

# 喀斯特地区不同降雨和植被覆盖的 坡面产流产沙特征

杨青<sup>1,2</sup>, 杨广斌<sup>1,2</sup>, 赵青松<sup>1,2</sup>, 戴丽<sup>1,2</sup>

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550025;

2. 贵州省山地资源与环境遥感应用重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** [目的] 分析不同降雨类型下的径流和产沙量特征, 及其在不同植被覆盖类型和植被覆盖度下的响应, 为喀斯特地区黄壤坡面在不同降雨和植被覆盖条件下的产流和产沙量动态特征研究提供理论基础。[方法] 以贵州省黔南州龙里县羊鸡冲小流域 2014—2018 年径流小区实测数据为基础, 基于均值分类的方法, 将研究区降雨类型划分为 4 类, 对各指标进行相关性分析、回归模型模拟以及指数函数分析。[结果] 不同降雨对研究区产流产沙的影响程度不同, 不同植被覆盖类型下降雨特征对产流产沙的影响存在明显的差异。总体上 A 型降雨(极强雨强, 极大降雨量、中等降雨历时的低频次降雨事件)更容易造成侵蚀性危害, 该条件下坡面产流和产沙量之间显著相关, 并且经果林表现出极好的水土保持效果; B 型降雨(强降雨, 中等降雨量、短降雨历时的高频次降雨事件)为该地区主要降雨类型; 在 4 种降雨条件下, 混交林的水土保持效果优于其他植被覆盖类型。产沙量与雨强、径流深正相关, 和植被覆盖度负相关, 对产沙量的影响为: 径流深 > 平均雨强 > 植被覆盖度。当植被覆盖度到达 80% 左右, 其削减径流以及减沙的效果处于稳定的状态。[结论] 在降雨一定的前提下, 植被是影响坡面产沙量的关键因子。对于喀斯特地区黄壤坡面而言, 增加地表覆盖度是减少产沙量的基础, 也是防治水土流失的一项重要举措。

**关键词:** 喀斯特地区; 植被覆盖; 径流; 产沙量

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2020)01-0009-08

**中图分类号:** S157.1

**文献参数:** 杨青, 杨广斌, 赵青松, 等. 喀斯特地区不同降雨和植被覆盖的坡面产流产沙特征[J]. 水土保持通报, 2020, 40(1): 9-16. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.01.002; Yang Qing, Yang Guangbin, Zhao Qingsong, et al. Characteristics of runoff sediment yield on slopes under different rainfall and vegetation cover in karst areas[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(1): 9-16.

## Characteristics of Runoff Sediment Yield on Slopes Under Different Rainfall and Vegetation Cover in Karst Areas

Yang Qing<sup>1,2</sup>, Yang Guangbin<sup>1,2</sup>, Zhao Qingsong<sup>1,2</sup>, Dai Li<sup>1,2</sup>

(1. School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University,

Guiyang, Guizhou 550025, China; 2. Guizhou Provincial Key Laboratory of Mountain

Resources and Environmental Remote Sensing Application, Guiyang, Guizhou 550025, China)

**Abstract:** [Objective] Analysis of the characteristics of runoff and sediment yield under different rainfall patterns, and its responses under different vegetation cover types and vegetation coverage was conducted to provide a theoretical basis for studying the dynamic characteristics of runoff and sediment yield of yellow soil slopes in karst areas. [Methods] Based on field measurements from 2014—2018 in Yangjichong watershed (Longli County, Qiannan Prefecture, Guizhou Province), and based on the K-means classification method, the rainfall types in the study area were divided into four categories, and the correlation analysis, regression model, and exponential function analysis of each indicator were carried out. [Results] Different rainfall types

收稿日期: 2019-06-12

修回日期: 2019-08-30

资助项目: 贵州省水利厅科技专项经费项目“基于水保大数据的贵州 CSLE 土壤侵蚀模型应用研究”(KT201825); 贵州省科技厅项目(黔科合 LH 字[2015] 7776 号)

第一作者: 杨青(1994—), 女(汉族), 贵州省清镇市人, 硕士研究生, 研究方向为地理信息系统与生态学。Email: gznu\_yq@163.com.

通讯作者: 杨广斌(1973—), 男(汉族), 山东省聊城市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事 3S 技术集成与应用研究。Email: ygbyln@163.com.

had diverse effects on sediment yield in the study area, and significant differences existed between rainfall characteristics on sediment yield under different vegetation cover types. The A-type rainfall pattern (low-frequency rainfall events with extremely high intensity, extremely high amounts and medium duration) was more likely to cause erosion. There was significant correlation between runoff yield and sediment yield on slopes, soil and water conservation effect in an economic fruit forest. The B-type rainfall (high-frequency rainfall events with high intensity, medium amounts and short duration) was the main rainfall type in this region. Among the four rainfall types, the soil and water conservation effect of mixed forest was the best, compared with other vegetation cover types. Sediment yield was positively correlated with rainfall intensity and runoff depth, and negatively correlated with vegetation coverage. The sediment yield was strongly influenced by runoff depth, followed by average rainfall intensity and vegetation coverage. When vegetation coverage reached about 80%, the reduction effect on runoff and sediment was stable. [Conclusion] Under certain rainfall, vegetation is the key factor affecting slope sediment yield. For a slope of yellow soil in karst areas, increasing surface coverage is not only the basis for reducing sediment yield, but also an important measure to prevent soil erosion.

**Keywords:** karst area; vegetation coverage; runoff; sediment yield

由于喀斯特环境特殊性和复杂性,中国有关喀斯特环境土壤侵蚀的研究工作较为薄弱。并且缺少连续高精度监测资料,在涉及喀斯特山区水土流失时,仍沿袭非喀斯特区的侵蚀分级标准,给喀斯特山区的水土保持和生态恢复工作造成极为不利的影响<sup>[1-2]</sup>。而坡面径流主要受降雨特征和下垫面变化影响,而下垫面特征与地形、土壤、地表覆盖等因素相关<sup>[3-5]</sup>。有相关研究对不同土地利用与土壤侵蚀之间的关系进行报道<sup>[6-9]</sup>。一般认为降雨量、雨强、雨型、历时等都与土壤侵蚀量及其侵蚀过程密切相关<sup>[10-12]</sup>。近年来,有研究利用不同土地利用的坡面径流小区 5 a 的观测数据,探究研究区不同降雨条件下坡面产流产沙的特征,为黄壤的侵蚀预报提供了相关理论依据<sup>[13]</sup>。李瑞等<sup>[14]</sup>研究了喀斯特地区降雨与坡面土壤侵蚀的关系,得出降雨量与产沙量相关性较高,并且呈正相关。陈伟等<sup>[15]</sup>通过对径流小区监测数据的分析得出,有效的水土保持综合技术集成模式可显著减少地表径流。张文安等<sup>[16]</sup>对黔中黄壤丘陵旱坡地的水土流失进行研究,结果表明研究区土壤侵蚀与降水径流同步发生。纪启芳<sup>[17]</sup>研究贵州遵义泮洋水小流域得出不同地类坡面径流深和产沙量与降雨量之间有良好的幂函数关系。另有研究通过划分为不同次降雨类型,研究旱坡地降雨侵蚀过程,最终得出土壤侵蚀与坡度、径流量与产沙量之间的关系<sup>[18-19]</sup>。陈洪松等<sup>[20]</sup>对桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式坡面产流产沙特征进行研究。鲜有使用长时间序列的径流小区数据对喀斯特地区,黄壤坡面不同降雨及植被类型的坡面产流产沙量进行分析。

贵州省是西南地区喀斯特地貌的典型代表省份

之一,全省黄壤所占比例为 41.2%<sup>[21]</sup>,黄壤是广泛分布于贵州和四川省等地的地带性土壤,可发育于各种母质之上,以花岗岩、砂页岩为主(龙里没有花岗岩出露),此外还有第四纪红色黏土及石灰岩风化物,以贵州高原较有代表性。龙里监测站是经长江水利委员会长江流域水土保持监测中心站于 2013 年实地考察后,被列为全国水土流失动态监测与公告项目的典型小流域。本研究利用贵州省水土保持监测中心建立的龙里羊鸡冲小流域 2014—2018 年径流小区观测数据,重点探讨不同降雨类型下各植被类型、覆盖度对坡面产流输沙的影响,分析植被、降雨、产流和产沙量变化的动态规律,以期更为全面地揭示喀斯特地区黔中山地水土流失的特征,以及真实地反映黄壤区降雨、植被类型、覆盖度与坡面产流产沙之间的响应,为喀斯特地区黄壤坡面不同降雨和植被类型产流和产沙的动态特征研究提供理论基础。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

龙里羊鸡冲水土保持监测站位于贵州省黔南州龙里县东城郊,地处东经 107°00′53″,北纬 26°26′58″,位于国家级黔南岩溶石漠化水土流失重点治理区,流域属于乌江水系三岔河支流的上游的羊鸡冲小流域。小流域面积为 11.89 km<sup>2</sup>,水土流失面积 7.41 km<sup>2</sup>。龙里县属北亚热带湿润季风气候,多年平均降雨量 1 100 mm,多年平均气温 14.8 ℃;主要植被类型为亚热带石灰岩常绿桫欏林及常绿落叶阔叶混交林;土壤类型主要有石灰土、黄壤、黄棕土和水稻土 4 种。

研究区监测点始建于 2004 年,坡面径流小区共 18 个,土壤类型均为黄壤,其中作为对照组的裸土土

层厚度为 50 cm,其余小区均为 80 cm;并且设置不同的土地利用类型,其中 1<sup>#</sup> 和 2<sup>#</sup> 小区为阔叶林,植被类型为杨树;3<sup>#</sup> 和 4<sup>#</sup> 小区为针叶林,植被类型为墨西哥柏;5<sup>#</sup> 和 6<sup>#</sup> 小区为针阔混交林,植被类型为杨树×墨西哥柏;7<sup>#</sup> 和 8<sup>#</sup> 小区为耕地,主要耕种玉米;9<sup>#</sup> 和 10<sup>#</sup> 小区为自然草地;11<sup>#</sup> 和 12<sup>#</sup> 小区为裸土;13<sup>#</sup>—18<sup>#</sup> 小区为经果林,植被类型为杨梅、桃树、梨树、树莓。其中 7<sup>#</sup>—12<sup>#</sup> 小区坡度为 25°,其余径流小区均为 20°。

1.2 研究方法

本次研究采用的是监测站 18 个径流小区 2014—2018 次降雨、径流、泥沙等实测数据。参照相关研究<sup>[19]</sup>最终选取的参数有:降雨特征包括次降雨量( $P$ )、降雨历时( $D$ )、平均雨强( $I$ );产沙量( $M$ )、径流深( $Q$ );以及植被覆盖度( $C$ ),该参数是指在每次降雨后,对径流泥沙进行监测时相应的林下植被(草)在地面的垂直投影面积占统计区总面积的百分比,对于耕地而言是指农作物的枝叶的垂直投影面积占统计区总面积的百分比。

首先,对选取的试验数据进行数理统计分析,运

用 SPSS 对数据进行统计描述,并且对离群值和极端值进行检验,剔除异常值。基于  $K$  均值分类法对次降雨事件进行分类,分类结果的显著性差异( $p < 0.05$ )即分类合理<sup>[22]</sup>。为了进一步分析各降雨条件下不同植被类型,坡面产流量与产沙量的相关性是否显著,利用 SPSS 软件对各指标之间进行 Pearson 相关性分析,得出 4 种降雨条件下产流产沙的相关性。运用多元回归分析各降雨类型下产沙量( $M$ )与平均雨强( $I$ )、径流深( $Q$ )以及植被覆盖度( $C$ )的关系。并进一步分析各植被覆盖度下径流、产沙量的指数函数关系。

2 结果与分析

2.1 降雨类型划分

根据径流小区监测的次降雨、径流、泥沙等相关资料,选取降雨历时、雨量、平均雨强作为降雨特征指标,在 SPSS 软件中采用  $K$  均值聚类将 975 次降雨分为 4 类,分别为 A 型降雨、B 型降雨、C 型降雨、D 型降雨,分类结果如表 1 所示,经检验各类指标 sig. = 0.000,即显著性  $p$  值小于 0.001,满足分类要求。

表 1 降雨类型分类指标

降雨类型	分类指标	平均值	累积降雨量/mm	累积径流深/mm	累积产沙量/kg	发生频次
A	$D/h$	10.5	2 839.3	123	31.3	34
	$P/mm$	83.5				
	$I/(mm \cdot h^{-1})$	8.2				
B	$D/h$	7.8	10 570.9	799.5	378	482
	$P/mm$	26.9				
	$I/(mm \cdot h^{-1})$	3.8				
C	$D/h$	25.3	5 118.2	151.8	48.6	190
	$P/mm$	21.9				
	$I/(mm \cdot h^{-1})$	1.2				
D	$D/h$	13.2	11 518.6	552.4	215	269
	$P/mm$	42.8				
	$I/(mm \cdot h^{-1})$	4.5				

注: $D$ 为降雨历时; $P$ 为次降雨量; $I$ 为平均雨强。

参照分类指标对 4 类降雨进行排序,降雨历时: $C > D > A > B$ ;次降雨量: $A > D > B > C$ ;平均雨强为: $A > D > B > C$ ;说明在各降雨指标中,降雨量与雨强具有一致性,即雨量与雨强之间呈正相关<sup>[19]</sup>。据此,各类降雨类型特征为:A 型降雨由极强雨强,极大降雨量、中等降雨历时的低频次降雨事件组成;B 型降雨由强降雨强,中等降雨量、短降雨历时的高频次降雨事件组成;C 型降雨由弱雨强,小降雨量,长降雨历时的低频次降雨事件组成;D 型降雨由较强雨强,中等降

雨量,中等降雨历时的高频次降雨事件组成。

由表 1 可知,A 型降雨发生频次占总场次的 3.5%,累积降雨量为 2 839.3 mm,累积径流深为 123 mm,累积产沙量为 31.3 kg;B 型降雨发生频次占总场次的 49.4%,累积降雨量为 10 570.9 mm,累积径流深最大,为 799.5 mm,累积产沙量最大,为 378 kg;C 型降雨发生频次占总场次的 19.5%,累积降雨量为 5 118.2 mm,累积径流深为 151.8 mm,累积产沙量为 48.6 kg;D 型降雨发生频次占总场次的 27.6%,累积降雨

量最大,为 11 518.6 mm,累积径流深为 552.4 mm,累积产沙量为 215 kg;根据频次计算,用累积产沙量与发生频次的比值表示单次降雨条件下的土壤侵蚀量的多少,得出的值可用来比较各降雨类型对产沙量的影响,结果显示:A 型降雨单次产沙量为 0.9 kg,B 型降雨单次产沙量为 0.8 kg,C 型降雨单次产沙量为 0.3 kg,D 型降雨单次产沙量为 0.8 kg,就其发生频

次而言,A 型降雨对该地区土壤侵蚀带来最严重的影响影响;其次为 D 型降雨,结合其降雨特点可知,短时强降雨会对该地区的土壤侵蚀带来一定的负面影响。

2.2 不同植被和降雨类型条件下坡面产流和产沙特征

如图 1 所示,4 种雨型引起 7 类坡面产流与产沙的总量特征,结果表明不同植被类型的坡面产流和产沙特征之间存在差异。

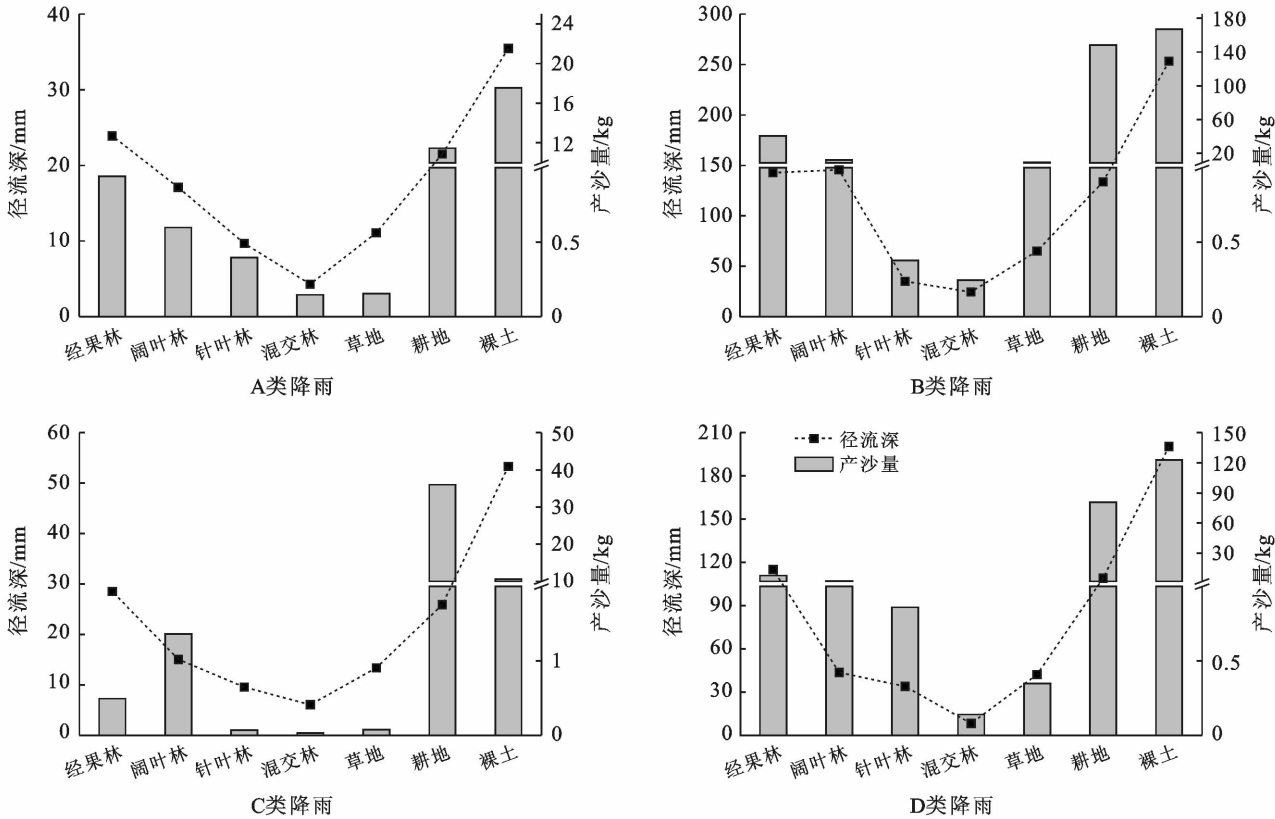


图 1 喀斯特地区不同植被和降雨坡面产流产沙量

如图 1 所示,除作为对照组的裸土小区,在 A 雨型情况下:产流总量最大的是经果林,其次是耕地、阔叶林、草地、针叶林和混交林;产沙量最大的是耕地,其次是经果林、阔叶林、针叶林、混交林和草地。在 B 雨型情况下:产流量最大的是阔叶林,其次是经果林、耕地、草地、针叶林和混交林;产沙量最大的是耕地,其次是经果林、阔叶林、草地、针叶林、混交林。在 C 雨型情况下:产流量最大的是经果林,其次是耕地、阔叶林、草地、针叶林和混交林;产沙量最大的是耕地,其次是阔叶林、经果林、草地、针叶林、混交林。在 D 雨型情况下:产流量最大的是经果林,其次是耕地、阔叶林、草地、针叶林和混交林;产沙量最大的是耕地,其次是经果林、阔叶林、针叶林、草地、混交林。

经果林、阔叶林、针叶林、混交林、草地的产流量与产沙量明显低于耕地和裸土。在所有降雨事件中,

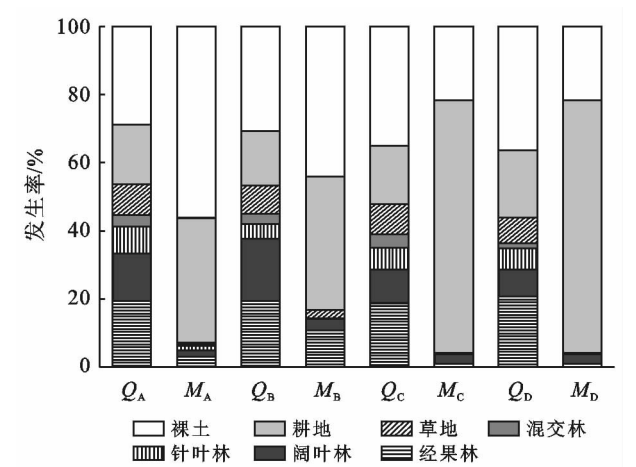
作为对照组的裸土产流总量位居第一,耕地和裸土的产沙量远高于其他植被覆盖类型。说明降雨后有植被覆盖的小区的植被根系或枯落物等能很好的涵养住雨水,减缓地表径流,并且很好的控制了水土流失。

在所有降雨事件中,经果林、阔叶林、针叶林、混交林、草地的产沙量明显低于耕地和裸土,产沙量分别是耕地的 18.1%,6.0%,0.6%,0.2%,3.5%;是裸土的 15.7%,5.2%,0.5%,0.2%,3.1%。阔叶林、针叶林、混交林、草地的产流量分别是耕地的 76.3%,30.4%,14.9%,45.4%;是裸土的 40.8%,16.3%,7.9%,24.3%,经果林的产流量是裸土的 57.2%,其产流量高于其他林地和耕地,但是产沙量远低于耕地和裸土。混交林表现出了极好的水土保持效果,在各降雨事件发生后,其坡面产流量和产沙量总量都处于较低的范围;经实地考察,该地混交

林主要种植杨树和墨西哥柏树,植被覆盖度大于 80%。

2.3 不同植被覆被与雨型总径流产沙发生率

在 4 种降雨类型中,用各土地利用类型的径流、产沙量与总量的比值表示不同植被覆被在总径流产沙所占的比率,表示其发生概率的大小,结果如图 2 所示, $Q$  代表径流深, $M$  代表产沙量,A,B,C,D 分别代表 4 种降雨类型。作为对照组的裸土、耕地产流量所占比例均居于高位;而有林地降雨产流量较小,植被调蓄降雨产流的效果也会日益显著,结果显示混交林调节径流的效果最好,其他林地均在不同程度上调节了地表径流。



注: $Q_A, Q_B, Q_C, Q_D$  分别代表 4 种降雨类型下径流占总径流的比例; $M_A, M_B, M_C, M_D$  分别代表 4 种降雨类型下产沙占总产沙量的比例。

图 2 喀斯特地区各降雨条件下不同植被产流、产沙发生率

由图 2 可知,裸土的产沙量在 A,B 型降雨条件下所占的比例最大,耕地在 C,D 型降雨条件下所占比例最大,对比在相同降雨条件下其他林地的产沙量,耕地和裸土降雨后的产沙量最多,相应的土壤侵蚀也最严重。并且如表 2 所示:除 C 雨型,其他雨型

条件下的坡面产流和产沙量的相关性达到显著性水平,A 雨型最高达到 0.95。 $Q_A$ (A 雨型下径流的发生率)情况下:除裸土外,经果林产流量排第二,第三为裸土;但是  $M_A$ (A 雨型下产沙量的发生率)中经果林的发生率占比很小,说明在 A 雨型下经果林水土保持效果最好,但是根据相关性分析以及各植被类型径流小区的产沙量的发生率,得出经果林在 B 雨型下的水土保持效果稍弱于在其他降雨类型。混交林和针叶林在  $M_B$ (B 雨型下产沙量的发生率), $M_C$ (C 雨型下产沙量的发生率), $M_D$ (D 雨型下产沙量的发生率)均为 0.1%,产沙量所占比例十分小。

表 2 喀斯特地区各降雨类型产流、产沙量相关性

参 数	降雨类型			
	A	B	C	D
产流、产沙量				
Person 相关性	0.954**	0.370**	0.176*	0.389**
显著性	0.000	0.000	0.024	0.000

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

2.4 降雨和植被对产流产沙的综合影响

为研究降雨及其产生的径流,以及植被和植被覆盖度等对该地区坡耕地产沙量的综合影响,在 4 类降雨类型下分析因变量(产沙量),与自变量(平均雨强、径流量以及植被覆盖度)的关系,结果如表 3 所示。

由表 3 可知,产沙量与雨强、径流深正相关,和植被覆盖度负相关,对产沙量的影响为:径流深>平均雨强>植被覆盖度。B 型降雨为强降雨,中等降雨量、短降雨历时的高频次降雨事件组成,此时坡面产流量与植被覆盖度对产沙量的影响相对增加,是 4 种降雨条件下影响最大的一类降雨。植被的存在能缓解降雨径流对坡面的产沙量,二者呈负相关,说明增加植被覆盖对防治坡耕地土壤侵蚀能起到积极的作用。并且喀斯特地区地势起伏较大,随着耕地坡度的增加,更需要重视农作物的田间管理<sup>[23]</sup>。

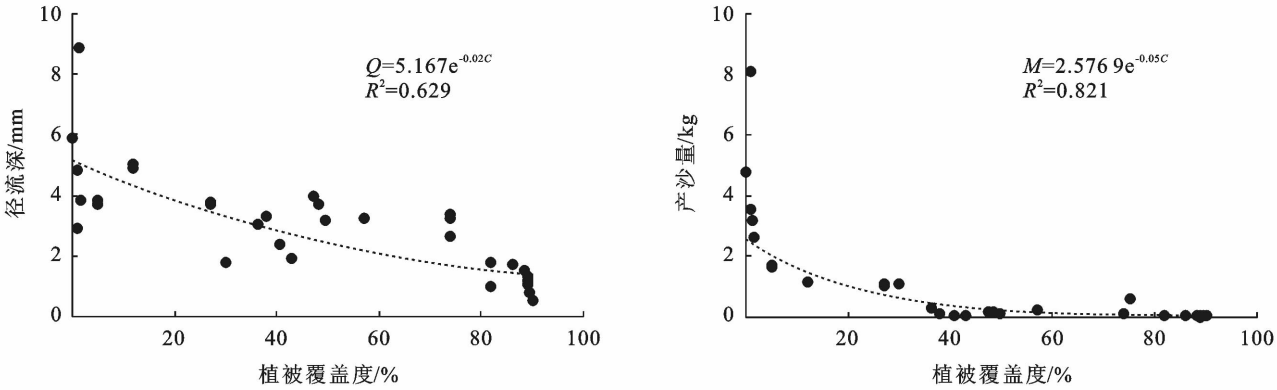
表 3 喀斯特地区产沙量与平均雨强、径流量、植被覆盖度的回归分析

降雨类型	回归模型	F	R <sup>2</sup>	sig.
A	$M=0.088 I+0.260 Q-0.011 C+7.700$	25.795	0.849	0.000
B	$M=0.075 I+0.561 Q-0.016 C+0.386$	28.252	0.399	0.000
C	$M=0.110 I+0.392 Q-0.006 C-0.476$	12.001	0.230	0.016
D	$M=0.061 I+0.494 Q-0.009 C+0.427$	13.053	0.405	0.000

注:公式中  $M$  为产沙量; $I$  为平均雨强; $Q$  为径流量; $C$  为植被覆盖度; $F$  为检验值;sig 为显著性,sig<0.05 在 0.05 水平显著,sig<0.01 在 0.01 水平显著。

对同一个径流小区而言,在地形、土壤条件一致的情况下,降雨后,植被对坡面产流产沙量的影响很大,造成差异的主要原因是植被类型以及植被覆盖度的多少。而植被覆盖度是地表植被生长的直观表现,

更是研究研究植被与土壤侵蚀的一个重要参数。由于降雨量和降雨强度是水土流失的最基本降雨特征,因此本次分析次降雨量与降雨强度明显偏大的数据未加入,结果如图 3—6 所示。



注:拟合方程中  $M$  为产沙量;  $Q$  为径流深;  $C$  为植被覆盖度。下同。

图 3 A 雨型径流、产沙量与植被覆盖度的关系

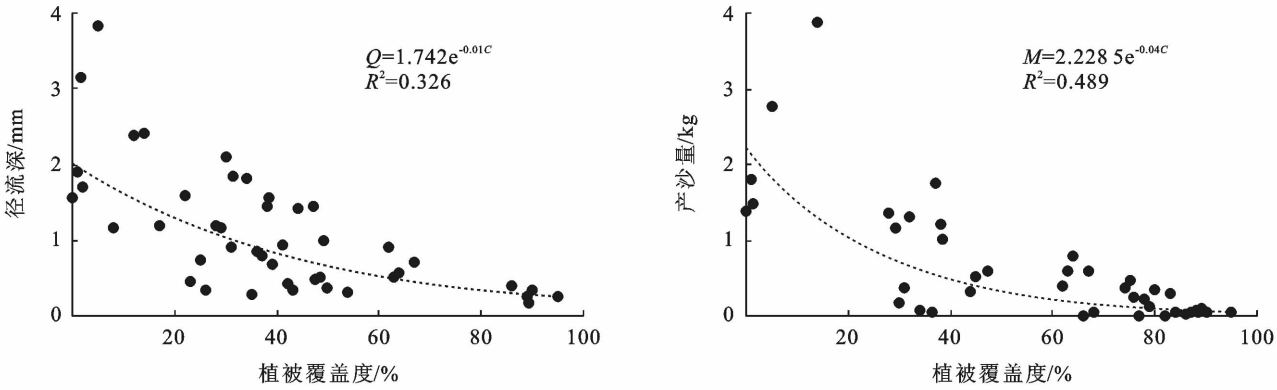


图 4 B 雨型径流、产沙量与植被覆盖度的关系

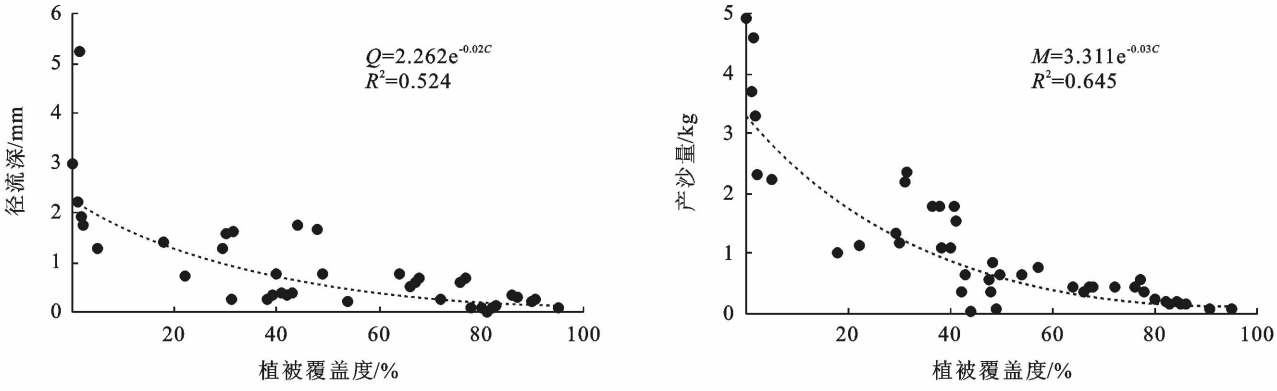


图 5 C 雨型径流、产沙量与植被覆盖度的关系

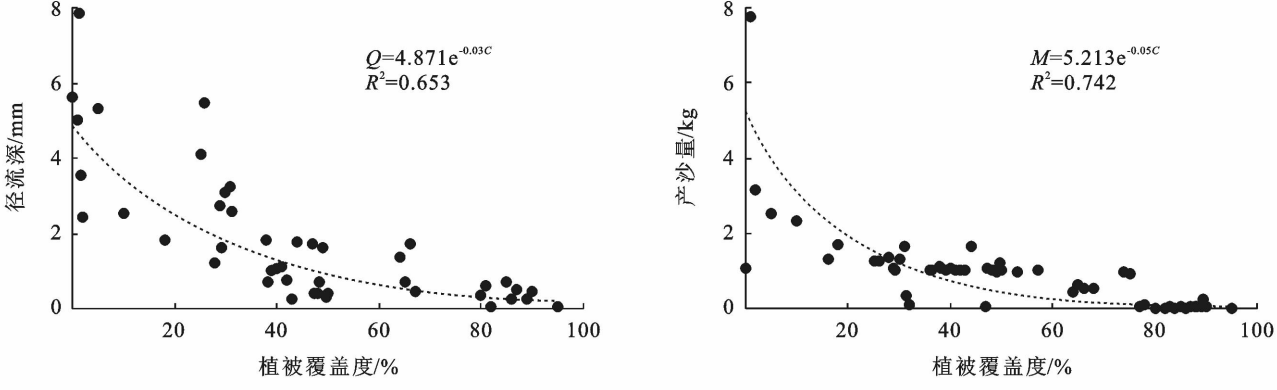


图 6 D 雨型径流、产沙量与植被覆盖度的关系

由图 3—6 可知径流、产沙量与植被覆盖度均呈负指数关系。其中产沙量与植被覆盖度的  $R^2$  值大于径流量与植被覆盖度的值,在 A 雨型下植被覆盖度和产沙的相关性最高  $R^2$  达到 0.82,D 雨型下植被覆盖度和径流深的相关性最高  $R^2=0.652$ ;说明坡面产沙量与植被覆盖度的关系更密切,在径流和产沙的过程中,植被覆盖度对坡面减沙起到的作用更强。并且,在各类降雨条件下,当植被覆盖度达到 80% 左右,A,C,D 雨型减沙的效果处于稳定的状态,B,C,D 雨型下植被覆盖度大于 80% 后其削减径流以及减沙处于较稳定状态。

### 3 讨论

A 型降雨对该地区土壤侵蚀的负面影响更大,更容易对该地区造成侵蚀性的伤害。在喀斯特地区即使是低频次的强降雨事件,也会对该地区土壤侵蚀造成比较大的影响。总体而言,该地区的降雨还是以 B 型为主,发生频次占总场次的 49.4%。表 2 结果显示,在极强雨强以及强降雨强的条件下,径流越大,产沙量就越大,这是由于该地区坡耕地以超渗产流为主,在雨强较强的情况下,同期的降水量大于同期植物截留量、填注量等,地表径流会增多,表层土壤的稳定性会遭到破坏<sup>[23-24]</sup>,所以在植被的选择时更需要注意植被的水源涵养能力。C 雨型下,产流产沙量的相关性最弱,说明雨型对该地区产流产沙的影响程度是不同的,不同的降雨条件对该区域的坡面土壤侵蚀情况的相关性也不同,但是它们之间的变化趋势及规律一致。混交林在所有次降雨类型中,坡面产流产沙量均处于较低水平,是因为其林分郁闭度高,地下根系发达,土壤的入渗能力强。而相比于其他径流小区,如耕地、裸土、经果林地,因需要定期去除一些杂草,导致表层土壤频繁受到扰动。相关研究表明,人工干扰较多的坡面植被组合土壤侵蚀模数较高,故产流输沙量较大,水土保持效果不佳<sup>[25]</sup>。根据小区田间管理操作,会对研究区进行培土、施肥、除草等操作,其中对耕地小区的土壤扰动深度最高达到 30 cm,裸土和经果林最高为 20 cm。所以,降雨后耕地因受人为扰动较大,产流产沙量比较大;裸土因为其作为对照组,几乎没有植被覆盖,并且会定期对其进行除草,因此固持土壤的效果不如林地,当外界对其进行农业活动时,更容易破坏土壤的稳定性,导致降雨后的产沙量更多;在经果林中,为了使果树吸收更多土壤的营养及光照等,需要定期对其土地进行管理,以保证果林的产量及质量,从而达到相应的经济效益,所以对这类土地造成的影响也比较大。

植被覆盖度与坡面产流产沙量为负指数相关,并且植被覆盖度与产沙量的相关系数比产流量的更大。说明随着植被覆盖度的增加,植被截留的部分降雨只占总降雨量的一小部分,场降雨总量受到的影响不大;随着植被的生长植被覆盖度会增加,此时植被的地下根系会随着植被的生长而增大,根系的量也会增多,使得土壤的入渗功能变强;植被覆盖增加,会使林冠截留雨量增加,加之地表枯落物对雨水的截留作用,从而会使植被减缓,拦截径流,涵养水源的能力大大提高,进而降低超渗产流,减少地表径流对泥沙的输送能力,因此植被覆盖度与产沙量的相关性比其与产流量相关程度更高,并且植被覆盖度越高,地表径流输送泥沙能力越弱,产沙量越少,二者呈负相关。

喀斯特地区土层薄,降雨后,土壤表层及其母质极易被冲刷、剥蚀,从而引发土壤侵蚀,进而导致水土流失,加剧石漠化问题的发生;所以应采取退耕还林、还草,封山育林,利用植被恢复来控制水土流失,以改善当地生态环境<sup>[26]</sup>。石漠化和土壤侵蚀一直是喀斯特地区最主要的生态问题,增加地面植被覆盖度是最基础的水土保持农业工程措施,培育适合于当地的植被类型是关键,不同的植被覆被以及覆盖度对土壤侵蚀的响应也有所不同。贵州省的土壤侵蚀多以水力侵蚀为主,防治土壤侵蚀关键需要结合其区域地理特征。而贵州省地形地貌特殊,典型的喀斯特地貌造成了脆弱的生态环境,并且当前通用的土壤侵蚀模型应用于喀斯特地区具有一定的局限性,不能真实地反映出贵州省喀斯特山区的土壤侵蚀情况。为构建属于该地区的土壤侵蚀参数,需要进行更深入的研究以获取更科学的依据和土壤侵蚀发生规律。本文重点分析讨论了降雨、植被类型、植被覆盖度和产流产沙之间的关系,对坡度、雨前(后)土壤含水量、以及具体的耕作措施等因子没有进行深入分析,今后应加强对这些因子的研究,更有利于总结出符合区域特点的产流产沙、土壤侵蚀、水土流失等规律,为完善该地区的土壤侵蚀研究提供更多理论基础。

### 4 结论

喀斯特地区山高坡陡、地形破碎,水土流失严重。贵州省是西南喀斯特地貌较为典型的代表省份之一,而使用长时间序列的坡面径流小区对该地区的研究较少,因此对该地区产流产沙规律开展相应的研究可以填补区域空白。本文通过长时间序列的坡面径流小区观测数据初步探明区域不同降雨和植被覆盖对黄壤坡面产流产沙的影响,进一步揭示其中的关系,进而调整土地利用结构。

(1) 该地区在划分降雨类型时,降雨量与雨强之间呈正相关。根据划分出的降雨类型分析得出,在 A 型降雨条件下(极强降雨,极大降雨量、中等降雨历时的低频次降雨事件),经果林表现出极好的水土保持效果,并且该林地 B 雨型下(强降雨,中等降雨量、短降雨历时的高频次降雨事件)的效果比在其他 3 种类型稍弱一些;该雨型下经果林地产流与产沙量的相关性显著。混交林和针叶林在 B、C(弱雨强,小降雨量,长降雨历时的低频次降雨事件),D(较强雨强,中等降雨量,中等降雨历时的频次降雨事件)降雨条件下的减流固沙能力更强。并且在各雨型条件下产流与产沙量显著正相关,所以在雨季采取适当的截留措施能使降雨入渗量增加,对减少该地区黄壤坡耕地产沙量具有一定的实践意义。

(2) 该地区主要的降雨类型为 B 型降雨,此时的产流产沙相关性不如 A 雨型。总体而言,结合不同植被和降雨类型条件下坡面产流和土壤侵蚀特征,以及不同植被覆被在各雨型总径流产沙发生率,在所有降雨事件下混交林的水土保持效果优于其他,坡面产流量和产沙量的值都较低。

(3) 坡耕地产流量、产沙量与植被覆盖度均呈负指数相关,坡面产沙量与植被覆盖度的关系更密切,植被覆盖度的增加对减弱地表径流的作用更强。因此地表覆盖度的增加是产沙量减少的基础条件,更是防治水土流失的关键因素。

**致谢:**感谢贵州省水土保持监测站提供的径流小区监测数据。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 马芊红,张科利.西南喀斯特地区土壤侵蚀研究进展与展望[J].地球科学进展,2018,33(11):1130-1141.
- [2] 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):157-159,175.
- [3] 刘刚才,高美荣,林三益,等.紫色土两种耕作制的产流产沙过程与水土流失观测准确性分析[J].水土保持学报,2002,16(4):108-111.
- [4] 高美荣,刘刚才,朱波.四川紫色土丘陵区不同耕作制的产流过程初步分析[J].水土保持学报,2000,14(5):118-121.
- [5] 邵永昌.安徽大别山区典型流域降雨径流产沙规律研究[D].南京:南京林业大学,2016.
- [6] 陈世发.基于 GIS 的亚热带山地土地利用与土壤侵蚀关系研究:以粤北山区为例[J].干旱区资源与环境,2015,29(2):80-85.
- [7] 张一澜,文安邦,严冬春,等.赤水河流域不同土地利用类型土壤侵蚀的  $^{137}\text{Cs}$  法研究[J].地球与环境,2014,42(2):187-192.
- [8] 袁再健,蔡强国,秦杰,等.鹤鸣观小流域不同土地利用方式的产流产沙特征[J].资源科学,2006,28(1):70-74.
- [9] 李成志,连晋蛟,陈洪松,等.喀斯特地区县域土壤侵蚀估算及其对土地利用变化的响应[J].中国水土保持科学,2017,15(5):39-47.
- [10] 方怒放.小流域降雨—径流—产沙关系及水土保持措施响应[D].武汉:华中农业大学,2012.
- [11] 彭旭东,戴全厚,杨智,等.喀斯特山地石漠化过程中地表地下侵蚀产沙特征[J].土壤学报,2016,53(5):1237-1248.
- [12] 付兴涛,张丽萍,叶碎高,等.经济林地坡长对侵蚀产流动态过程影响的模拟试验研究[J].水土保持学报,2009,23(5):5-9.
- [13] 张文源.贵州喀斯特黄壤坡面降雨侵蚀特征研究[D].北京:北京林业大学,2015.
- [14] 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.
- [15] 陈伟,魏永霞,王存国,等.不同水土保持技术模式的坡耕地产流、产沙特征[J].水土保持学报,2011,25(6):27-30.
- [16] 张文安,徐大地,刘友云,等.黔中黄壤丘陵旱坡地不同耕作栽培技术对水土流失及作物产量的影响[J].贵州农业科学,2000,28(6):18-21.
- [17] 纪启芳.贵州喀斯特地区坡面不同植被的减流减沙作用[D].南京:南京大学,2013.
- [18] 代数,蒋光毅,夏清,等.坡度和雨强对重庆市黄壤旱坡地产流产沙特征的影响[J].水土保持学报,2011,25(4):1-5,11.
- [19] 王小博,朱永清,吴宜进,等.不同植被下降雨类型对红壤坡地土壤侵蚀特征的影响[J].水土保持研究,2017,24(2):6-11.
- [20] 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.
- [21] 杨青,杨广斌,戴丽,等.喀斯特地区石漠化与土壤类型的空间相关分析:以贵州省为例[J].中国岩溶,2019,38(1):80-87.
- [22] Wei Wei, Chen Liding, Fu Bojie, et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China[J]. Journal of Hydrology, 2007,335(3/4):247-258.
- [23] 肖继兵,孙占祥,刘志,等.降雨侵蚀因子和植被类型及覆盖度对坡耕地土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2017,33(22):159-166.
- [24] 李广,黄高宝.雨强和土地利用方式对黄土丘陵区水土流失的影响[J].农业工程学报,2009,25(11):85-90.
- [25] 陈利顶,贾福岩,汪亚峰.黄土丘陵区坡面形态和植被组合的土壤侵蚀效应研究[J].地理科学,2015,35(9):1176-1182.
- [26] 梅再美,熊康宁.喀斯特地区水土流失动态特征及生态效益评价:以贵州清镇退耕还林(草)示范区为例[J].中国岩溶,2003,22(2):136-143.