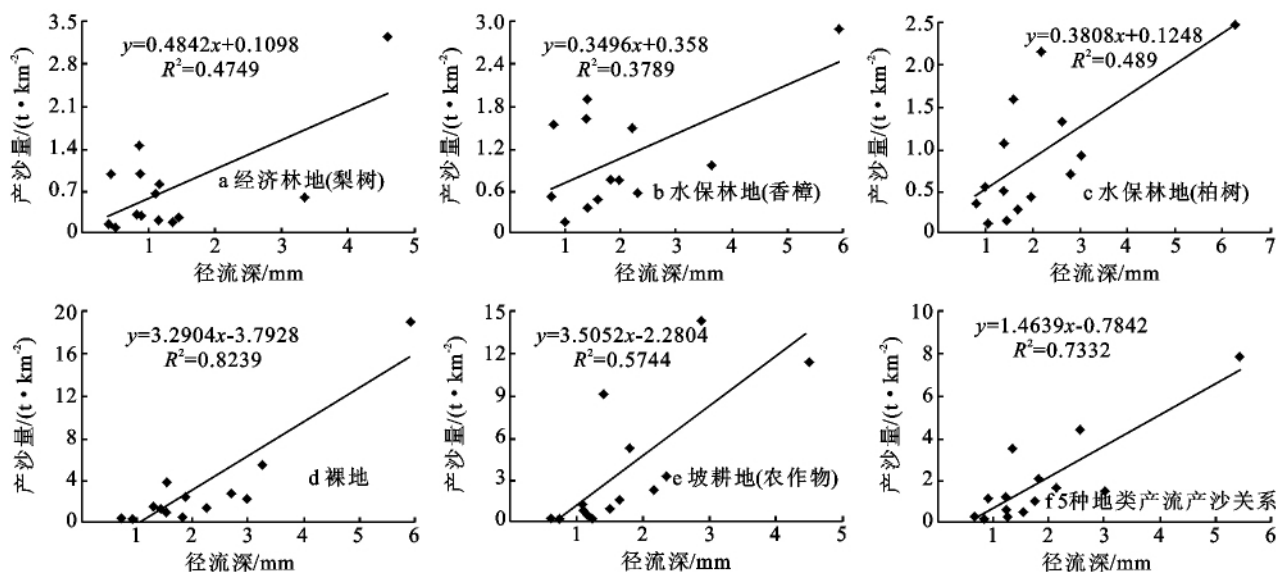


图2 不同地类坡面产流产沙关系

3 结论

(1) 以不同坡度的裸地为对照小区。当坡度为 13° 时,坡耕地(农作物)和经济林地(梨树)调节径流、减少土壤流失的作用较为明显,二者的产流量分别减少了47.5%和25.8%,产沙量分别减少了78.5%和58.9%;水土保持林香樟和柏树的减流效果不明显,但是产沙量分别减少了44.7%和79.3%。当坡度为 18° 时,经济林地(梨树)、水土保持林(香樟)、水土保持林(柏树)、坡耕地(农作物)4种地类的产流量分别比裸地减少了45.8%,4.9%,3.8%,16.6%,产沙量分别减少91.3%,81.1%,77.4%,61.6%。当坡度为 25° 时,水土保持林(香樟)的产流产沙量分别比裸地减少了15.8%和26.9%;坡耕地(农作物)的产沙量是对照的8.9倍,土壤侵蚀量大幅度增加,是侵蚀产沙的主要来源地。为了有效防治贵州喀斯特地区的坡面水土流失,对缓坡耕地,应根据农业和经济发展的需求,调整农业产业结构,因地制宜地发展经济林等,逐步减小农作物种植面积;对陡坡耕地,应实施退耕还林或退耕还草措施。

(2) 不同地类坡面径流深 H (mm)和产沙量 S (t/km^2)与降雨量 P (mm)、最大30 min雨强 I_{30} (mm/h)和坡度 s 之间存在良好的幂函数关系。

(3) 不同地类的坡面产沙量均随径流深的增加呈线性函数关系,其中坡耕地(农作物)和裸地泥沙随径流的增加幅度明显高于经济林地(梨树)和水保林地(香樟、柏树)。

参考文献:

- [1] 徐燕,龙健. 贵州喀斯特山区土壤物理性质对土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报,2005,19(1):157-159.
- [2] 韦启播. 我国南方喀斯特区土壤侵蚀特点及防治途径[J]. 水土保持研究,1996,3(4):72-76.
- [3] 林昌虎,解德蕴,涂成龙,等. 贵州山区坡耕地综合利用与整治[J]. 水土保持研究,2004,11(3):211-213.
- [4] 朱青,王兆骞,尹迪信. 贵州坡耕地水土保持措施效益研究[J]. 自然资源学报,2008,23(2):219-229.
- [5] 彭熙,李安定,李苇洁,等. 不同植物篱模式下土壤物理变化及其减流减沙效应研究[J]. 土壤,2009,42(1):107-111.
- [6] 周素萍,张兴奇,张科利,等. 贵州喀斯特地区不同生物措施的水土保持效果[J]. 贵州农业科学,2011,39(4):117-120.
- [7] 彭文英,张科利. 不同土地利用产流产沙与降雨特征的关系[J]. 水土保持通报,2001,21(4):25-29.
- [8] 陈奇伯,寸玉康,刘芝芹,等. 滇西高原不同地类坡面产流产沙规律研究[J]. 水土保持研究,2005,12(2):71-73.
- [9] 徐宪立,张科利,庞玲,等. 青藏公路路边坡产流产沙规律及影响因素分析[J]. 地理科学,2006,26(2):211-216.
- [10] 陈强,常恩福,毕波,等. 滇东南岩溶地区三种退耕还林模式的水土保持效应研究[J]. 水土保持学报,2006,20(5):1-4.
- [11] 张会茹,郑粉莉,耿晓东. 地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响研究[J]. 水土保持研究,2009,16(4):52-59.
- [12] 田波,陈奇伯,王克勤. 金沙江干热河谷不同处理坡面的产流产沙规律研究[J]. 西南林学院学报,2006,26(6):71-73.
- [13] 贾志伟,江忠善,刘志. 降雨特征与水土流失关系的研究[J]. 中国科学院水利部西北水土保持研究所专刊,1990(2):9-15.
- [14] 刘艳,刘学全,崔鸿侠,等. 长江中游低丘黄壤坡面地表产流产沙规律初探[J]. 水土保持研究,2010,17(1):149-153.

[1] 徐燕,龙健. 贵州喀斯特山区土壤物理性质对土壤侵蚀