

贵州省黔南区不同侵蚀性雨型条件下生物措施对坡面产流产沙的响应

黄凯^{1,2}, 李瑞^{1,2}, 李勇³, 宋涛³, 覃莉³, 刘忠仙³

(1.贵州师范大学喀斯特研究院, 贵阳 550001; 2.国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001; 3.贵州省水土保持监测站, 贵阳 550002)

摘要:为探讨不同降雨条件下的生物措施对坡面产流产沙特征的影响,分析了贵州省黔南自治州云雾水土保持监测站2014—2017年4年6个小区104次侵蚀性降雨下的实测产流产沙数据。结果表明:(1)侵蚀性降雨按历时、雨强和雨量可分为3类,包括A雨型(中历时、中雨强、中雨量),B雨型(长历时、小雨强、大雨量),C雨型(短历时、大雨强、小雨量)。C雨型为引起区域水土流失的主要雨型。(2)较坡耕地而言,A雨型和C雨型条件下减流量均呈水平阶整地+经果林>水土保持林>人工草地>自然恢复草地>经果林的趋势;减沙量均为水平阶整地+经果林>人工草地>水土保持林>自然恢复草地>经果林。B雨型减流量为水平阶整地+经果林>自然恢复草地>水土保持林>人工草地>经果林;减沙量为水平阶整地+经果林>自然恢复草地>人工草地>水土保持林>经果林。除自然恢复草地外B型雨条件下各措施对水土流失的调控作用不如A雨型和C雨型。不同措施对坡面产沙量的调控作用优于产流量,自然恢复草地在B型雨下具有良好的水土保持效果。(3)坡耕地水土流失最为严重,多年平均土壤侵蚀模数为365.33 t/(km²·a),水平阶整地+经果林措施水土保持效果最优,其土壤侵蚀模数为3 t/(km²·a),较坡耕地可降低土壤侵蚀率达99.2%。同时,水平阶整地+经果林措施在A、B、C雨型下较坡耕地可分别减少产流62.7%,53.0%和63.2%。(4)坡面产流同降雨一样,集中在5—8月;C雨型与产沙量集中分布在5—6月。根据研究结果,研究区每年的5—8月为水土流失高发期,尤其是5、6月,这个时段应为水土流失治理的重点时段,在治理同时要针对不同雨型条件采取不同生物治理措施,并且要对C雨型进行重点防范。

关键词:喀斯特;坡面尺度;产流产沙;降雨;生物措施

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)06-0014-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.06.003

Response of Runoff and Sediment Yield to Biological Measures on Slopes Under Different Erosive Rain Patterns in Southern Guizhou

HUANG Kai^{1,2}, LI Rui^{1,2}, LI Yong³, SONG Tao³, QIN Li³, LIU Zhongxian³

(1.School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001;

2.State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang 550001;

3.Guizhou Provincial Monitoring Station of Soil and Water Conservation, Guiyang 550002)

Abstract: In order to explore the soil and water conservation benefit of different ecological restoration measures on sloping land under different rainfall conditions, this study analyzed the runoff and sediment under six ecological restoration measures (Ecological restoration grassland, ERG; Level terrace and preparation+fruit forest, LF; Fruit forest, FF; Sloping land, SL; Cultivated pastures, CP; Soil and water conservation forest, SWF) under the 104 erosive rainfalls. The observation data from 2014 to 2017 of runoff plots located in the Yunwu Water and soil conservation monitoring station, Guizhou province were used. The results showed that: (1) According to rainfall duration, rainfall intensity and rainfall, erosive rainfall could be divided into three types: A-type (medium duration, medium rainfall intensity and medium rainfall); B-type (long duration, light rainfall intensity and large rainfall); C-type (short duration, heavy rainfall intensity and small rainfall), and C-type was the main cause of regional soil erosion. (2) Compared with sloping

收稿日期:2020-05-27

资助项目:贵州省科技支撑计划项目“喀斯特石漠化山区混农林系统水土保持生态功能及关键技术研究”(黔科合支撑[2019]2847号);国家自然科学基金项目“喀斯特区典型石漠化坡耕地覆盖措施水土流失调控效应”(31760243)

第一作者:黄凯(1995—),男,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:1050568166@qq.com

通信作者:李瑞(1979—),男,博士,研究员,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:rlfer@126.com

farmland, the runoff reduction under the A-type and C-type showed the trend of LF>SWF>CP>ERG>FF, and the sediment reduction showed the trend of LF>CP>SWF>ERG>FF. The runoff reduction under the B-type showed the trend of LF>ERG>SWF>CP>FF, and the sediment reduction showed the trend of LF>ERG>CP>SWF>FF. Except ERG, the control effect of different measures on soil and water loss under A-type and C-type was better than that B-type. The control effect of different measures on slope sediment yield was better than that of runoff. ERG had good soil and water conservation effect under B-type. (3) The soil erosion of sloping land was the most serious. Compared with sloping farmland, the runoff reduction rate of LF was 62.7%, 53.0% and 63.2% under A-type, B-type and C-type respectively. The soil erosion modulus of LF was 3 t/(km² · a), which could reduce the soil erosion rate by 99.2% compared with the sloping farmland. (4) Slope runoff and rainfall were concentrated from May to August. Slope sediment and C-type were concentrated in May and June.

Keywords: Karst; slope scale; runoff and sediment; rainfall; biological measures

水土流失不仅影响人类赖以生存的土地资源,还会淤积河道造成严重的洪涝灾害,目前已经成为影响生态安全的重要问题^[1-3]。而水力侵蚀引起的水土流失在所有土壤侵蚀方式中危害最大,目前全球受水力侵蚀困扰的面积达 1 100 万 km²,对人类发展及气候变化有重要影响^[4]。贵州省黔南地区水热资源充沛、地形起伏,十分有利于水土流失的发生和发展,喀斯特地貌在该地区分布广泛,严重的水土流失势必会加剧石漠化现象^[5-6](一种发生在喀斯特地貌下土地退化的极端表现形式)。众所周知,石漠化区土壤极其薄瘠,目前已然成为了制约区域发展的重要因素^[7-8]。贵州黔南地区生态较为脆弱,抗干扰能力较差,容易发生和加剧石漠化现象^[9]。因此对该区域坡面土壤侵蚀规律的研究有助于石漠化综合治理工作的开展。我国黄土高原区^[10-12]和东北黑土区^[13-14]长期以来就是水土流失主要研究区域。云贵高原地区作为世界三大喀斯特地貌连片分布地区之一的东亚片区中心,近十年来对水土流失的研究越来越多,但是针对性生物治理措施以及野外长期定位观测试验还存在较大空缺,而对不同雨型进行的划分研究则更少。目前的研究^[15-16]已经证实生物措施是治理土壤侵蚀的良好方法,但由于该地区研究起步较晚,加之该区地貌类型的特殊性和复杂性,导致目前对于云贵高原地区水土流失的治理多为工程性措施^[17-19]。然而工程性措施需要耗费较大人力物力,使得其治理范围十分有限。因此开展野外长期定位观测试验,研究生物措施的减流减沙效应具有重要的现实意义。

鉴于此,本文基于长期野外定位观测试验,采用贵州省黔南自治州贵定县云雾监测站 2014—2017 年的坡面尺度径流小区监测数据,分析不同雨型条件下生物措施对产流产沙的响应,以及产流产沙随时间的变化特征等。研究可为贵州省黔南地区坡面水土流失的生物防控措施提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

云雾水土保持监测站位于贵州省黔南自治州贵定县南部的云雾镇,站点建设位置为贵定雪芽茶叶水土保持科技示范园马坡示范区内,是典型坡面尺度的观测站,距县城 55 km,距云雾镇约 3 km。属长江流域乌江水系五道河小流域,中心点地理坐标东经 107°03′21.65″,北纬 26°13′0.43″。示范区地貌类型属中低山区,兼有部分河谷冲积槽谷区。示范区内水土流失面积 3 360.53 hm²,占示范区总土地面积的 47.29%。示范区属中亚热带湿润季风气候,多年平均降水量为 1 143 mm,多年平均气温为 15 ℃;主要植被类型为常绿落叶针阔混交林,主要有常绿阔叶林、针叶林、针阔混交林,疏林灌丛地、草地、灌木草丛等。土壤类型为地带性黄壤,土壤质地多为沙壤土或砾质壤土,土壤 PH 多为 4.5~6.5。该地区仍以种植粮食作物为主要经济来源,近年来,茶叶也成为该地区的支柱产业。

1.2 径流小区概况

观测站于 2007 年 11 月建成坡面径流小区 4 个(1,2,3,4 号小区);2008 年年底新建坡面径流小区 2 个(5,6 号小区),2009 年 6 月正式投入运行。本文选取数据保存较为完整的 2014—2017 年 4 年的观测数据。1~6 号小区分别设置了不同生物措施,具体信息见表 1。其中 1 号为自然恢复草地,6 号种植水保林,均无人为干扰;2,3 号经果林小区每年定期清除杂草,修枝剪叶及采茶等人为干扰;4 号为坡耕地,耕作活动等人为干扰较大;5 号小区为人工草地,存在刈割等人为活动干扰。根据研究目的,选取 4 号耕地小区作为本次研究的对照小区。

1.3 研究方法

1.3.1 野外观测及相关指标测算方法 径流小区监测的主要内容为降雨量(*P*)、降雨历时(*T*)、平均降雨强度(*I*)、产沙量、径流量等。

表 1 径流小区基本信息

小区 编号	分流 级别	长/m	宽/m	汇水 面积/m ²	坡度/ (°)	坡向/ (°)	坡位	土壤 类型	土层 厚度/cm	生物 措施	植物 类型	播种 方式	林下植被 类型	植被 盖度/%	工程 措施
1	1	20	5	100	25	120	坡中	黄壤	85	自然恢复草地	茅草、蕨类及部分杂草	—	—	90	—
2	1	20	5	100	25	120	坡中	黄壤	85	经果林	茶树	穴播	草	79	水平阶整地
3	1	20	5	100	25	120	坡中	黄壤	85	经果林	茶树	穴播	草	56	—
4	1	20	5	100	25	120	坡中	黄壤	85	耕地	大豆/玉米	穴播	—	—	—
5	1	20	5	100	25	120	坡中	黄壤	85	人工草地	三叶草/黑麦草	撒播	—	93	—
6	1	20	5	100	25	120	坡中	黄壤	85	水保林	马尾松	穴播	草	67	—

对于降雨的观测采用自记雨量计进行,人工雨量计校核。

次产流量采用水尺直接量测分(集)流池中的水深,通过公式估算次产流量:

$$Q=hs \tag{1}$$

式中: Q 为径流量(m^3); h 为水深(m); s 为分(集)流池的底面积(m^2)。

次降雨产流结束后,充分搅拌分(集)流池中的浑水,采用 1 000 mL 的取样瓶收集浑水样,每个小区分别采集 3 个样品,经沉淀、过滤、烘干和称重,可得分(集)流池泥沙量,加上集沙槽的泥沙量即为次坡面产沙总量。全年小区产沙总量与小区面积之比即为年土壤侵蚀模数,计算公式为:

$$M=G/S \tag{2}$$

式中: M 为小区年土壤侵蚀模数($\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$); G 为小区年产沙总量(t); S 为坡面径流小区面积(km^2)。

1.3.2 降雨类型划分 按 6 个试验径流小区均有产流产沙现象发生作为依据,在 2014—2017 年 4 年实测降雨资料中筛选出 104 次侵蚀性降雨。以 104 次

侵蚀性降雨作为统计样本,选取次降雨量(P)、降雨历时(T)和平均雨强(I)作为特征指标,采用 k—均值聚类对雨型进行划分,用每种雨型 P 、 T 、 I 的 25% 和 75% 分位值作为其对应雨型的特点。

2 结果与分析

2.1 侵蚀性降雨特征

对研究区 2014—2017 年 4 年的侵蚀性降雨进行统计分析,由表 2 可知,4 年间共发生侵蚀性降雨 104 次,主要集中于 4—8 月,在这期间共发生侵蚀性降雨 88 次,占总样本量的 84.6%;这 5 个月间侵蚀性降雨的历时、雨量、产流产沙及降雨侵蚀力分别占样本总量的 75.8%, 84.9%, 86.8%, 94.5% 和 93.2%。5, 6 月侵蚀性降雨次数相同,都为 25 次,其中 6 月产流量为所有月份中最多,降雨侵蚀力也达到峰值,5 月产沙量为所有月份中最多。4 月侵蚀性降雨次数多于 7 月,但产流产沙量均小于 7 月。每年的 3, 9, 10, 11 月为研究区的少雨季节,这期间 9 月的产沙量最多,3 月的产流量最多。每年的 1, 2, 12 月不发生侵蚀性降雨。

表 2 研究区侵蚀性降雨特征统计

月份	侵蚀性 降雨次数	总历时/min	总雨量/mm	产流量/ m^3	产沙量/kg	降雨侵蚀力/ ($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)
3	4	2793	105.2	0.486	0.102	712.57
4	13	7139	236.8	0.681	0.303	1467.16
5	25	13056	615.4	2.376	4.148	5288.25
6	25	17533	1122.8	3.089	1.588	11883.53
7	12	10130	588.1	1.575	0.659	4952.81
8	13	11639	492.8	1.000	0.238	3824.10
9	5	5455	201.6	0.329	0.236	896.23
10	4	6579	137.4	0.288	0.034	283.30
11	3	4179	100.4	0.229	0.031	98.46
合计	104	78503	3600.5	10.053	7.339	29406.41

2.2 侵蚀性降雨雨型特征

对研究区的 104 次侵蚀性降雨以 P 、 T 和 I 为分类变量进行聚类分析,结果见表 3。所有侵蚀性降雨共分为 3 类, P 、 T 和 I 3 种降雨特征均对分类结果影响显著($p<0.01$),分类效果良好。以 25% 和 75% 分位值来作为不同雨型的各特征指标变化范围,因此 3 种雨型的特征可以描述为: A 雨型中历时(795~

1 124 min)、中雨强(1.46~3.80 mm/h)、中雨量(21.8~53.1 mm)、中频次(28 次); B 雨型长历时(2 065.50~3 121.25 min)、小雨强(0.75~1.33 mm/h)、大雨量(29.1~63.65 mm)、低频次(10 次); C 雨型为短历时(228.75~531.25 min)、大雨强(2.243~7.699 mm/h)、小雨量(13.75~29.75 mm)、高频次(66 次)。从发生频次上来说, C 雨型在 4 年共发生了 66 次,占总样本量

的 63.5%，其次为 A 类雨型，占 26.9%，B 雨型，占 9.6%，说明在 C 雨型下引起的产流产沙现象更为频繁。从造成的土壤侵蚀结果来看，坡耕地(4 号小区) 4 年间由不同雨型引起的土壤流失总量分别为：A 雨型共造成 4.225 t/hm²，B 雨型 0.558 t/hm²，C 雨型 14.986 t/hm²，C 雨型所造成土壤流失量占总流失量的 75.8%。不论是造成土壤侵蚀的次数还是造成土壤侵蚀的结果，都表明在研究区主要的侵蚀性降雨为 C 类雨型，即短历时、大雨强、小雨量、高频次。综合分析可以大致得出雨强相较于降雨量对引起土壤侵

蚀的贡献更大，尤其是短历时的暴雨。这是因为大雨强的暴雨对土壤的击溅分离能力更强，可以产生较多可搬运的泥沙，导致产沙量增加。所以对于 C 雨型在今后的防控工作中应重点防范。对于次降雨侵蚀力均值指标而言，呈现出 B 类>A 类>C 类雨型，而次降雨量指标体现为 B 类>A 类>C 类雨型，两者规律一致，可表明在一定程度上降雨量与降雨侵蚀力的关系更为密切。然而由于 C 类雨型发生更为频繁，故总降雨量仍然最多，占 50.1%，其总降雨侵蚀力也为 3 类雨型中最大。

表 3 不同侵蚀性雨型指标特征

降雨类型	样本数量	参数	降雨 历时/min	降雨量/ mm	平均雨强/ (mm·h ⁻¹)	降雨侵蚀力/ (MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹)	I ₃₀ / (mm·h ⁻¹)
A	28	平均值	987	43.1	2.56	315.57	22.56
		中位数	920	30.6	1.93	86.15	15.20
		最小值	705	10.6	0.60	7.90	3.60
		最大值	1546	150.2	6.90	1908.70	61.20
		总和	27647	1206.4	72.78	8836.00	631.60
		P ₂₅	795	21.8	1.46	23.10	6.60
		P ₇₅	1124	53.1	3.80	591.63	34.20
		平均值	2613	59.0	1.27	326.14	16.16
B	10	中位数	2668	46.2	1.07	65.53	10.40
		最小值	1964	17.8	0.50	18.00	3.20
		最大值	3181	191.4	3.60	2142.60	56.80
		总和	26125	590.0	12.70	3261.40	161.60
		P ₂₅	2066	29.1	0.75	40.91	8.00
		P ₇₅	3121	63.7	1.33	264.23	18.50
		平均值	375	27.3	5.56	262.24	26.37
		中位数	378	21.5	3.79	84.37	20.60
C	66	最小值	32	7.2	0.90	4.00	3.60
		最大值	660	122.4	30.40	1772.90	72.00
		总和	24731	1804.1	366.60	17309.10	1740.60
		P ₂₅	229	13.8	2.24	26.76	11.53
		P ₇₅	531	29.8	7.70	277.84	41.90

2.3 生物措施对产流产沙的调控效应

对研究区 6 个径流措施小区 104 次侵蚀性降雨的产流产沙进行分析见图 1。坡面产流与产沙呈现出类似的规律，产流量呈现出耕地>经果林>自然恢复草地>人工草地>水土保持>水平阶整地+经果林，与坡耕地相比，水土保持和水平阶整地+经果林措施均显著降低了坡面产流量($p<0.05$)；坡面产沙呈耕地>经果林>自然恢复草地>水土保持>人工草地>水平阶整地+经果林的趋势，与坡耕地相比较，其他生物措施均显著降低了坡面产沙量($p<0.05$)，即同坡耕地相比，云雾站不同生物措施均显著降低了坡面土壤侵蚀风险。

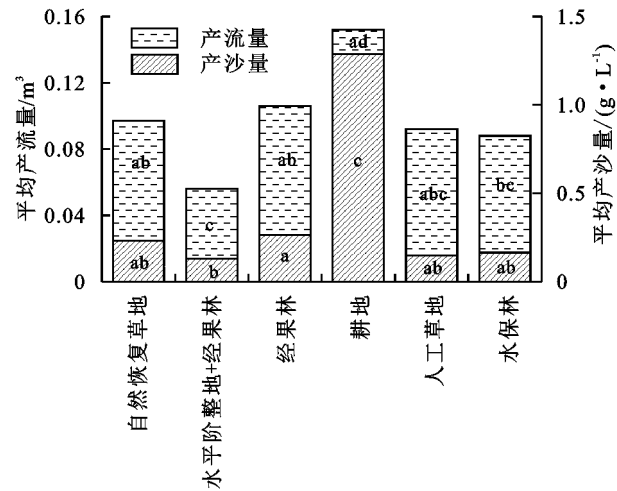
从云雾水土保持监测站点产流产沙结果来看，水平阶整地+经果林的水土流失调控效益最好，显著高于坡耕地($p<0.05$)。水平阶整地+经果林产流量为 0.056

m³，相较于坡耕地的 0.152 m³ 减少 63.2%的产流量；产沙量为 0.129 g/L，相较于坡耕地的 1.287 g/L 可减少 90%的产沙量。水土保持的产沙量高于人工草地，产流量低于人工草地，这可能是由于本研究区所种植的马尾松属针叶林，其叶面截留面积大，树木的林冠层可以层层有效截留雨水，减少地表径流，而人工草地由于其地被层较厚，且密度大，对土壤形成了保护效果使得产沙量较低，这是自然恢复草地所无法达到的。

2.4 不同雨型条件下生物措施对坡面产流产沙的响应

进一步分析不同雨型条件下生物措施对坡面产流产沙的影响见图 2。不同雨型条件下，坡耕地的水土保持效果均为最差，水平阶整地+经果林在 A、B、C 3 种雨型下相较于坡耕地可分别减少产流、产沙量达 62.7%，89.0%；53.0%，83.6%；63.2%，89.9%。

进一步表明水平阶整地+经果林的减流减沙效果好且稳定。但值得注意的是,在 B 型雨下水平阶整地+经果林对于产流产沙的减少率相较于耕地为 50%和 80%以上,而 A 型雨和 C 型雨条件下减少率可达 60%和 85%以上,所以水平阶整地+经果林在 B 型雨条件下的减流减沙作用不如 A 型雨和 C 型雨,在 B 型雨多发地区应注意此现象。



注:图中相同小写字母表示处理间无显著差异($P>0.05$);不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

图 1 不同生物措施平均产流产沙量

将水平阶整地+经果林与经果林在 3 种雨型下的产流产沙量进行分析表明,在 A、B、C 雨型下水平阶整地+经果林的水土保持效果均优于经果林,这主要是由于水平阶整地措施可以有效减缓坡度,降低坡面径流的流速与侵蚀力、加速水分下渗,其形成的埂坎对径流与泥沙都有一定的淤积作用,使其产流产沙量都低于其他措施,一定程度表明了生物措施与工程性措施相结合治理会得到更佳水土流失调控效应。将不做任何工程性措施处理的 3 号小区经果林与水土保持林作为不同的林地类型,对其产流产沙进行对比,总体来看(图 1),水土保持林的水土流失调控效果优于经果林,但未达显著水平($p>0.05$),水土保持林较经果林可减少产流量的 17%和产沙量的 37.6%,且在不同雨型下规律一致。主要是因为经果林每年都要进行采

摘及修枝剪叶等人为干扰,增加了土壤可蚀性,而水土保持林由于不施加任何人为干扰,其大量的枯落物可以有效截留径流泥沙并减缓坡面水流速度,从而使其具有较好的水土保持效果。将自然恢复草地和人工草地作为不同草地措施进行对比分析,A 雨型和 C 雨型条件下人工草地相较于自然恢复草地可以减少产流量 1.38%和 4.56%,减少产沙量 34.12%和 35.97%,效果更优。这主要因人工草地相较于自然杂草种植密度较大,覆盖度高,可以有效截留雨水,减缓减蚀作用,且其发达的根系不仅可以固结土壤,还可以增加土壤的渗透力,从而起到减流减沙的作用。但 B 型雨条件下人工草地的产流产沙高于自然恢复草地,这可能是由于自然恢复草地饱和和蓄水量高于人工草地^[20],因此在 B 型雨长历时、小雨强、大雨量的条件下,人工草地较自然恢复草地过早产生了“蓄满”产流,从而导致 B 雨型下人工草地产流产沙大于自然恢复草地的现象。

以耕地作为对照,分析不同雨型下各措施的调控效应见表 4。不同雨型下不同措施的减流减沙规律表现为 A 雨型减流率呈水平阶整地+经果林>水土保持林>人工草地>自然恢复草地>经果林,减沙率为水平阶整地+经果林>人工草地>水土保持林>自然恢复草地>经果林;B 雨型减流率呈水平阶整地+经果林>自然恢复草地>水土保持林>人工草地>经果林的趋势,减沙率为水平阶整地+经果林>自然恢复草地>人工草地>水土保持林>经果林;C 雨型减流率水平阶整地+经果林>水土保持林>人工草地>自然恢复草地>经果林,减沙率水平阶整地+经果林>人工草地>水土保持林>自然恢复草地>经果林。不难看出,除自然恢复草地,B 型雨下各种生物措施对于水土流失的调控效应普遍不如 A 型雨和 C 型雨,自然恢复草地在 B 雨型条件下的减沙率高于其他雨型,且在 B 雨型下其减流减沙效果仅次于水平阶整地+经果林,表现良好。因此在 B 型雨多发地区应重视此现象。此外,3 种雨型下各措施较耕地的减沙率均高于减流率。

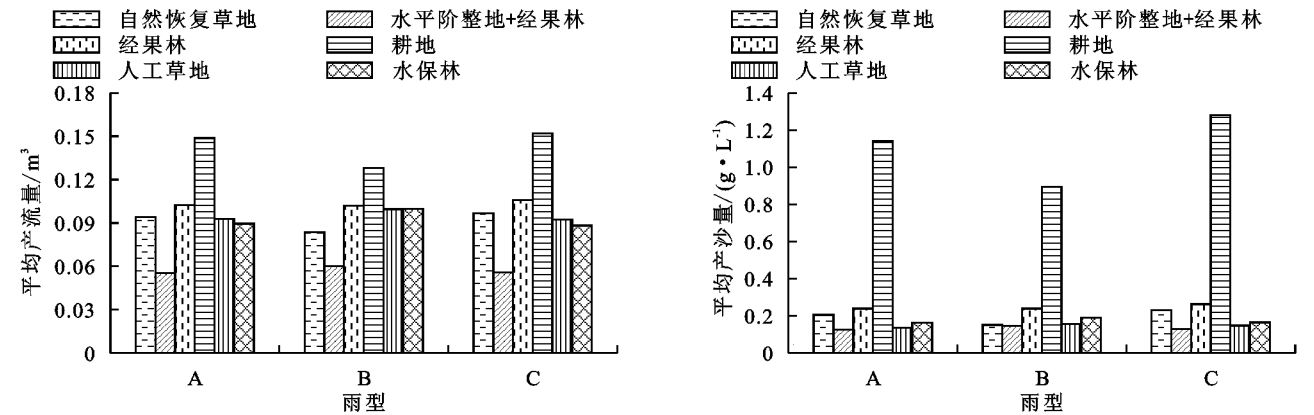


图 2 不同雨型各生物措施产流产沙情况

表 4 不同雨型各措施较耕地的减流减沙率

		单位: %				
雨型	项目	自然恢复 草地	水平阶整地+ 经果林	经果林	人工 草地	水保林
A	减流率	36.8	62.7	31.2	37.7	39.7
	减沙率	82.1	89.0	79.0	88.2	85.8
B	减流率	34.6	53.0	20.3	22.1	22.2
	减沙率	83.1	83.6	73.3	82.5	78.6
C	减流率	36.4	63.2	30.3	39.1	41.7
	减沙率	82.0	89.9	79.5	88.5	87.2

2.5 产流产沙特征随时间变化规律

2.5.1 月产流产沙特征 坡面不同生物措施月产流情况见图 3。1,2,12 月在 4 年没有产生侵蚀性降雨,不同生物措施月产流特征大致表现为先增加后降低的趋势,这与降雨量规律类似,集中于 5—8 月,这 4 个月的降雨量占总样本量的 78.3%。6 个小区在这 4 个月间的产流量占总产流量分别达 80%,74.1%,76%,83.7%,77.4%和 75.8%,表明 5—8 月为坡面产流的集中期,是坡面水土流失防治的重点时段;9—11 月,随着降雨量的递减,产流量也相应减少。

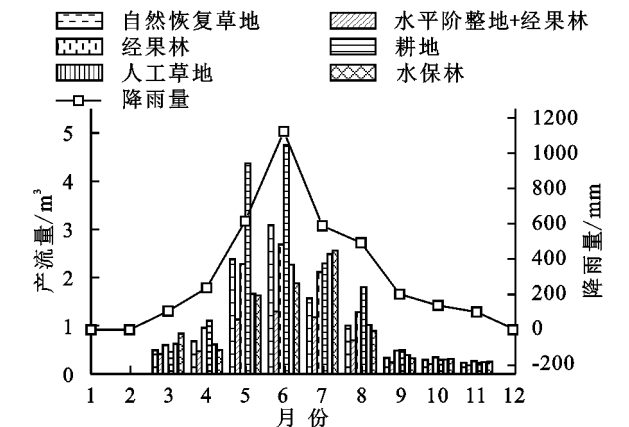


图 3 各措施月产流特征

对于月产沙规律而言,其与降雨量月变化特征并不完全吻合(表 5)。结合前文分析可知,C 雨型是区域土壤侵蚀的主要降雨类型,将不同雨型在每个月份的发生频次进行统计见表 6。C 雨型在 5,6 月分别发生了 19,16 场,为所有月份中最多,相应的各措施产沙量也主要集中在 5,6 月,说明产沙量的变化规律与侵蚀性降雨类型的分布关系较大。水平阶整地+经果林、人工草地及水保林的最大产沙量均没有出现在 C 雨型最为集中的 5 月,而是出现在 6 月,存在一定的滞后效应。

2.5.2 年产流产沙特征 不同生物措施年产流量见图 4。坡耕地与自然恢复草地的年季产流特征与降雨量变化规律类似,2015 年产流量最大;而水平阶整地+经果林、经果林、人工草地及水保林在 4 年间的产流量呈阶梯状递减趋势,2014 年产流量最大,与期

间降雨变化规律不完全相符,原因可能是随着时间推移,林木的郁闭度和根系密度增大,水土保持效果提升,尤其是水保林,水保林 2014 年产流量为 6.437 m³,2015 年产流量为 1.631 m³,2015 年蓄水效果相较于 2014 年有明显提高,减少产流量 4.806 m³。

表 5 各措施月产沙特征 单位: kg

月份	自然恢复 草地	水平阶整地+ 经果林	经果林	耕地	人工 草地	水保林
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0.10166	0.06528	0.206	0.1377	0.18512	0.43246
4	0.30276	0.13556	0.43915	7.58641	0.28051	0.22772
5	4.14788	0.18876	2.29708	95.65053	0.33065	0.61288
6	1.58779	0.30997	1.48558	32.93584	0.53305	0.64681
7	0.65946	0.14096	1.10239	3.80627	0.32588	1.49698
8	0.23828	0.11977	0.35789	5.54377	0.17095	0.20867
9	0.23608	0.18625	0.30486	0.34734	0.26903	0.2096
10	0.03383	0.03183	0.05243	0.0606	0.05721	0.06438
11	0.03136	0.02807	0.06169	0.06106	0.04764	0.06461
12	0	0	0	0	0	0
合计	7.33909	1.20646	6.30708	146.12953	2.20006	3.9641

表 6 不同雨型发生频次

月份	A 雨型	B 雨型	C 雨型	总计
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	1	3	4
4	0	1	12	13
5	6	0	19	25
6	8	1	16	25
7	1	2	9	12
8	7	1	5	13
9	3	1	1	5
10	1	2	1	4
11	2	1	0	3
12	0	0	0	0
总计	28	10	66	104

表 7 为坡面不同生物措施 4 年间平均土壤侵蚀模数,坡耕地依然是水土流失的主要土地利用方式,其土壤侵蚀模数达 365.33 t/(km²·a),远高于水平阶整地+经果林措施的 3 t/(km²·a)。与坡耕地对照,其他生物措施均具有较好的土壤保持效果,降低土壤侵蚀率均超过 95%,大大降低了坡面土壤侵蚀风险。

3 讨论

研究表明坡面尺度土壤侵蚀受雨强^[21]、历时^[22]和雨量^[23]等降雨特征的综合影响,但以往对雨型的研究^[24-26]中大多以单一指标进行分类或不能很好体现降雨特征之间的综合作用。本文基于以上 3 种降雨特征将研究区侵蚀性降雨分为 A、B、C 3 类,相对而言更加符合实际情况。

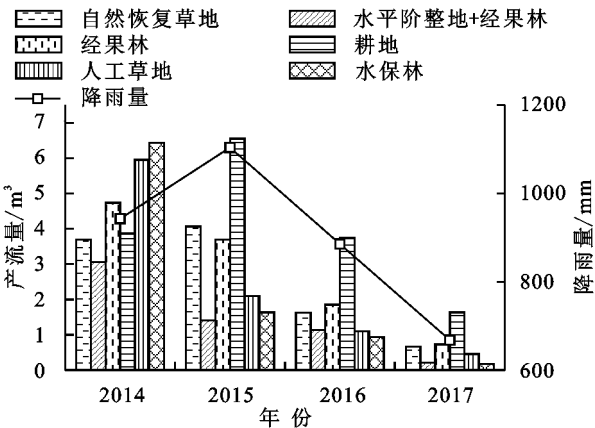


图 4 各措施年产流特征

表 7 不同坡面生物措施土壤侵蚀模数

生物措施	土壤侵蚀模数/ ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	降低土壤侵蚀率/%
坡耕地(对照)	365.33	—
自然恢复草地	18.35	95.0
水平阶整地+经果林	3.00	99.2
经果林	15.78	95.7
人工草地	5.50	98.5
水土保持	9.93	97.3

本研究表明,C 雨型(短历时、大雨强、小雨量、高频次)是造成贵州省黔南地区土壤侵蚀的主要侵蚀性雨型,因大雨强对土壤的击溅能力较强,可分离较多土壤导致土壤流失加剧。4 年间仅坡耕地小区土壤流失总量高达 14.986 t/hm²。杜波等^[27]在贵州省关岭县蚂蟥田地区进行的雨型研究结果表明,该地区 6 月侵蚀性降雨最多,且小雨量、短历时、大雨强的暴雨是造成该地区水土流失的主要雨型,这与本研究结果类似;谭顺菊等^[28]对贵州省羊鸡冲小流域地区的侵蚀性雨型划分结果与本文一致,侵蚀性降雨分布月份也与本文类似,与本研究区情况不同的是该区造成水土流失最多的雨型特点是中雨强、中雨量、中历时,但就不同雨型各降雨指标数据来看,谭顺菊等^[28]所划分的中雨强(1.83~4.92 mm/h)、中雨量(11~34.5 mm)、中历时(297~580.2 min)的雨型与本研究区所划分的大雨强(2.243~7.699 mm/h)、小雨量(13.75~29.75 mm)、短历时(228.75~531.25 min)的雨型 3 个指标取值范围相差并不多,而其所划分出的大雨强(20.81~22.13 mm/h)、小雨量(11.8~21.5 mm)、短历时(31.8~61.8 min)的雨型则更多倾向于极端的暴雨情况,其样本量也仅有 3 次降雨。就其他地区而言,我国红壤区研究^[29]表明,短历时(116.3~463.8 min)、小雨量(9.2~28.2 mm)、大雨强(2.2~9.3 mm/h)的雨型是导致红壤裸露坡地土壤侵蚀的主要雨型,其发生频率占总降雨的 60%,累计侵蚀量占样本总量的 84%。同样的结论也可以在黄土高原地区

得出,焦菊英等^[30]的研究表明,短历时、大雨强的暴雨发生的比例占侵蚀性降雨总量的 52.7%,侵蚀量达 64%。此雨型在黄土高原坡面和沟道小流域能造成 70%的极强烈侵蚀。可见,本研究区和我国红壤区及黄土高原区 3 个地区的土壤侵蚀均主要由短历时、大雨强、小雨量的暴雨引起,且 3 个地区单次降雨量相当,但是黄土高原区的暴雨较本研究区及红壤区而言,通常历时更短、雨强更大。综上所述,在贵州省黔南地区应对这种雨型进行主要防范。

云贵高原坡耕地作为该地区水土流失的主要源头,本研究得出其 4 年平均土壤侵蚀模数为 365.33 t/(km²·a),采取不同生物治理措施后水土流失情况有较大改观,各生物措施相较于坡耕地降低土壤侵蚀率均可达 95%以上。就林地而言,水土保持保土蓄水效果优于经果林,这与前人^[31]研究结果类似,但是考虑到经果林有较大经济效益,可改善当地人地矛盾,加之水土保持效益较经果林而言并未达显著水平,故在适宜发展林地的坡面还是应首先采取经果林种植。就草地而言,总体上(图 1)人工草地相较于自然恢复草地效果更优。虽然出现一个特殊现象是在 B 型雨下自然恢复草地的保水固土效果高于人工草地,但 B 型雨在研究区所占比例较低,且云贵地区山地较多,可利用土地有限,所以在实际生产中进行自然恢复不太现实,故在适宜发展草地的坡面应优先进行人工种草措施。此外,水平阶整地+经果林产沙产流量为所有措施中最低,其土壤侵蚀模数仅为 3 t/(km²·a),较坡耕地可降低土壤侵蚀率达 99.2%。但由于整地工程措施需耗费较大的人力物力,因此在实际生产中应视具体情况采取相应措施。

4 结论

- (1)研究区侵蚀性降雨主要可分为 3 类:中历时、中雨强、中雨量、中频次的 A 雨型;长历时、小雨强、大雨量、低频次的 B 雨型;短历时、大雨强、小雨量、高频次的 C 雨型。C 雨型为引起研究区水土流失的主要雨型。
- (2)较坡耕地而言,A 雨型和 C 雨型条件下减流量均呈水平阶整地+经果林>水土保持>人工草地>自然恢复草地>经果林的趋势;减沙量均为水平阶整地+经果林>人工草地>水土保持>自然恢复草地>经果林。B 雨型减流量为水平阶整地+经果林>自然恢复草地>水土保持>人工草地>经果林;减沙量为水平阶整地+经果林>自然恢复草地>人工草地>水土保持>经果林。
- (3)以坡耕地为对照,除自然恢复草地外,B 型雨条件下各措施对于水土流失的调控作用普遍不如 A 型雨和 C 型雨,且 3 种雨型下各措施对产沙的调控

作用优于产流。自然恢复草地在 B 型雨条件下具有良好的水土流失调控作用。

(4)5—8 月为坡面产流和降雨量的高峰期;主要侵蚀性雨型 C 雨型集中分布在 5,6 月,这 2 个月也是产沙的高峰期。水平阶整地+经果林、人工草地及水保林的最大产沙量存在一定滞后效应。

(5)不同雨型坡耕地的水土流失最为严重。水平阶整地+经果林蓄水保土效果最优,3 种雨型下较坡耕地减流量为 62.7%,53%,63.2%,水平阶整地+经果林土壤侵蚀模数为 3 t/(km² · a),较坡耕地的 365.33 t/(km² · a)可降低土壤侵蚀率 99.2%。

参考文献:

[1] Zhang J X, Zhang D Y, Liu W F, et al. Progress in research on land use and soil erosion in the Loess Plateau of China[J].IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 242 (5). DOI: 10.1088/1755-1315/242/5/052021.

[2] 李占斌,朱冰冰,李鹏.土壤侵蚀与水土保持研究进展[J].土壤学报,2008,45(5):802-809.

[3] 张攀,姚文艺,刘国彬,等.土壤复合侵蚀研究进展与展望[J].农业工程学报,2019,35(24):154-161.

[4] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget[J].Environment International,2003,29(4):437-450.

[5] 王世杰,李阳兵,李瑞玲.喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理[J].第四纪研究,2003,23(6):657-666.

[6] 吕明辉,王红亚,蔡运龙.西南喀斯特地区土壤侵蚀研究综述[J].地理科学进展,2007,26(2):87-96.

[7] 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.

[8] 戴全厚,严友进.西南喀斯特石漠化与水土流失研究进展[J].水土保持学报,2018,32(2):1-10.

[9] 刘晓达,郭涿,李冬冬.黔南布依族苗族自治州生态环境敏感性评价与区划[J].国土与自然资源研究,2013,(6):25-28.

[10] 罗娅,杨胜天,刘晓燕,等.黄土高原次降雨径流产沙变化及其与雨强和植被盖度变化的相关性[J].干旱区研究,2015,32(4):698-709.

[11] 王占礼,靳雪艳,马春艳,等.黄土坡面降雨产流产沙过程及其响应关系研究[J].水土保持学报,2008,22(2):24-28.

[12] 刘晓燕,刘昌明,党素珍.黄土丘陵区雨强对水流含沙量的影响[J].地理学报,2019,74(9):1723-1732.

[13] 焦剑,谢云,林燕,等.东北地区降雨—径流侵蚀力研究[J].中国水土保持科学,2009,7(3):6-11.

[14] 钟科元,郑粉莉,吴红艳,等.松花江流域极端降雨变化对流域输沙量的影响[J].农业机械学报,2017,48(8):245-252,321.

[15] Qi X K, Wang K L, Zhang C H. Effectiveness of eco-

logical restoration projects in a karst region of south-west China assessed using vegetation succession mapping[J].Ecological Engineering,2013,54:245-253.

[16] Tong X W, Wang K L, Yue Y M. Quantifying the effectiveness of ecological restoration projects on long-term vegetation dynamics in the karst regions of South-west China[J].International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2017,54:105-113.

[17] 李安定,喻理飞.贵州省喀斯特区基于林木耗水特征的顶坛花椒造林整地技术[J].中国岩溶,2009,28(2):189-193.

[18] 高敏,王勇,高洁,等.喀斯特地区退耕还林工程下生态系统服务变化与关系分析[J].水土保持研究,2020,27(2):276-283.

[19] 祝超伟,倪九派,余佳音,等.岩溶槽谷区坡改梯与自然地块生产对比[J].农业工程,2013,3(3):85-87.

[20] 王红梅,谢应忠,王堃,等.宁夏南部半干旱黄土丘陵区草地土壤水分物理特性研究[J].农业科学研究,2007,28(3):5-9.

[21] Lal R. Soil erosion on Alfisols in Western Nigeria: III. Effects of rainfall characteristics[J].Geoderma,1976,16(5):389-401.

[22] Ran Q H, Su D Y, Li P, et al. Experimental study of the impact of rainfall characteristics on runoff generation and soil erosion[J].Journal of Hydrology,2012,425(6):99-111.

[23] 尹忠东,周心澄,朱金兆.影响水土流失的主要因素研究概述[J].世界林业研究,2003,16(3):32-36.

[24] 张黎明,林金石,于东升,等.南方不同类型土壤侵蚀量与降雨各因子的关系研究[J].水土保持通报,2011,31(2):10-14.

[25] 郑粉莉,边锋,卢嘉,等.雨型对东北典型黑土区顺坡垄作坡面土壤侵蚀的影响[J].农业机械学报,2016,47(2):90-97.

[26] 罗键,尹忠,郑子成,等.不同降雨条件下紫色土横垄坡面地表微地形变化特征[J].中国农业科学,2016,49(16):3162-3173.

[27] 杜波,唐丽霞,潘佑静,等.贵州喀斯特地区侵蚀性次降雨产流产沙特征研究[J].西南林业大学学报,2016,36(5):111-117.

[28] 谭顺菊,高华端,代裕.羊鸡冲小流域主要雨型对砂页岩坡耕地土壤侵蚀的影响[J].中国水土保持,2016(4):44-47.

[29] 秦伟,左长清,晏清洪,等.红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J].农业工程学报,2015,31(2):124-132.

[30] 焦菊英,王万中,郝小品.黄土高原不同类型暴雨的降水侵蚀特征[J].干旱区资源与环境,1999,13(1):35-43.

[31] 柏勇,杜静,杨婷婷,等.不同水土保持措施对石漠化区水土流失的影响[J].中国水土保持科学,2018,16(2):106-113.