

秸秆覆盖对西南喀斯特坡地幼龄橘园产流产沙的影响

高泽超^{1,2}, 潘焰菲^{1,2}, 徐勤学^{2,3}, 张帅普^{1,2}, 付智勇³, 陈洪松³

(1. 桂林理工大学 广西环境污染控制理论与技术重点实验室科教结合科技创新基地, 广西 桂林 541004; 2. 桂林理工大学 岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林 541004; 3. 中国科学院 环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西 环江 547100)

摘要:喀斯特坡地幼龄橘园人为扰动剧烈, 容易发生土壤侵蚀。秸秆覆盖是坡地常用的水土保持措施, 但其在喀斯特坡地橘园的水土保持效益还不清楚。通过人工土槽模拟降雨试验, 研究了水稻秸秆覆盖对喀斯特坡地幼龄橘园产流产沙的影响, 试验设置了 2 个雨强(60 mm/h 和 120 mm/h)和 4 种水稻秸秆覆盖度(0, 20%, 50% 和 80%)。结果表明: (1) 秸秆覆盖减小地表径流的效果受降雨强度控制。在中雨强(60 mm/h)条件下, 秸秆覆盖可以有效降低地表径流系数。在大雨强(120 mm/h)下, 只有 20% 覆盖度可以减少地表径流系数; (2) 在中雨强(60 mm/h)条件下, 20% 和 50% 的秸秆覆盖显著增加壤中流和地下径流量; 在大雨强(120 mm/h)条件下, 20% 的秸秆覆盖显著增加了壤中流量, 50% 和 80% 秸秆覆盖度对壤中流量影响不显著; (3) 秸秆覆盖可以有效减少地表土壤侵蚀总量, 地表土壤侵蚀总量与秸秆覆盖度呈负相关。 (4) 秸秆覆盖减弱了地表径流的携沙能力, 在 50% 和 80% 秸秆覆盖度时地表径流的携沙能力得到显著减弱。结果可为喀斯特坡地幼龄橘园合理布设秸秆覆盖措施提供科学依据。

关键词:产流产沙; 橘园; 模拟降雨; 喀斯特; 秸秆覆盖

中图分类号: S157.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)01-0036-08

Effect of Straw Mulch on Runoff and Sediment Production in Young Citrus Orchards in Southwest Karst

GAO Zechao^{1,2}, PAN Yanfei^{1,2}, XU Qinxue^{2,3}, ZHANG Shuaipu^{1,2}, FU Zhiyong³, CHEN Hongsong³

(1. Key Laboratory for Theory and Technology of Environmental Pollution Control in Guangxi, Science and Technology Innovation Base, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Guangxi Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. Huanjiang Karst Ecosystem Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100, China)

Abstract: The young sloping citrus orchard in karst area is prone to soil erosion because of the severe factitious disturbance. Straw mulch is a common measure to conserve water and soil on sloping land, but the efficiency of straw mulch in the soil and water conservation of citrus orchards on sloping land in karst area is not clear. The present study used simulated rainfall experiment to study the effects of straw mulch on runoff and sediment production in young citrus orchards in sloping fields of karst area. Two rainfall intensities (60 mm/h and 120 mm/h) and four levels of straw cover rates (0, 20%, 50%, and 80%) were set up. The results show that: (1) the effect of Straw mulch on reducing surface runoff coefficient is controlled by rainfall intensity; under the condition of medium rainfall intensity (60 mm/h), straw mulch can effectively reduce the coefficient of surface runoff; under the condition of high rainfall intensity (120 mm/h), only 20% coverage can reduce the runoff coefficient; (2) under moderate rainfall intensity (60 mm/h), 20% and 50% straw mulch can significantly increase interflow and underground runoff, and under heavy rainfall intensity (120 mm/h), 20% straw mulch significantly increases interflow, the effects of 50% and 80% straw coverage on interflow

收稿日期: 2021-01-05

修回日期: 2021-01-24

资助项目: 国家重点研究计划项目(2016YFC0502403); 国家自然科学基金项目(51769005, 41301289)

第一作者: 高泽超(1996—), 男, 陕西延安人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与农业生态研究。E-mail: gzc45@qq.com

通信作者: 徐勤学(1982—), 男, 湖南新宁人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持与农业生态研究。E-mail: xqx@glut.edu.cn

are not significant; (3) straw mulch can effectively reduce the total amount of soil erosion; the total soil erosion and straw mulch are negatively correlated; (4) straw mulch reduces the sediment carrying capacity of surface runoff, and the sediment carrying capacity of surface runoff decreases significantly at 50% and 80% straw mulching levels. This study can provide the scientific basis for the rational arrangement of water and soil conservation measures in young citrus orchards in sloping land of karst area.

Keywords: runoff and sediment production; citrus orchards; simulated rainfall; karst; straw mulch

我国西南喀斯特地区属于土地石漠化和水土流失严重属典型生态脆弱区,区域经济社会发展相对落后,农业人口比重高,耕地总量少,该地区生态环境脆弱,坡地土层浅薄,成土速率慢,容许土壤流失量极低^[1-2]。近年来,受经济利益的带动,我国西南喀斯特地区许多坡地改种柑橘,柑橘产业已在该区域经济发展中发挥了重要作用,但柑橘种植初期果园地表裸露,极易发生土壤侵蚀,涂国安在对红壤坡地橘园的长期观测中表明在幼树期橘园土壤侵蚀强度可达到极强烈级别^[3]。Cerdà 等在西班牙喀斯特地区柑橘种植初期的人工模拟降雨结果中表明地表容易产流,地表径流系数达到 0.3 以上,土壤地表侵蚀也很严重^[4]。

秸秆覆盖是减少土壤侵蚀的主要措施,已有研究表明秸秆覆盖具有减少水土流失,蓄水保墒的功能^[5-7]。Prosdocimi 通过对全球各地秸秆覆盖试验结果的总结,认为减少水土流失量是秸秆覆盖最显著的效益^[8-9]。罗崇亮在半干旱雨养农业区垄沟覆盖栽培系统的研究中表示垄沟地膜和秸秆二元覆盖、是东非高原半干旱地区最优的垄沟结构配置^[10],Sadeghi 等通过测定发现秸秆覆盖对降低径流系数、径流含沙量和减少水土流失效果显著^[11]。张翼夫通过室内模拟试验,研究了秸秆覆盖对沙壤地产流产沙的影响,结果表明 30% 稻秆覆盖度时减少总径流 17.9%~38.7%,减少总产沙量 34.1%~48.0%,其水土保持效果显著^[12]。刘文晶通过模拟降雨试验对玉米、小麦秸秆覆盖的研究中得出,秸秆覆盖能延缓降雨的下渗,还可以吸收水分,减少降雨径流损失^[13]。王晓燕等通过秸秆覆盖和普通耕作措施的比较,发现秸秆覆盖减少了地表年径流量 52.5%,减少了土壤侵蚀量 80.2%^[14]。但也有研究表明秸秆覆盖可能会在坡面造成更严重的侵蚀^[15-16]。庄晓晖通过在强降雨条件下秸秆覆盖对黄土坡耕地的土壤侵蚀研究中表明,秸秆覆盖增大了坡面径流量以及对耕作土壤的冲刷,导致了陡坡耕地更严重的土壤侵蚀^[17]。秸秆覆盖在喀斯特地区坡地的防蚀效益研究相对较少,之前的研究表明,在大雨强时,玉米秸秆覆盖导致喀斯特坡耕地地表径流增多,同时增加了土壤流失量^[18]。盘李东通过野外径流小区观测,研究了玉米秸秆覆盖对黔西喀斯特坡耕地产流产沙特征的

影响,结果表明在不同降雨等级下,秸秆覆盖在喀斯特坡耕地具有较好的水土保持效果,并且其产流产沙总量随覆盖量的增大而逐渐减小^[19]。

喀斯特区坡地幼龄橘园急速扩张,但对这类橘园的土壤侵蚀过程还缺乏了解。由于喀斯特坡地与非喀斯特坡地在产流和产沙过程中的差异性,也不能基于非喀斯特地区的成果对秸秆覆盖在喀斯特坡地的水土保持效益进行合理评价^[20-22]。为明确水稻秸秆覆盖在喀斯特坡地幼龄橘园的减流减沙效益,本文通过人工模拟降雨试验,研究喀斯特坡地幼龄橘园在不同雨强、不同秸秆覆盖度下的产流产沙特征,相关结果将为西南喀斯特坡地幼龄橘园的水土保持措施合理布置提供理论依据,也可为喀斯特坡地其他经果林的水土保持提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

1.1.1 供试土壤 试验土壤采自广西壮族自治区环江毛南族自治县板德乡山脚(北纬 24°45',东经 108°17')表层 0—40 cm 处的黄色石灰土,经过实测后土壤容重为 1.22 g/cm³,供试土壤原土地利用类型为撂荒地,供试土壤经风干后过 1 cm 的筛,土壤基本物理性质见表 1。

土壤过筛后经过充分混合,分三层压实填入土槽,每层 10 cm,总填土厚度为 30 cm,土壤容重控制在 1.22 g/cm³。填土之前,先在开孔的预留孔铺上一张 10 cm×10 cm 大小的水溶棉(遇水可溶),然后进行填土,保证各处土壤均匀的前提下用自制的铁板对土层进行压实,为了减少边界效益,填土边界也要进行压实。

试验所用模拟裸岩为河池市下南乡白云岩,块石保持裸岩形状大致相同。本试验根据喀斯特石漠化等级划分标准,选择 12% 的裸岩率表示潜在石漠化。裸岩在进行填土之前放进土槽中。

1.1.2 模拟降雨装置 人工降雨器采用组合的顶喷式降雨器,喷头为美国 SPRACO 锥形喷头。可调节坡度钢制土槽为自主设计完成,可自由移动,长 2 m,宽 1 m,深 60 cm,土层深度设计为 30 cm,钢土槽距地面 50 cm,坡度在 0°~30°可自由调节,土槽的下端

为 V 型地表集流槽,集流槽通过软管与集流桶连接,以收集地表产生的径流以及泥沙。土槽下端左侧留出直径为 2 cm 的小孔,连接软管以收集壤中流。底

板均匀打孔 6 个,直径为 5 cm,土槽下面分别设有地下径流集流槽,集流槽出水口下方采用塑料小桶收集地下径流样品,待降雨后测定累积径流量和产沙量。

表 1 供试土壤基本物理性质

土壤容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	黏粒含量 (0~0.002 mm)/%	粉粒含量 (0.002~0.02 mm)/%	砂粒含量 (0.02~2000 mm)/%	有机质含量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
1.22	64.29	24.63	11.08	12.06

1.1.3 供试橘树及秸秆 试验用橘树品种为桂西北 1 a 生沃柑幼苗(渝审柑桔 2012002),初始树高为 27.5±3.2 cm,沃柑幼苗移栽入试验土槽后,待土壤沉降和橘树生长 3 个月后再进行模拟降雨试验。

为了保证水稻秸秆的均匀铺设,将水稻秸秆去除稻穗部分,均匀地切成 15 cm 左右的小段,在试验前将水稻秸秆用水浸泡 24 h,使其达到水分饱和状态,同时防止其在试验的过程中吸取水分,影响试验产流时间和产流量结果。根据当地橘园常用的覆盖方式,秸秆覆盖范围以橘树树干为中心向四周外扩 20 cm 的正方形区域内。均匀将秸秆覆盖在土壤表面,并通过调整,使覆盖厚度一致。秸秆覆盖的覆盖度与秸秆重量之间可以通过公式:

$$MR = -\ln(1 - MC) / A_m \quad (1)$$

式中:MR:重量(t/hm^2);MC:覆盖度(%); A_m 为系数 0.38。因此,在本观测小区中 0,20%,50%和 80%覆盖度所对应的秸秆的重量分别为:0,150 g,400 g,900 g。

1.2 试验方法

试验在中科院亚热带农业生态研究所的环江喀斯特生态系统观测研究站开展(北纬 24°43′—24°45′,东经 108°18′—108°20′)。模拟降雨试验于 2020 年 7 月—9 月完成,试验共设置了 4 个水稻秸秆覆盖度:0,20%,50%和 80%。据野外实地考察,喀斯特坡地橘园坡度主要在 15°左右,因此本试验设计坡度为 15°。本试验为模拟该地区的中高强度暴雨,每场模拟降雨量 90 mm,雨强选用 60 mm/h 和 120 mm/h,一场降雨总历时分别为 90 min 和 45 min^[23]。地表径流通过土槽下端的 V 型集流槽收集,壤中流通过土槽下端左侧的 2 cm 小孔收集,地下径流通过土槽底部的 6 个小孔下端的集流槽收集,所有水样收集后立刻称重得出总重,泥沙样品静置后倒掉上清液,置于烘箱(105℃)烘干 24 h 至恒重后,用天平称量得出泥沙重量。每个秸秆覆盖度共 3 次重复试验,共计 24 场有效降雨。

1.3 数据处理

利用 IBM SPSS Statistics 25 和 Origin 2017 软件对采集的模拟降雨径流及泥沙数据经行统计分析,包括显著性分析和数据拟合。

2 结果与分析

2.1 秸秆覆盖对径流量的影响

在中雨强(60 mm/h)条件下,秸秆覆盖可以显著降低地表径流系数,同时增大壤中流和地下径流系数(表 2)。20%,50%和 80%秸秆覆盖度的地表径流系数分别为无秸秆覆盖的 0.54,0.64,0.36 倍。秸秆覆盖显著增大了壤中流和地下径流的径流系数,与无覆盖条件相比,20%,50%和 80%秸秆覆盖度时壤中流径流系数由 0.09 增大到 0.17,0.16,0.13,地下径流系数由 0.14 增大到 0.18,0.16,0.25。在大雨强(120 mm/h)条件下,秸秆覆盖仅在 20%覆盖度下降低了地表径流系数,随着秸秆覆盖度的增加,50%和 80%秸秆覆盖度的地表径流系数分别增加到 0.39,0.30。秸秆覆盖时显著增大了壤中流径流系数,20%,50%和 80%秸秆覆盖度下壤中流系数分别为无秸秆覆盖的 3.0,1.5,2.0 倍。

表 2 不同秸秆覆盖度的径流系数

雨强/ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	覆盖度/ %	径流系数		
		地表径流	壤中流	地下径流
60	0	0.28±0.08a	0.09±0.02c	0.14±0.04c
	20	0.15±0.01b	0.17±0.03ab	0.18±0.03abc
	50	0.18±0.06b	0.16±0.01ab	0.16±0.04bc
	80	0.10±0.02b	0.13±0.03bc	0.25±0.03a
120	0	0.29±0.07b	0.02±0.01c	0.06±0.01b
	20	0.17±0.03c	0.06±0.01a	0.06±0.01b
	50	0.39±0.02a	0.03±0.01bc	0.03±0.002c
	80	0.30±0.03b	0.04±0.01abc	0.09±0.004a

注:同一列不同字母表示处理间在 0.05 的水平上差异显著。

在中雨强(60 mm/h)条件下,秸秆覆盖可以显著减少地表径流产流占比,同时增大壤中流和地下径流占总径流量比例(图 1)。无秸秆覆盖时地表径流为总径流中的重要组成部分(55%),在秸秆覆盖后,地表径流占总径流比例明显变小,均以壤中流和地下径流为主。在大雨强(120 mm/h)条件下,无覆盖条件时地表径流为主要产流部位(78%)。在秸秆覆盖后,20%和 80%秸秆覆盖度的地表径流占比明显变小,同时增大了壤中流和地下径流占总径流比例。但在 50%秸秆覆盖度下地表径流占比增大,壤中流和地下径流占比仅占 15%。

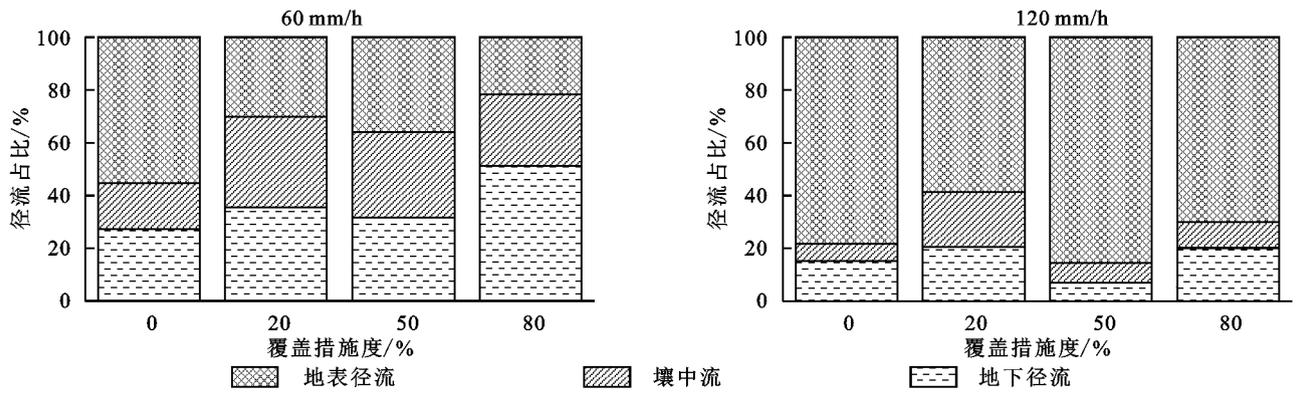
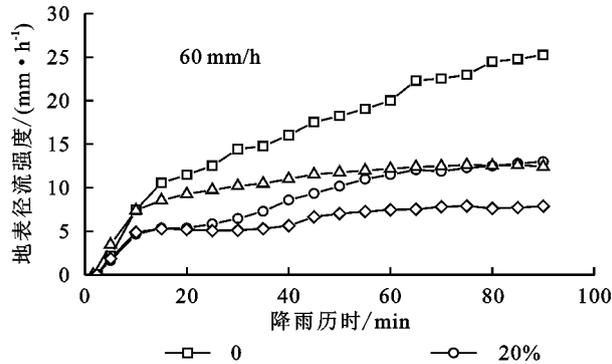


图 1 不同秸秆覆盖度下各部分产流量百分比

2.2 秸秆覆盖对径流过程的影响

秸秆覆盖显著改变了喀斯特橘园坡地的地表径流过程。在中雨强(60 mm/h)条件下(图 2),不同秸秆覆盖度稳定径流强度大小顺序为 $0 > 50\% > 20\% > 80\%$, 秸秆覆盖条件时稳定地表径流强度均明显小于无秸秆覆盖。在无秸秆覆盖条件下,地表径流强度随降雨时间呈持续增长趋势,无明显稳定产流。20%,50%和80%秸秆覆盖度时地表径流强度先增大后逐渐趋于稳定,其中50%秸秆覆盖度下地表径流强度最先达到稳定,20%和80%秸秆覆盖度均在



60 min 左右达到稳定。在大雨强(120 mm/h)条件下,不同覆盖度下地表径流过程均表现为产流后迅速增加然后逐步稳定。不同覆盖条件时稳定地表径流强度大小顺序为 $50\% > 80\% > 0 > 20\%$, 其中80%秸秆覆盖度和无秸秆覆盖径流强度相似,20%秸秆覆盖度径流强度明显大于其他覆盖度,其径流强度在0~6 min 快速增长,然后增长速度变慢,最后逐渐趋于稳定。20%秸秆覆盖度的地表径流强度明显低于其他覆盖度,其变化趋势为0~27 min 内快速增长,然后逐渐趋于稳定。

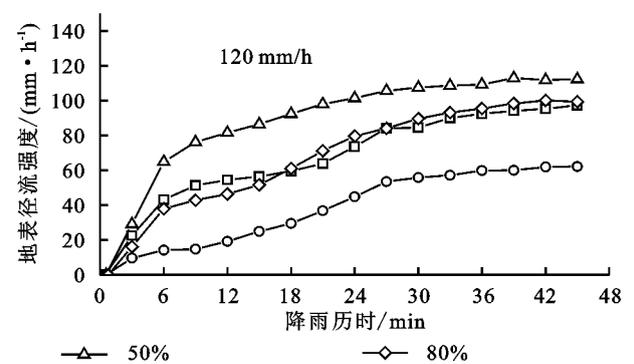


图 2 不同秸秆覆盖度地表径流过程

不同秸秆覆盖度下壤中流径流强度均显著增大。在中雨强(60 mm/h)时(图 3),不同覆盖度下壤中流径流过程均表现为产流后迅速增加然后逐步稳定。秸秆覆盖时的壤中流稳定径流强度均显著大于无秸秆覆盖,不同壤中流稳定径流强度大小顺序为 $20\% > 50\% > 80\% > 0$ 。其中20%和50%覆盖度下壤中流径流强度相似,并且显著大于80%秸秆覆盖度和无秸秆覆盖,这与地表径流强度特征相似,20%和50%秸秆覆盖度下地表径流强度显著高于其他覆盖度。大雨强(120 mm/h)时,秸秆覆盖显著增大了壤中流径流强度,不同壤中流稳定径流强度大小顺序为 $20\% > 80\% > 50\% > 0$ 。20%秸秆覆盖度的壤中流径流强度显著大于其他秸秆覆盖度,与之相对应的是20%秸秆覆盖度的地表径流强度显著小于其他秸秆覆盖度。

不同秸秆覆盖度下地下径流过程均表现为产流后迅速增加然后逐步稳定(图 4)。中雨强时,不同覆盖条件时稳定地下径流强度大小顺序为 $80\% > 20\% > 50\% > 0$ 。覆盖措施明显增加了地下径流的稳定径流强度,其中80%秸秆覆盖度时地下径流稳定径流强度显著高于其他秸秆覆盖度。20%秸秆覆盖度时地下径流强度的增长速率从产流后到35 min 快速增长,然后增长速度逐渐减小,在65 min 左右被50%秸秆覆盖度反超,然后均逐渐达到稳定。大雨强时,不同覆盖条件时稳定地下径流强度大小顺序为 $80\% > 20\% > 0 > 50\%$,80%秸秆覆盖度地下径流强度明显高于其他覆盖措施,20%秸秆覆盖度的地下径流强度在产流后快速增长,在24 min 左右最快达到稳定径流状态,50%秸秆覆盖度的地下径流过程从产流后一直处于持续增长的状态,但其径流强度显著低于其他秸秆覆盖度。

不同秸秆覆盖度下地下径流过程均表现为产流

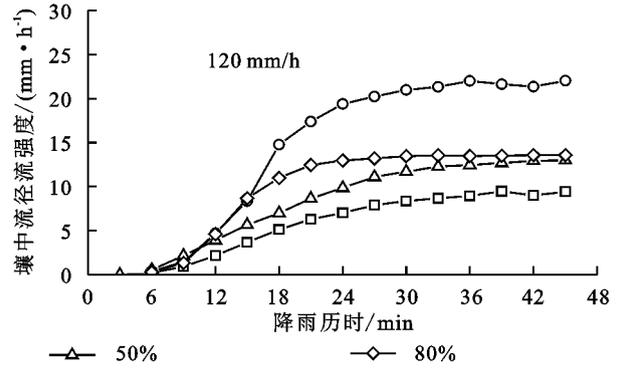
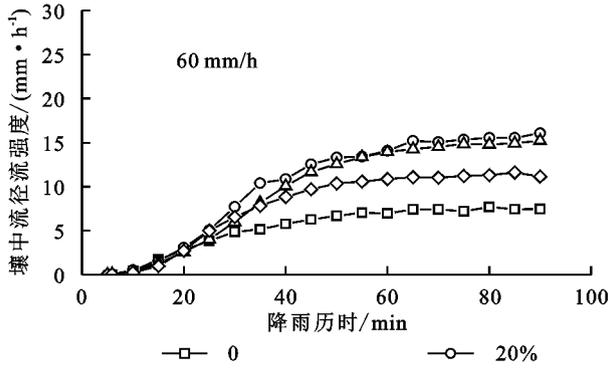


图3 不同秸秆覆盖度壤中流径流过程的影响

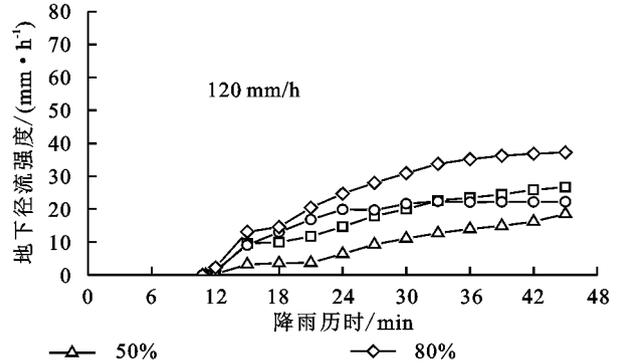
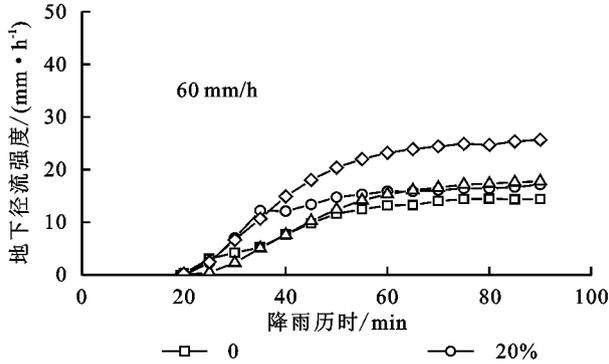


图4 不同秸秆覆盖度地下径流过程的影响

2.3 秸秆覆盖对地表侵蚀量的影响

秸秆覆盖可以显著降低地表侵蚀总量(表3)。在中雨强(60 mm/h)条件下,无秸秆覆盖条件下土壤的侵蚀总量为 117.08 kg/ha,20%,50%和80%秸秆覆盖度下的侵蚀总量分别减少了50.3%,86.1%和96.1%。结果表明,各覆盖度地表侵蚀量之间差异显著,地表侵蚀量随覆盖度的增大而减小。在大雨强(120 mm/h)条件下,无秸秆覆盖时地表侵蚀总量为307.8 kg/ha,20%,50%和80%秸秆覆盖度的地表侵蚀总量分别减少了44.4%,65.7%和76.6%,在50%和80%秸秆覆盖度下地表侵蚀总量差异不显著。

表3 不同覆盖条件下地表土壤侵蚀总量

雨强/ (mm·h ⁻¹)	秸秆覆盖度			
	0	20%	50%	80%
60	117.08±10.97a	58.23±4.85b	16.33±4.85c	4.60±1.23d
120	307.80±164.07a	171.22±37.73ab	105.44±5.29bc	72.07±15.92bc

注:同一行不同字母表示处理间在0.05的水平上差异显著。

2.4 秸秆覆盖对土壤侵蚀过程的影响

秸秆覆盖显著降低了土壤侵蚀速率(图5)。在中雨强(60 mm/h)条件下,不同秸秆覆盖度下的稳定侵蚀速率大小顺序为0>20%>50%>80%。无秸秆覆盖和20%秸秆覆盖度时土壤侵蚀速率呈锯齿状增大,随着覆盖度的增大,50%和80%秸秆覆盖度的土壤侵蚀速率过程呈先增大后快速稳定,且其稳定侵蚀速率显著小于其

他秸秆覆盖度。在大雨强(120 mm/h)条件下,不同秸秆覆盖度下的稳定侵蚀速率大小顺序为0>20%>50%>80%。无秸秆覆盖和20%秸秆覆盖度的侵蚀速率变化特征为先快速增大,在达到峰值后逐渐减小。径流对土壤50%和80%秸秆覆盖度的侵蚀速率变化特征与小雨强时相似,均为先快速增大后逐渐趋于稳定。

比较不同近地表相同径流量条件下的侵蚀率能有效反映径流分离和输运能力对坡面侵蚀的影响^[24]。各覆盖措施均显著降低了地表径流的携沙能力(图6)。在中雨强(60 mm/h)条件下,不同秸秆覆盖度携沙能力拟合线斜率大小顺序为0>20%>80%>50%。无秸秆覆盖时方程斜率为3.42,侵蚀速率与径流强度呈正相关,20%,50%和80%秸秆覆盖度的方程斜率分别为3.41,-0.01和-0.08,其中50%和80%侵蚀速率几乎不随径流强度变化。无秸秆覆盖和20%秸秆覆盖度的携沙能力相似,但20%秸秆覆盖度的侵蚀速率最大值在60 kg/(hm²·h)左右,径流强度最大只到12.5左右,均大幅小于无秸秆覆盖。在大雨强(120 mm/h)条件下,秸秆覆盖条件时携沙能力拟合线斜率大小顺序为20%>0>80%>50%。在相同径流强度下其中20%秸秆覆盖度的斜率与无秸秆覆盖相似,该特征与中雨强时相同。在相同径流强度下,50%和80%秸秆覆盖度的侵蚀速率显著小于无秸秆覆盖。

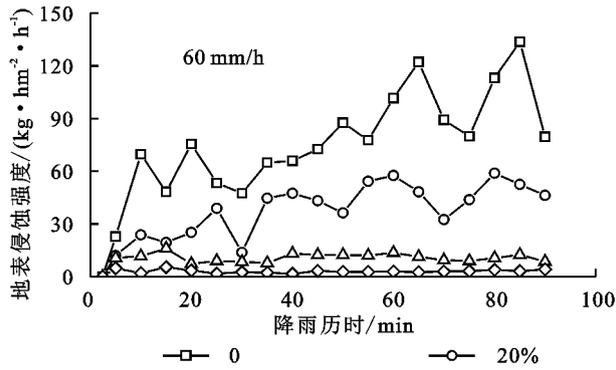


图 5 不同秸秆覆盖度土壤侵蚀过程的影响

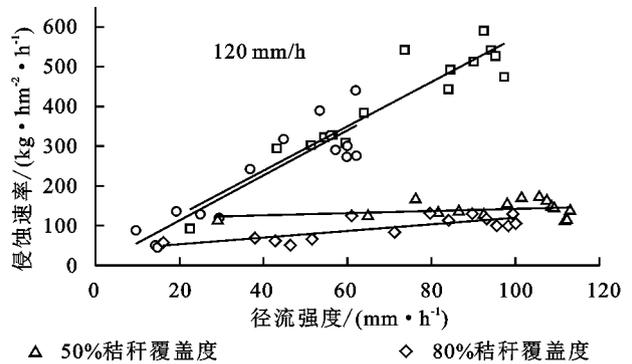
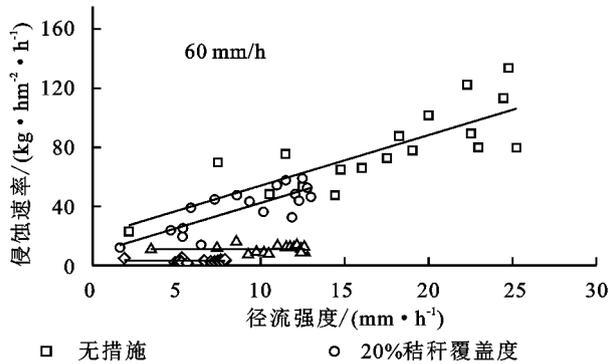
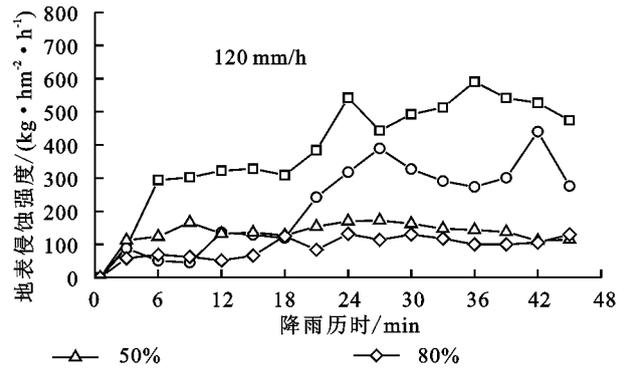


图 6 不同秸秆覆盖度对径流携沙能力的影响

3 讨论

本文结果显示,在中雨强(60 mm/h)条件下,秸秆覆盖可以有效降低地表径流系数,同时增大壤中流和地下径流系数。秸秆覆盖后主要产流部位从地表转为地下。在降雨过程中,雨滴对表层土壤的打击会造成土壤表层结皮,降低土壤的入渗性,使雨水入渗受阻,同时秸秆覆盖可以减少雨滴与表层土壤的直接接触,并且降低了地表径流的流速,当覆盖度越大时,秸秆对雨滴的动能削弱能力越强,因此更有利于雨水入渗,增加了壤中流和地下径流量^[25-26]。在大雨强(120 mm/h)条件下,秸秆覆盖仅在 20% 覆盖度下降低了地表径流系数,秸秆覆盖度较大时(50% 和 80%)地表径流系数增大,这与前人的研究结果一致^[16-17]。非喀斯特地区土壤入渗率较小,产流机制多为超渗产流,而喀斯特地区土壤入渗率较高,产流机制多为蓄满产流,但在大雨强下,相比无覆盖措施和低秸秆覆盖度(20%),高秸秆覆盖度下(50% 和 80%)秸秆虽然保护了坡面土壤不直接与降水接触,避免形成表层土壤结皮,但会使地表径流直接在秸秆上产流而被收集,土壤入渗量反而变少。

秸秆覆盖可以显著减少地表侵蚀总量,在秸秆覆盖时,地表侵蚀总量随秸秆覆盖度的增大而减小,这与大部分研究结果一致^[27-29]。本研究中秸秆覆盖一方面可以增大土壤表面的粗糙度,对泥沙运移起到阻

滞作用,另一方面随着覆盖度的增加地表径流量减少,进一步减少了径流作为侵蚀动力源的可能。

研究结果显示秸秆覆盖显著改变了地表侵蚀过程特征。在中雨强(60 mm/h)条件下,无秸秆覆盖和 20% 秸秆覆盖度时土壤侵蚀速率呈锯齿状增大,在较大秸秆覆盖度时(50% 和 80%)的土壤侵蚀速率过程呈先增大后快速稳定,且其稳定侵蚀速率显著小于无秸秆覆盖。本文通过对径流强度和侵蚀速率之间关系的分析,发现无秸秆覆盖与 20% 秸秆覆盖度的径流携沙能力基本相同,侵蚀速率与径流强度呈正相关。在降雨过程中,无秸秆覆盖时,以细沟为主的侵蚀过程导致了高的水流输送能力和径流有足够的动量来分离下表面的土壤颗粒^[30]。20% 秸秆覆盖度的侵蚀速率显著小于无秸秆覆盖,这是由于在秸秆覆盖的作用下其地表径流强度相比于无秸秆覆盖时显著减小,在相同的携沙能力下,20% 秸秆覆盖度只有较少地表径流对泥沙进行搬运,所以造成其侵蚀速率之间的差异。随着秸秆覆盖度的增大,50% 和 80% 秸秆覆盖度的携沙能力显著减弱,这是由于在秸秆覆盖减少地表径流强度、降低流速的同时地表土壤被秸秆压实,改变了土壤紧实度,径流对表层土壤的剥离作用减弱,形成了径流运输受限和土壤剥离受限的双重作用。

在大雨强(120 mm/h)条件下,无覆盖措施和 20% 秸秆覆盖度的侵蚀速率变化特征为先快速增大,在达到峰值后逐渐减小。其原因为,随着降雨历时的

增长,坡面径流强度逐渐增大,坡面径流对泥沙的搬运、剥离能力增强,降雨前期土壤侵蚀速率呈快速增长,降雨后期坡面径流趋于稳定,土壤表层形成结皮,可供径流搬运和剥离的量减少,故侵蚀速率出现减小趋势。50%和80%秸秆覆盖度的侵蚀速率变化特征与中雨强时相似,均为先快速增大后逐渐趋于稳定。50%和80%的径流携沙能力显著低于无秸秆覆盖,但其径流强度均能达到与无秸秆覆盖相似的较高水平。分析其原因,降雨前期,地表径流强度相对较小,地表土壤松散颗粒随径流被运输;降雨后期,地表径流量相对变大且逐渐稳定,但此时由于秸秆覆盖的压实作用,地表土壤颗粒被径流剥离的难度增大,侵蚀过程由径流运输受限转化为土壤剥离受限^[24]。最后,本试验的结果是通过模拟暴雨情况的人工降雨获得,为了更好地研究秸秆覆盖在喀斯特坡地幼龄橘园的产流产沙特征,还需通过天然降雨对喀斯特坡地幼龄橘园的产流产沙特征作进一步观测研究。

4 结论

(1) 秸秆覆盖对喀斯特坡地幼龄橘园减少地表径流的效果受降雨强度的影响。在中雨强(60 mm/h)条件下,秸秆覆盖可以有效降低地表径流系数,同时增大壤中流和地下径流系数。但在大雨强(120 mm/h)条件下,只有20%秸秆覆盖度可以显著降低地表径流系数并增大壤中流径流系数。

(2) 在中雨强(60 mm/h)条件下,20%和50%的秸秆覆盖显著增加壤中流和地下径流量;在大雨强(120 mm/h)条件下,20%的秸秆覆盖显著增加了壤中流量,50%和80%秸秆覆盖度对壤中流量影响不显著。

(3) 水稻秸秆覆盖可以有效减少土壤侵蚀量,并且地表土壤侵蚀总量与秸秆覆盖度呈负相关,在中雨强(60 mm/h)条件下,20%,50%和80%秸秆覆盖度下的侵蚀总量分别减少了50.3%,86.1%和96.1%;在大雨强(120 mm/h)条件下,20%,50%和80%秸秆覆盖度的地表侵蚀总量分别减少了44.4%,65.7%和76.6%。

(4) 较高秸秆覆盖度时(50%和80%),地表径流的携沙能力得到显著减弱,在中雨强(60 mm/h)条件下,携沙能力减弱原因为径流运输受限和土壤剥离受限的双重作用,在大雨强(120 mm/h)条件下,携沙能力减弱原因为土壤剥离受限。

参考文献:

[1] 张军以,周奉,苏维词,等.西南喀斯特峰丛洼地区农业现代化转型发展模式研究[J].中国农业资源与区划,

2020,41(5):57-64.

- [2] 曹建华,蒋忠诚,杨德生,等.中国西南岩溶区土壤允许流失量及防治对策[J].中国水土保持,2008(12):40-45.
- [3] 涂安国,谢颂华,李英,等.红壤坡地柑桔园长期试验下水沙动态变化特征分析[J].水土保持学报,2018,32(2):160-165.
- [4] Cerdà A, Morera A G, Bodí M B. Soil and water losses from new citrus orchards growing on sloped soils in the western Mediterranean basin[J]. Earth Surface Processes and Landforms: the Journal of the British Geomorphological Research Group, 2009,34(13):1822-1830.
- [5] 高焕文,李问盈,李洪文.中国特色保护性耕作技术[J].农业工程学报,2003,19(3):1-4.
- [6] 何进,李洪文,高焕文.中国北方保护性耕作条件下深松效应与经济效益研究[J].农业工程学报,2006,22(10):62-67.
- [7] 高焕文,李洪文,李问盈.保护性耕作的发展[J].农业机械学报,2008,39(9):43-48.
- [8] Prosdocimi M, Tarolli P, Cerdà A. Mulching practices for reducing soil water erosion: A review[J]. Earth-Science Reviews, 2016,161:191-203.
- [9] 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.
- [10] 罗崇亮.东非高原半干旱区垄沟覆盖结构变化对小麦生产力和土壤质量的影响及其机理[D].兰州:兰州大学,2020.
- [11] Sadeghi S H R, Gholami L, Moghadam E S, et al. Scale effect on runoff and soil loss control using rice straw mulch under laboratory conditions [J]. Solid Earth, 2015,6(1):2915-2938.
- [12] 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.
- [13] 刘立晶,高焕文,李洪文.秸秆覆盖对降雨入渗影响的试验研究[J].中国农业大学学报,2004,9(5):12-15,50.
- [14] 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,2000,16(3):66-69.
- [15] 唐泽军. PAM 增加入渗减少土壤侵蚀及稀土元素示踪土壤侵蚀过程的试验研究[D].北京:中国农业大学,2002.
- [16] Rahma Abbas E, Wang Wei, Tang Zejun, et al. Straw mulch can induce greater soil losses from loess slopes than no mulch under extreme rainfall conditions-Science Direct[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017,232:141-151.
- [17] 庄晓晖.强降雨秸秆覆盖黄土坡耕地土壤侵蚀过程及动力机制[D].北京:中国农业大学,2018.
- [18] 徐勤学,朱晓锋,方荣杰,等.秸秆覆盖对岩溶区坡耕地产

- 流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 22-26.
- [19] 盘礼东, 李瑞, 黎庆贵, 等. 黔西喀斯特区秸秆覆盖对坡耕地产流产沙特征的响应[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 9-16.
- [20] 彭旭东, 戴全厚, 李昌兰. 中国西南喀斯特坡地水土流失/漏失过程与机理研究进展[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 1-8.
- [21] 罗为群, 蒋忠诚, 韩清延, 等. 岩溶峰丛洼地不同地貌部位土壤分布及其侵蚀特点[J]. 中国水土保持, 2008, 2008(012): 46-49.
- [22] Bai X Y, Zhang X B, Chen H. Using Cs137 fingerprint technique to estimate sediment deposition and erosion rates from Yongkang depression in karsts region of Southwest China[J]. *Land Degradation and Development*, 2010, 21(5): 1-6.
- [23] Fu Z Y, Chen H S, Zhang W, et al. Subsurface flow in a soil-mantled subtropical dolomite karst slope: A field rainfall simulation study [J]. *Geomorphology*, 2015, 250: 1-14.
- [24] Wang Chenfeng, Wang Bin, Wang Yunqi, et al. Impact of near-surface hydraulic gradient on the interrill erosion process [J]. *European Journal of Soil Science*, 2020, 71(4): 598-614.
- [25] 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.
- [26] 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, 2007, 15(4): 1-3.
- [27] 刘柳松, 任红艳, 史学正, 等. 秸秆覆盖对不同初始含水量土壤产沙过程的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 108-112.
- [28] 赵雨森, 魏永霞. 坡耕地保护性耕作措施的水土保持效应[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(6): 86-90.
- [29] 王升, 王全九, 董文财, 等. 黄土坡面不同植被覆盖度下产流产沙与养分流失规律[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 23-27.
- [30] Kinnell P I A. Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: A review[J]. *Hydrological Processes*, 2010, 19(14): 2815-2844.

(上接第 35 页)

- [38] 韩丹丹, 穆兴民, 高鹏, 等. 极端降水条件下大理河流域水沙特征对比分析[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(6): 61-68.
- [39] 陈妙金, 汪小钦, 吴思颖. 基于随机森林算法的水土流失影响因子重要性分析[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(4): 209-219.
- [40] 马波, 由政, 吴发启, 等. 种植大豆条件下土壤结皮对坡耕地径流和侵蚀产沙的影响[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(3): 16-23.
- [41] 郭雒敏, 李晓丽, 王文, 等. 坡度对紫红色砒砂岩击溅侵蚀的影响[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(1): 1-9.
- [42] Diyabalanage S, Samarakoon K K, Adikari S B, et al. Impact of soil and water conservation measures on soil erosion rate and sediment yields in a tropical watershed in the Central Highlands of Sri Lanka [J]. *Applied Geography*, 2017, 79: 103-114.
- [43] 李铁, 湛芸, 何丙辉, 等. 天然降雨下川中丘陵区不同年限植物篱水土保持效用[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 27-35.
- [44] 周蓓蓓, 陈晓鹏, 吕金榜, 等. 纳米碳对不同植被覆盖下黄土坡地降雨侵蚀的抑制效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 116-124.
- [45] 孙金伟, 张冠华, 杨贺菲, 等. 坡耕地水土流失防治新材料 W-OH 固化剂对大豆和玉米生长特性的影响[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(3): 37-39, 45.
- [46] 任雨之, 郑江坤, 付滢, 等. 不同耕种模式下遂宁组紫色土坡耕地产流产沙特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 32-40.
- [47] 姜浩. 大豆干旱胁迫的水氮利用及不同水文年型的灌溉制度研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
- [48] 吴发启, 范文波. 土壤结皮对降雨入渗和产流产沙的影响[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(2): 97-101.
- [49] 王计磊, 吴发启. 不同生长期大豆坡耕地土壤抗侵蚀能力特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(6): 1389-1398.
- [50] 徐宁, 吴发启, 杨一凡, 等. 大豆调节坡耕地径流和泥沙作用研究[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 42-48.