

黔西喀斯特区秸秆覆盖对坡耕地产流产沙特征的响应

盘礼东^{1,2}, 李瑞^{1,2}, 黎庆贵^{1,2}, 黄凯^{1,2}, 张琳卿^{1,2}

(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)

摘要: 基于 2018—2019 年野外径流小区定位观测资料,以玉米单作无秸秆覆盖处理(M_0)为对照,探索了玉米单作处理和不同秸秆覆盖量($M_1 \sim M_5$, 1 111, 2 222, 3 889, 5 556, 6 944 kg/hm²)对贵州省黔西喀斯特区坡耕地产流产沙特征的影响。结果表明:(1)不同降雨等级下,秸秆覆盖具有较好的水土保持效果,并随覆盖量的增加,产流、产沙总量逐渐减少,但 M_4 与 M_5 处理之间无显著差异($p > 0.05$);(2)玉米苗期—拔节期各处理产流和产沙量大于后 2 个阶段,并且各阶段各覆盖处理产流产沙均低于对照;(3)秸秆覆盖对地表产流产沙影响显著,与对照相比,年均径流深减少 21.85%~50.46%,土壤侵蚀模数减少 50.10%~85.87%;(4)随着秸秆覆盖量的增加,各处理产流、产沙呈下降趋势,但当秸秆覆盖量超过 5 556 kg/hm² 后,继续增加秸秆至 6 944 kg/hm² 时,水土保持效果变化不明显。秸秆覆盖是控制喀斯特地区坡耕地水土流失的有效途径,6 000 kg/hm² 左右的覆盖量即可起到较好的水土保持效果。

关键词: 水土流失; 土壤侵蚀; 秸秆覆盖; 农艺措施; 喀斯特地区

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)01-0009-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.01.002

Effects of Straw Mulching on Runoff and Sediment Characteristics of Sloping Farmland in the Karst Area of Western Guizhou

PAN Lidong^{1,2}, LI Rui^{1,2}, LI Qinggui^{1,2}, HUANG Kai^{1,2}, ZHANG Linqing^{1,2}

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

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

Abstract: Based on the location observation data of the wild outflow plots from 2018 to 2019, taking the corn monoculture treatment without straw mulch (M_0) as the control, this study was aimed to explore the effects of maize monocropping treatment and different straw coverage ($M_1 \sim M_5$, 1 111, 2 222, 3 889, 5 556, 6 944 kg/hm²) on runoff and sediment yield characteristics of sloping farmland in the karst area of Guizhou Province. The results showed that: (1) Under different rainfall levels, straw mulching had better soil and water conservation effect, and with the increase of mulching amount, the total runoff and sediment yield decreased gradually, but there was no significant difference between M_4 and M_5 treatments ($p > 0.05$); (2) The runoff and sediment yield of each treatment from seedling stage to jointing stage were greater than those of the latter two stages, and the runoff and sediment yield of each mulching treatment in each stage were lower than that of the control; (3) Compared with the control, the annual average runoff depth decreased by 21.85%~50.46%, and soil erosion modulus decreased by 50.10%~85.87%; (4) As the amount of straw mulching and the amount of straw buried in the soil increased, the runoff and sand production of each treatment showed a downward trend. However, when the straw mulching amount exceeded 5 556 kg/hm² and continued to increase to 6 944 kg/hm², the soil and water conservation did not change significantly. Straw mulching was an effective way to control soil and water loss of sloping farmland in karst area, and the coverage amount of about 6 000 kg/hm² was recommended in the soil and water conservation.

Keywords: soil and water loss; soil erosion; straw mulch; agronomic measures; karst area

收稿日期:2020-07-31

资助项目:国家自然科学基金项目(31760243);贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2019]2847号,黔科合基础[2018]1112号);贵州省水利厅科研项目(KT201806)

第一作者:盘礼东(1995—),男,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:948678723@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

中国西南喀斯特地区山地丘陵连片分布,山高坡陡,碳酸盐岩裸露面积大,石漠化广布,土层稀薄,降雨较多且集中;同时坡耕地比重大,以立体农业开发模式为主,采用传统的翻耕、无覆盖耕作方式,由此导致坡耕地出现严重的水土流失^[1]。受地质背景、气候条件及人类活动等因素的综合影响,目前西南喀斯特区坡耕地水土流失面积 7.22 万 km²,占西南喀斯特水土流失面积的 35.4%^[2],其中,贵州省 90% 的泥沙流失来源于坡耕地^[3],可见坡耕地仍是区域主要的水土流失策源地。水土流失成为了喀斯特区农业、生态可持续发展的瓶颈,严重制约了区域可持续发展。

为缓解水土流失问题,一系列防治土壤侵蚀的试验研究相继开展,秸秆覆盖还田等农艺措施已成为典型的保护性耕作措施。相关研究^[4-7]表明,秸秆覆盖能够截留部分降雨,增加雨水的下渗量,从而减少地表径流总量、降低流速,并延迟了地表径流的形成时间。与此同时,秸秆覆盖能够减少降雨对地表的直接冲刷和侵蚀,有效降低了土壤侵蚀风险^[8-9]。

近年来,国内外关于秸秆覆盖还田措施用以防治水土流失的报道较多^[10-13],我国有关秸秆还田覆盖措施的研究主要集中在黄土高原^[14-15]和东北黑土区^[16-17],类似的试验研究在我国四川紫色土区^[7,18]和南方红壤区^[19]等非喀斯特地区亦有报道,但有关西南喀斯特地区秸秆覆盖阻控水土流失相关试验和实践则鲜见报道,并且其土壤侵蚀显著不同于其他类型区^[20]。因此,西南喀斯特区秸秆覆盖措施防控水土流失效果方面的研究亟待进一步深入,以弥补区域相关试验的不足。鉴于此,本文基于野外径流小区定位观测试验,研究天然降雨条件下典型喀斯特区玉米生长期秸秆覆盖对坡耕地产流产沙特征的影响,揭示区域秸秆覆盖条件下坡耕地土壤侵蚀特征机理,探明秸秆覆盖措施水土流失调控效应,以期对西南喀斯特区坡面水土流失防治、耕地质量保护和农业可持续发展等方面提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黔西示范区位于贵州省毕节市黔西县金兰镇(105°47′—106°27′E,26°46′—27°21′N),平均海拔 1 250 m,为典型的石漠化坡耕地农业种植区,主要种植玉米、水稻、豆类等作物。研究区属亚热带湿润季风气候,类型多样,四季分明,多年平均气温为 14.2℃,1 月最冷(平均气温 3.3℃),7 月最热(平均气温 23℃),全年日照时间 1 066.9 h,无霜期 270 天左右;年降水量 1 087.05 mm,年际变化大且时空分布不均

匀,地势低洼河谷地区降雨相对偏多,降水主要集中在 6—9 月。在黔西喀斯特区坡耕地种植玉米前期,当地农民普遍会对土地进行翻耕,并在作物生长期定期进行人工除草,对地表扰动较大;在作物收获的季节,玉米秸秆普遍当作家畜饲料,部分被燃烧后作为肥料还田,基本不覆盖还田。黔西示范区石漠化灌丛及林地以微度侵蚀为主,坡耕地、建筑用地及人为扰动较大的地区以轻中度侵蚀为主,少部分耕地因严重的土壤侵蚀无法耕作而弃耕。研究区土壤类型以黄壤为主,土壤颗粒组成以黏粒和砂粒为主,粉粒占比较少,土壤 pH 在 7.01~7.89,土壤有机质含量主要集中在 10~25 g/kg。现有植被类型为亚热带常绿落叶针阔混交林,针叶林主要树种有马尾松(*Pinus massoniana*)、云南松(*Pinus yunnanensis*)、杉科(*Taxodiaceae*)等,阔叶林主要有栎类(*Quercus acutissima*)、白杨(*Populus tomentosa* Carr)、泡桐(*Paulownia fortunei*)等。

1.2 试验设计及观测方法

1.2.1 野外试验设计 本试验于 2018 年 5 月至 2019 年 10 月玉米生长期进行,采用径流小区野外定位观测法,小区规格为 3 m(宽)×12 m(长)。共设置 6 个秸秆覆盖径流小区(含对照),坡度均为 15°,小区内种植玉米,种植规格大致与当地相同,为 0.7 m(丛距)×0.8 m(行距),即每个小区种植玉米 50 丛左右,每丛 2 株。参考刘柳松等^[21]的方法确定研究区的秸秆覆盖量,设计覆盖率为 15%,30%,60%,75%,90%,相应的秸秆覆盖量分别为 1 111,2 222,3 889,5 556,6 944 kg/hm²。以无覆盖传统玉米单作小区(M₀)为对照,5 个秸秆覆盖小区分别以 M₁、M₂、M₃、M₄、M₅ 表示,共 6 个不同覆盖处理。秸秆就地取材,采用玉米秸秆晒干后切割至 3 cm 左右均匀覆盖在小区内(第 1 年秸秆覆盖于表土层,次年在种植前将前 1 年秸秆翻耕混入耕作层,继续覆盖与前 1 年相同的秸秆覆盖量,即秸秆覆盖量为当年覆盖量)。玉米种植时间为 4—5 月,玉米生长期一次性施用化肥(各小区施用量一致),并定期进行人工除草。

1.2.2 观测方法 小区的观测内容主要包括降雨、产流及产沙等。降雨自记雨量计记录,人工雨量计校核。次降雨产流结束后,及时进行径流泥沙的观测和取样工作。产流量直接采用水尺量测集流池或分流池水位,根据水位测算径流小区的次产流量;产沙量包括 2 部分:一部分为集流池或分流池浑水泥沙含量;另一部分为集沙槽中沉积的泥沙。对集沙槽中的泥沙而言,直接收集后烘干称重即可,浑水泥沙含量则采用泥沙含量仪及烘干法相结合测量,将集(分)流

池中浑水充分搅拌均匀后取 500 mL 浑水样,现场采用泥沙含量仪量测泥沙含量,再带回实验室用烘干法对浑水样品泥沙含量进行测定(包括过滤、烘干、称重等步骤),2 种方法相结合使用,相互校正。测定浑水样品泥沙含量后,再根据样品占次降雨产流量的比例推算浑水中泥沙总量。集沙槽泥沙量加上浑水泥沙含量即为次降雨产沙量。每次观测、取样等工作结束后对集沙槽和集(分)流池进行清理。

通过对降雨、产流及产沙等观测,计算径流深、土壤侵蚀模数及降雨侵蚀力等指标,其中降雨侵蚀力计算公式^[22]为:

$$R=0.017\times P\times I_{30}-0.136(I_{30}<10\text{ mm/h})$$
$$R=0.0235\times P\times I_{30}-0.523(I_{30}\geqslant10\text{ mm/h})$$

(1)

式中: R 为降雨侵蚀力(mm^2/h); P 为降雨量(mm); I_{30} 为最大 30 min 降雨强度(mm/h)。

1.2.3 数据处理及分析方法 采用 SPSS 24.0 软件对数据进行分析处理,其中差异显著性采用 LSD (Least signification difference test) 进行样本检验;

表 1 径流小区降雨情况

降雨等级	降雨量/ mm	降雨 场次/场	降雨场次 占比/%	平均 降雨量/mm	$I_{30}/$ ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	降雨侵蚀力/ ($\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)
小雨	$P<10$	8	22.2	6.075	12.355	1.228
中雨	$10\leqslant P<25$	18	50.0	17.178	16.523	5.953
大雨	$25\leqslant P<50$	7	19.4	26.143	23.096	13.646
暴雨	$50\leqslant P<100$	3	8.3	55.333	37.237	48.242
大暴雨	$P\geqslant100$	—	—	—	—	—

注: I_{30} 和降雨侵蚀力的值为平均值。

2.2 次降雨条件下坡耕地产流产沙特征分析

降雨是造成喀斯特坡耕地水土流失的重要因素之一,表 2 为不同降雨等级对坡耕地产流产沙的影响。由表 2 可知,不同降雨等级下,各覆盖处理径流深整体表现出随着覆盖量的增加而减少,即 $M_0>M_1>M_2>M_3>M_4>M_5$ 。秸秆覆盖不同程度地减小了径流小区的径流深,各降雨等级下的 $M_1\sim M_5$ 较 M_0 相比,径流深分别减少了 16.78%~55.70%,4.85%~47.53%,34.13%~50.88%,28.47%~51.71%。不同降雨等级下,覆盖措施减流效果存在较大差异。小雨等级下, M_1 、 M_2 与 M_0 之间差异不显著($p>0.05$), $M_3\sim M_5$ 覆盖条件下坡面产流显著低于 M_0 ($p<0.05$);中雨等级下, M_1 与 M_0 差异不显著, $M_2\sim M_5$ 处理坡面产流则显著低于 M_0 ;大雨和暴雨条件下,各覆盖处理坡面产流均显著低于对照($p<0.05$),同时各覆盖处理之间存在一定的差异。总体而言,不同降雨条件下, M_4 和 M_5 处理均显著低于 M_0 ($p<0.05$),但两者之间无显著差异($p>0.05$)。

运用 Origin 2018 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 研究区降雨特征分析

2018 年和 2019 年玉米生长期间共统计侵蚀性降雨 36 次,其中 2018 年 16 场,2019 年 20 场,36 场侵蚀性降雨总降雨量达 706.8 mm。按照气象学划分 5 个降雨等级^[23],即小雨($P<10\text{ mm}$)、中雨($10\leqslant P<25\text{ mm}$)、大雨($25\leqslant P<50\text{ mm}$)、暴雨($50\leqslant P<100\text{ mm}$)、大暴雨($P\geqslant100\text{ mm}$)。其中小雨 8 场,占总降雨次数的 22.2%,平均降雨量为 6.075 mm;中雨 18 场,占总降雨次数的 50%,平均降雨量为 17.178 mm;大雨 7 场,占总降雨次数的 19.4%,平均降雨量为 26.143 mm;暴雨 3 场,占总降雨次数的 8.3%,平均降雨量为 55.333 mm(表 1)。可以看出,黔西示范区降雨主要以中雨为主;同时还可以看出,小雨条件下最大 30 min 降雨强度是最小的,并随降雨等级的增大而增大;从降雨侵蚀力指标看,暴雨的侵蚀力最强,大雨、中雨次之,小雨的侵蚀力最小,即随着降雨量的增大,降雨侵蚀力随之增大。

由表 2 可知,在 4 种天然降雨等级下,随着秸秆覆盖量的增加,各处理产沙总量呈递减趋势,即 $M_0>M_1>M_2>M_3>M_4>M_5$ 。可以看出,与对照(M_0)相比,4 种天然降雨等级下, $M_1\sim M_5$ 产沙量分别减少了 12.41%~65.27%,18.45%~77.50%,16.11%~87.71%,63.38%~88.60%。同时还可以发现,各处理产沙量在中雨和暴雨等级下要比小雨和大雨等级下大,各处理的产沙量总体表现出暴雨>中雨>大雨>小雨。显著性检验表明, $M_1\sim M_5$ 5 个秸秆覆盖处理小区产沙量均显著低于对照($p<0.05$),尤其是 M_4 和 M_5 ,减沙效果较其他覆盖处理更为显著,但两者之间并无显著差异($p>0.05$)。显然,在不同降雨等级下,秸秆覆盖极大地降低了坡耕地土壤侵蚀风险。

降雨和秸秆覆盖两者对地表径流和产沙具有重要影响,一个充当动能作用,一个充当缓冲介质。对于对照而言,在没有秸秆覆盖条件下,降雨直接冲刷地表,特别是在中、大、暴雨情况下,易形成径流和细沟,导致小区径流和产沙量均较秸秆覆盖小区多;而对于覆盖而

言,覆盖少量的秸秆(M₁)也可起到一定的减流、减沙作用,并随着秸秆覆盖量的增加,降雨对地面的溅蚀减弱。

表 2 2018—2019 年不同降雨等级下各处理产流产沙特征

处理	径流深/mm				产沙量/(t·km ⁻²)			
	小雨	中雨	大雨	暴雨	小雨	中雨	大雨	暴雨
M ₀	4.47±0.05 ^a	28.19±0.80 ^a	18.81±1.10 ^a	40.88±0.67 ^a	88.43±2.97 ^a	1116.67±2.48 ^a	364.28±4.83 ^a	3844.29±3.33 ^a
M ₁	3.72±0.51 ^{ab}	26.82±0.80 ^a	12.39±1.22 ^b	29.24±2.73 ^b	77.45±3.76 ^b	910.63±4.92 ^b	305.58±3.99 ^b	1407.91±2.99 ^b
M ₂	3.62±0.80 ^{ab}	20.26±0.99 ^b	11.13±0.73 ^b	27.21±1.52 ^b	74.69±4.66 ^b	589.48±4.12 ^c	130.24±4.03 ^c	905.70±4.82 ^c
M ₃	3.40±0.66 ^b	18.65±1.14 ^c	11.10±0.94 ^b	26.86±1.13 ^b	66.37±3.86 ^c	394.74±5.38 ^d	124.37±3.06 ^c	833.17±7.11 ^d
M ₄	2.00±0.53 ^c	15.01±0.41 ^d	9.51±0.50 ^c	20.72±1.26 ^b	34.38±3.79 ^d	256.18±3.04 ^e	46.21±4.13 ^d	440.73±3.58 ^e
M ₅	1.98±0.56 ^c	14.79±0.55 ^d	9.24±0.57 ^c	19.74±0.27 ^b	30.71±3.36 ^d	251.25±2.88 ^e	44.75±3.07 ^d	438.23±2.62 ^e

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

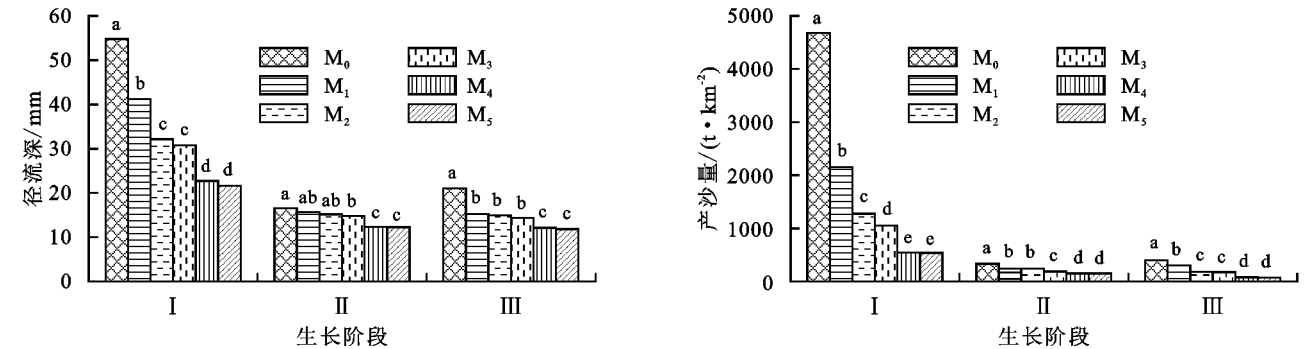
2.3 作物不同生长阶段与坡耕地产流产沙的响应

贵州玉米生长期一般在 120 天左右^[24],本研究将其全生育期划分为 3 个阶段,即苗期—拔节期(Ⅰ)、拔节期—抽雄期(Ⅱ)、抽雄期—成熟期(Ⅲ)^[25-26],并对玉米各生长期进行了地面覆盖度测算,其中Ⅰ阶段覆盖度为 0~33%,Ⅱ阶段为 33%~91%,Ⅲ阶段为 82%~91%,研究秸秆覆盖措施下作物不同生长阶段对水土的保持效果。

由图 1 可知,随着玉米生长期的推进,无覆盖玉米单作小区产流在拔节期—抽雄期最小,抽雄期—成熟期产流有所增加;各覆盖处理产流则呈下降趋势,尤其是Ⅱ、Ⅲ阶段,产流明显低于Ⅰ阶段。同时可以看出,秸秆覆盖量对各阶段产流的影响具有相似的规律,即径流深随着秸秆覆盖量的增加而减少,但并不是直线下降。在玉米的生长过程中,特别是在Ⅰ、Ⅲ阶段,各覆盖处理的产流量显著低于对照($p<0.05$);各阶段 M₄、M₅处理与对照相比,差异更为明显,但两者之间无明显差异($p>0.05$)。

各覆盖处理产沙总量均随着玉米生长期的推进而减少,即Ⅰ>Ⅱ>Ⅲ,而玉米单作小区产沙量大小顺序为Ⅰ>Ⅲ>Ⅱ;不同覆盖量下各生长阶段均存在一定的差异,在玉米整个生长过程中,各覆盖处理的产沙量均显著低于无覆盖处理小区($p<0.05$),尤其是 M₄和 M₅处理,减沙效果更为明显,土壤侵蚀防控效果较好,但两者之间无显著差异($p>0.05$);另外,从玉米生长的Ⅱ、Ⅲ阶段可以看出,黔西喀斯特区秸秆覆盖和玉米冠层同时存在对坡耕地土壤侵蚀的防控效果显著高于玉米单作覆盖。综上可知,秸秆覆盖对土壤侵蚀具有较好的防治作用,且不同覆盖量的减沙效果存在一定的差异。

地表径流和土壤侵蚀与玉米不同生长期的冠层覆盖度关系密切。从玉米各生长期的覆盖度看,Ⅰ阶段的作物覆盖度最小,各处理产流产沙在 3 个阶段中最多;就对照而言,地表径流和土壤侵蚀量并不是随着玉米生长期的推进而减少,而是呈先减后增的趋势;对于覆盖处理而言,总体呈现出递减趋势。



注:图中数据为 2018 年和 2019 年相同阶段的总和;2018 年Ⅰ阶段(6 月 5 日至 7 月 15 日)、Ⅱ阶段(7 月 16 日至 9 月 1 日)、Ⅲ阶段(9 月 2 日至 10 月 30 日);2019 年Ⅰ阶段(5 月 8 日至 6 月 12 日)、Ⅱ阶段(6 月 13 日至 7 月 21 日)、Ⅲ阶段(7 月 22 日至 9 月 20 日);同一阶段不同小写字母表示不同处理差异显著($p<0.05$)。

图 1 2018—2019 年作物不同生长阶段产流产沙情况

2.4 不同秸秆覆盖量对坡耕地水土流失的响应

表 3 为 2018—2019 年各处理 2 年的年均径流深和土壤侵蚀模数。同等施肥、管理条件下,6 个不同处理的年均径流深大小顺序依次为 M₅<M₄<M₃<M₂<M₁<M₀,M₁~M₅ 分别较 M₀ 降低了 21.85%,32.62%,35.01%,48.85%,50.46%,M₄和 M₅减流效果较为明显

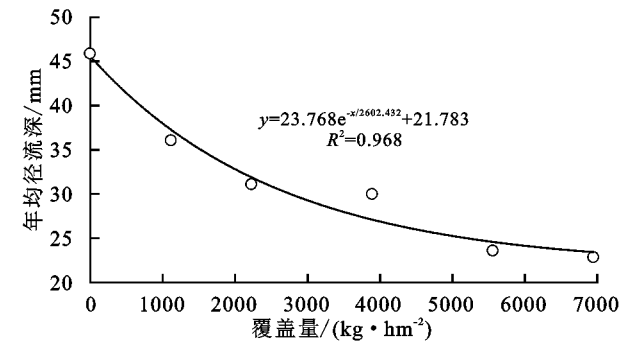
($p<0.05$),但两者之间无显著差异($p>0.05$)。

产沙量是衡量土壤侵蚀强弱的一个重要指标,从土壤侵蚀模数看,各处理产沙大小顺序为 M₅<M₄<M₃<M₂<M₁<M₀,各覆盖处理的产沙量均显著低于无覆盖处理($p<0.05$),5 个覆盖处理分别比无覆盖处理的产沙量降低了 50.10%,68.60%,73.79%,

85.64%,85.87%,其中 M_4 和 M_5 减沙量较多且效果较为明显($p<0.05$),但其差异性不显著($p>0.05$)。

综上,这 5 种覆盖处理均可有效减少水土流失,效果由大到小依次为 $M_5>M_4>M_3>M_2>M_1$, M_4 和 M_5 处理产流、产沙较小,控制土壤侵蚀作用明显,保持水土效果较好,但两者之间无显著差异。

为进一步探明不同秸秆覆盖率(量)与坡耕地水土流失的关系,进行线性、二次函数、指数函数拟合分析发现,指数函数最符合秸秆覆盖量与水土流失的关系。由图 2 可知,秸秆覆盖量与年均径流深的 R^2 为 0.968,秸秆覆盖量与土壤侵蚀模数的 R^2 为 0.990,拟合效果均较好,可较好地反映黔西喀斯特地区不同秸



秆覆盖量与坡面产流、产沙特征的关系。可以看出,随着秸秆覆盖率(量)的增加,坡面产流产沙呈降低趋势,但并非直线下降趋势。

表 3 2018—2019 年各径流小区年均径流深及土壤侵蚀模数

处理	年均径流深/mm	土壤侵蚀模数/($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)
M_0	46.18 ± 0.52^a	2707.15 ± 3.27^a
M_1	36.09 ± 1.82^b	1350.78 ± 4.84^b
M_2	31.11 ± 1.03^c	850.06 ± 3.95^c
M_3	30.01 ± 1.69^c	709.49 ± 9.44^d
M_4	23.62 ± 1.35^d	388.75 ± 3.16^e
M_5	22.88 ± 0.90^d	382.47 ± 5.95^e

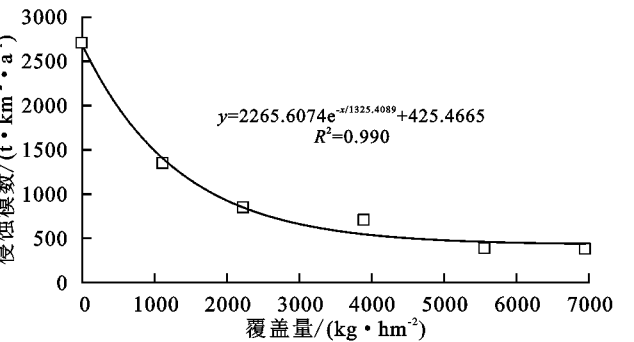


图 2 秸秆覆盖量与年均径流深、土壤侵蚀模数的指数关系

3 讨论

3.1 基于水土保持的黔西喀斯特区适宜秸秆覆盖量

近年来,秸秆覆盖调控坡面水土流失的有效性得到了较广泛的认同^[9,27-28]。本研究中,秸秆覆盖措施在黔西喀斯特地区同样具有较好的水土保持功能,可减少坡耕地地表径流和土壤侵蚀,对土壤具有一定的保护作用,与白怡婧等^[29]在贵州喀斯特区的研究结果一致。从本研究实践来看,基于不同降雨等级和不同作物生长阶段,当覆盖量达到 5 556 kg/hm²时,减流、减沙效果显著($p<0.05$),但当秸秆覆盖量继续增加至 6 944 kg/hm²时,减流、减沙效果与 M_4 无显著差异($p>0.05$),这表明 5 556~6 944 kg/hm²的秸秆覆盖量范围水土保持效果较为理想;结合拟合效果来看,当秸秆覆盖量为 6 000 kg/hm²左右时,水土保持效果较好。这与 Li 等^[30]的研究结果相近,其研究结果建议在农业耕作地区以 6 000~8 000 kg/hm²的秸秆覆盖量作为适宜的参考施用量。可见,在坡耕地水土流失防治实践中,并不是秸秆覆盖量越大越好。原因主要有:(1)秸秆覆盖量过大,覆盖厚度也随着增加,部分幼苗因无法冲破覆盖的秸秆而产生黄苗的情况,影响作物的出苗率,有的幼苗虽然能冲破覆盖的秸秆,但其出苗时间有所延迟,这可能会影响玉米的生长发育^[31-32];(2)秸秆覆盖量过多,虽然对杂草的生长具有抑制作用^[33],但杂草根部的固土作用和枝叶对雨水的截留效果则有

所减弱;(3)当降雨量较小时,覆盖量过多的小区秸秆会把雨水完全截留,从而使土壤水分减少,影响作物对水分的吸收;(4)考虑到覆盖秸秆在耕地里会发生复杂的化学反应,可导致病虫害的发生^[32],秸秆覆盖量越多,反而使作物减产^[34];(5)另有研究^[35]表明,在极端天气下,秸秆覆盖量过高,更容易导致水土的流失;(6)考虑到经济因素,覆盖率越高,意味着越高的人力物力支出。因此,生产实践中,秸秆覆盖量并非越高越好。本研究表明,基于坡耕地土壤侵蚀防控效应,6 000 kg/hm²左右的覆盖量即可。

适当的秸秆覆盖量可有效减少坡面土壤侵蚀,但往往会因地制宜,喀斯特区与非喀斯特地区存在一定的差异。从检索到的国内文献(表 4)发现,喀斯特区保持水土的适宜秸秆覆盖量低于东北黑土区及云南的非喀斯特区,高于黄土高原、华北地区和南方红壤区。东北地区覆盖较多的秸秆不仅仅是防止降雨对地表的冲刷,另一个重要的原因是在作物出苗之前,秸秆往往容易被风吹走,因此要覆盖较多的秸秆以减轻风力对地表的侵蚀和减少沙尘暴的发生^[36-37]。云南农业大学试验点降雨侵蚀力以大雨和暴雨为主^[38],而本研究区域降雨主要以中雨为主,加之小麦秸秆与玉米秸秆对雨水的截留存在差异,因此其秸秆覆盖量有所差异。黄土高原与西南喀斯特区水土流失都十分严重,相关研究^[39]表明,西南喀斯特区土壤

侵蚀小于黄土高原地区,但由于西南喀斯特区土层薄,侵蚀程度十分严重,有的地区甚至已经到了无土可侵的程度^[40],再加上喀斯特区水土流失呈“二元结构”特征,地表流失与地下漏失并存^[41],地区之间存在差异,因此秸秆的覆盖量也有所差异。本研究基于水土保持功能的适宜覆盖量高于华北地区的原因可能是因为不同土壤质地条件下秸秆覆盖效益存在差异所造成,华北地区提出的参考覆盖量主要是针对沙漠土种植区,另外可能是由于研究区域年降雨量高于华北地区的原因所导致^[27]。相关研究^[21]认为,在南方红壤区覆盖 30%(1 900 kg/hm²)可起到较为经济

的水土保持效果,低于本研究区域的原因可能与试验条件、种植作物及前期土壤含水率的不同有关。

从国外研究结果看,不同地区所建议的适宜秸秆覆盖量也不同。一方面可能与研究区域及其地质结构、土壤类型、气候等方面的差异有关,特别是纬度相差较大的区域,气候差异较大;另一方面,可能与覆盖材料、覆盖时长等因素有关;再者,与试验方法也有很大关系,野外天然降雨试验与人工模拟降雨试验下的产流产沙存在差异,进而导致覆盖率的不同。总而言之,适宜的秸秆覆盖量要结合多方面因素考虑,依据区域的实际情况而定。

表 4 本研究与其他地区建议的秸秆覆盖率参考值比较

地区	方法	种植作物	覆盖材料	建议覆盖量/ (kg·hm ⁻²)	文献来源
黔西喀斯特区	野外径流小区观测法	玉米	玉米秸秆	6000 左右	本研究
黄土高原地区	室内人工模拟降雨	小麦	小麦秸秆	5000	[6,9]
东北黑土地区	野外原位人工模拟降雨试验	玉米	玉米秸秆	20000~40000	[17]
云南农业大学	室内人工模拟降雨	烤烟	小麦秸秆	7500	[42]
华北地区	室内土槽模拟试验	玉米	玉米秸秆	1400~3100	[27]
南方红壤区	野外人工模拟降雨试验	花生	花生秸秆	1900	[21]
美国	人工模拟降雨	—	小麦秸秆	8000	[43]
美国	野外试验	—	小麦秸秆	2200	[44]
墨西哥	自然降雨	—	玉米秸秆	1500~4500	[45]
西班牙	人工模拟降雨	—	小麦秸秆	5000	[46]
葡萄牙	人工模拟降雨	—	稻草秸秆	4000	[47]
南非	自然降雨	—	稻草秸秆	5000	[48]
伊朗	人工模拟降雨	—	稻草秸秆	5000	[49-50]

3.2 侵蚀性降雨条件下黔西喀斯特区秸秆覆盖水土保持效应

降雨是坡面水土流失的主要驱动力,降雨量对土壤侵蚀有重要影响。李瑞等^[51]基于泔洋水小流域研究产流产沙与降雨之间的关系表明,其产流、产沙量与降雨量在 $P=0.01$ 水平上显著相关。陈美淇等^[39]研究同样表明,西南黄壤坡面产流产沙受降雨量影响较大。本研究中喀斯特区坡耕地产流、产沙量同样受降雨量影响较大,特别是在中雨和暴雨的影响下,其产流产沙较大。主要是因为研究区降雨以中雨为主,占总降雨场次的 50%,而观测期间,暴雨虽只有 3 场,但因其雨量大、侵蚀动力强,导致产流、产沙量大幅度增加。因此,区域坡耕地耕作实践中,要重点对这 2 种降雨侵蚀进行防控。

喀斯特区土层薄,降雨后地表极易遭到冲刷,这是导致西南石漠化加剧的一个重要因素,而采用秸秆覆盖则是防治坡耕地水土流失的重要途径。本研究发现,不同降雨等级条件下,各秸秆覆盖处理的水土保持效果明显优于玉米单作处理,说明在天然降雨条

件下,秸秆覆盖对防治坡耕地土壤侵蚀起到积极的作用。西南地区降雨频繁,特别是在 6—9 月正是作物生长阶段,如果坡耕地缺少必要的水土保持防控措施,降雨冲刷将会大幅度提高土壤侵蚀风险。降雨特性和秸秆覆盖的交互作用对坡耕地产流产沙具有重要影响,总体而言,无秸秆覆盖玉米单作小区地表径流和土壤侵蚀高于秸秆覆盖小区;秸秆覆盖条件下,即使是少量的秸秆覆盖,在大到暴雨及高雨强条件下,其产流产沙明显小于玉米单作小区。如前文所述,秸秆覆盖可充当缓冲介质,防止降雨对地表的击溅和溅蚀,减弱雨水对地面的冲刷动能,地表不易形成浅沟或细沟,从而减少土壤侵蚀;再加上秸秆覆盖可增加土壤粗糙率,使雨水停留在坡面的时间延长,增加雨水下渗能力,从而减少坡面径流,土壤侵蚀也因此而减少,有效降低土壤侵蚀风险^[7]。

3.3 秸秆覆盖对黔西喀斯特区玉米不同生长阶段水土保持效果的影响

西南喀斯特区坡耕地种植带来的水土流失问题已严重影响到人们的生产生活,但坡耕地又是西南喀

斯特地区农业生产的主要载体,将其撂荒自然恢复是不现实的问题。目前西南喀斯特地区水土保持措施主要有工程措施、生物措施和农艺措施。工程措施投入大,难以大规模推广;生物措施主要用以解决非耕地水土流失问题,将大面积坡耕地退耕还林还草也是不现实的问题^[52];本研究中秸秆覆盖耕作措施属于农艺措施中的一种,具有成本少、取材方便等优点,在西南喀斯特地区农业可持续发展中具有重要意义。

从研究结果看,各阶段覆盖小区产流产沙均小于对照,这也印证了前文所述的秸秆覆盖具有一定的水土保持功能。无秸秆覆盖小区玉米抽雄期—成熟期产流产沙比前一阶段大,原因可能是由于前 2 个阶段降雨对坡面的冲刷形成一些细沟和浅沟,加上抽雄期—成熟期玉米叶片的萎缩,对雨水的截留作用减弱,在地表易汇聚成径流,加剧了土壤侵蚀。玉米单作小区产流产沙呈先减后增的趋势,这主要与作物盖度有关,拔节期—抽雄期是玉米生长的旺盛阶段,叶片面积最大,截留雨水较多^[53],因此这一段的产流产沙较少。在秸秆覆盖耕作措施条件下,玉米不同生长阶段各小区产流产沙量具有差异性,特别是在玉米苗期—拔节期阶段,其产流、产沙远大于玉米拔节期—抽雄期和抽雄期—成熟期,这主要是因为玉米种植前进行了土地翻耕,土质疏松;再者,在玉米秸秆覆盖前期,秸秆可起到较好的减流、减沙效果,然而在此阶段,玉米冠幅较少,其径流泥沙调控并没有后期那么明显。可见,坡耕地水土流失防控的重点时期主要是种植初期,在玉米种植前期覆盖秸秆是非常有必要的。

4 结 论

秸秆覆盖可有效降低坡耕地地表径流和产沙量,有效降低土壤侵蚀风险,具有较好的水土保持效果;同时,随着秸秆覆盖量的增加,坡耕地产流、产沙量呈下降趋势,但当覆盖量达到 5 556 kg/hm²后,继续增加秸秆覆盖至 6 944 kg/hm²时,减流、减沙效果变化不明显。综合分析不同降雨等级和作物不同生长阶段坡耕地产流产沙的特征,并通过函数拟合,本研究建议黔西喀斯特坡耕地生产实践中,覆盖 6 000 kg/hm²左右的秸秆进行土壤侵蚀防控。

参考文献:

[1] 陈美淇,魏欣,张科利,等.基于 CSLE 模型的贵州省水土流失规律分析[J].水土保持学报,2017,31(3):16-21,26.

[2] 国家林业局.中国石漠化状况公报[N].中国绿色时报,2012-06-18(3).

[3] 甘艺贤,戴全厚,伏文兵,等.基于模拟降雨试验的喀斯特坡耕地土壤侵蚀特征[J].应用生态学报,2016,27(9):

2754-2760.

[4] 王治国,肖娟,魏忠义,等.黄土残塬区人工降雨条件下坡耕地水蚀研究:Ⅲ.坡耕地小麦休闲期秸秆覆盖的防蚀效应[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(2):14-18.

[5] 严坤,王玉宽,徐佩,等.秸秆覆盖对三峡库区坡面侵蚀的影响[J].水土保持通报,2016,36(1):6-10.

[6] 王安,郝明德,王英文.人工降雨条件下秸秆覆盖及留茬的水土保持效应[J].水土保持通报,2012,32(2):26-28,34.

[7] 赵君范,黄高宝,辛平,等.保护性耕作对地表径流及土壤侵蚀的影响[J].水土保持通报,2007,27(6):16-19.

[8] 林超文,罗春燕,庞良玉,等.不同耕作和覆盖方式对紫色丘陵区坡耕地水土及养分流失的影响[J].生态学报,2010,30(22):6091-6101.

[9] 唐涛,郝明德,单凤霞.人工降雨条件下秸秆覆盖减少水土流失的效应研究[J].水土保持研究,2008,15(1):9-11,40.

[10] 张瑜,刘肃,徐子棋,等.秸秆覆盖对黑土区侵蚀沟植被恢复和固土的作用[J].水土保持通报,2020,40(1):157-161,169.

[11] Beggy H M, Fehmi J S. Effect of surface roughness and mulch on semi-arid revegetation success, soil chemistry and soil movement [J].Catena,2016,143:215-220.

[12] Alliaume F, Escudero J G, Dogliotti S. Impact of minimum tillage, oat straw management, and chicken manure on soil water content, runoff, erosion and tomato production [J].Agrociencia,2012,16(3):199-207.

[13] Prosdoci M, Jordán A, Tarolli P, et al. The immediate effectiveness of barley straw mulch in reducing soil erodibility and surface runoff generation in Mediterranean vineyards [J].Science of the Total Environment,2016,547:323-330.

[14] 裴峥,段喜明.翻耕和覆盖对坡耕地产流产沙的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2016,36(6):412-416.

[15] Zhang S L, Li P R, Yang X Y, et al. Effects of tillage and plastic mulch on soil water, growth and yield of spring-sown maize [J].Soil and Tillage Research,2011,112(1):92-97.

[16] 辛艳,王瑄,邱野,等.辽宁省不同耕作方式对坡耕地水土及氮磷养分流失的影响效果[J].水土保持学报,2013,27(1):27-30.

[17] 杨青森,郑粉莉,温磊磊,等.秸秆覆盖对东北黑土区土壤侵蚀及养分流失的影响[J].水土保持通报,2011,31(2):1-5.

[18] 黄新君,陈尚洪,刘定辉,等.秸秆覆盖和有机质输入对紫色土土壤可蚀性的影响[J].中国农业气象,2016,37(3):289-296.

[19] 白永会,查轩,查瑞波,等.秸秆覆盖红壤径流养分流失效益及径流剪切力影响研究[J].水土保持学报,2017,

- 31(6):94-99.
- [20] 陈洪松,冯腾,李成志,等.西南喀斯特地区土壤侵蚀特征研究现状与展望[J].水土保持学报,2018,32(1):10-16.
- [21] 刘柳松,任红艳,史学正,等.秸秆覆盖对不同初始含水率土壤产沙过程的影响[J].农业工程学报,2010,26(1):108-112.
- [22] 王万中,焦菊英,郝小品,等.中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布(I)[J].水土保持学报,1995,9(4):5-18.
- [23] 科迪.降雨强度标准划分[J].北京水利,1995(4):49.
- [24] 宫崇栋.贵州高原山区玉米种植管理技术探析[J].农技服务,2015,32(1):39.
- [25] 罗键,郑子成,秦凤,等.玉米生长期坡耕地地表径流及侵蚀产沙特征[J].水土保持研究,2014,21(3):11-15.
- [26] 郑子成,张锡洲,李廷轩,等.玉米生长期土壤抗蚀性特征及其影响因素分析[J].农业工程学报,2014,30(4):100-108.
- [27] 张翼夫,李洪文,何进,等.玉米秸秆覆盖对坡面产流产沙过程的影响[J].农业工程学报,2015,31(7):118-124.
- [28] 王晓燕,高焕文,李洪文,等.保护性耕作对农田地表径流与土壤水蚀影响的试验研究[J].农业工程学报,2000,18(3):66-69.
- [29] 白怡婧,李渝,黄兴成,等.保护性耕作对黄壤坡耕地水土流失及作物产量的影响[J].水土保持通报,2019,39(6):16-20,34.
- [30] Li R, Li Q G, Pan L D. Review of organic mulching effects on soil and water loss[J/OL]. Archives of Agronomy and Soil Science. 2020, <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1718111>.
- [31] 张萍,李其昀,于磊,等.秸秆覆盖对冬小麦生长状况及产量的影响[J].山东理工大学学报(自然科学版),2008,22(5):48-51.
- [32] 刘玉含,张展羽,伊德里萨,等.农田秸秆覆盖技术及其发展趋势分析[J].水利经济,2007(2):53-56,83.
- [33] 员学锋,吴普特,汪有科.秸秆覆盖桃树地生态效应及桃树的生长状况[J].农业工程学报,2007,25(1):91-94.
- [34] 肖继兵,杨久廷,辛宗绪.辽西地区秸秆覆盖试验研究[J].节水灌溉,2008(2):8-10,13.
- [35] Rahma A E, Wang W, Tang Z J, et al. Straw mulch can induce greater soil losses from loess slopes than no mulch under extreme rainfall conditions [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 232: 141-151.
- [36] 孙力,盖志佳,王谦玉,等.中国秸秆覆盖研究现状及展望[J].安徽农学通报,2015,21(7):96-98.
- [37] 王世学,高焕文,李洪文.冷寒风沙区保护性耕作种植试验[J].农业工程学报,2003,21(3):120-123.
- [38] 赵平伟,郭萍,李成武,等.云南不同量级降雨下的降雨侵蚀力特征分析[J].长江流域资源与环境,2015,24(12):2135-2141.
- [39] 陈美淇,张卓栋,王晓岚,等.西南黄壤和西北黄土坡面侵蚀产沙规律比较研究[J].中国水土保持科学,2016,14(6):53-60.
- [40] 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.
- [41] 张信宝,王世杰,曹建华,等.西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题[J].中国岩溶,2010,29(3):274-279.
- [42] 吕凯,段颖丹,吴伯志.秸秆覆盖对种植烤烟坡耕地土壤侵蚀的影响[J].南方农业学报,2019,50(11):2450-2458.
- [43] Lattanzi A R, Meyer L D, Baumgardner M F. Influences of muleh rate and slope steepness on interrill erosion [J]. Soil Science Society of America Journal, 1974, 38(6):946-950.
- [44] Robichaud P R, Wagenbrenner J W, Lewis S A, et al. Post-fire mulching for runoff and erosion mitigation Part II: Effectiveness in reducing runoff and sediment yields from small catchments [J]. Catena, 2013, 105: 93-111.
- [45] Ruy S, Findeling A, Chadoeaf J. Effect of mulching techniques on plot scale runoff: FDTF modeling and sensitivity analysis[J]. Journal of Hydrology, 2006, 326(1/4):277-294.
- [46] Jordán A, Zavala L M, Gil J. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain [J]. Catena, 2010, 81(1):77-85.
- [47] Montenegro A A A, Abrantes J R C B, De Lima J L M P, et al. Impact of mulching on soil and water dynamics under intermittent simulated rainfall [J]. Catena, 2013, 109:139-149.
- [48] Tesfahuney W A, Rensburg L D V, Walker S. In-field runoff as affected by runoff strip length and mulch cover [J]. Soil and Tillage Research, 2013, 131(7):47-54.
- [49] Gholami L, Sadeghi S H, Homaee M. Straw mulching effect on splash erosion, runoff, and sediment yield from eroded plots [J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(1):268-278.
- [50] Sadeghi S H R, Gholami L, Sharifi E, et al. Scale effect on runoff and soil loss control using rice straw mulch under laboratory conditions [J]. Solid Earth, 2015, 6(1):1-8.
- [51] 李瑞,陈康,刘瑞禄,等.基于小流域尺度的黔北喀斯特地区产流产沙特征[J].农业工程学报,2019,35(11):139-147.
- [52] 姚宇卿,吕军杰,王育红,等.保持耕作技术对旱区坡耕地水土流失的影响[J].西北农业学报,2003,12(2):41-43.
- [53] 郑子成,李廷轩,张锡洲,等.玉米植株冠层截留分异特征及其影响因素[J].水土保持学报,2012,26(4):208-211,215.