

岩溶区免耕和翻耕措施对裸坡耕地产流产沙过程的影响

方荣杰^{1,2}, 朱晓锋¹, 徐勤学^{1,4}, 江斌伟¹, 韩旭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, 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. 华中农业大学资源与环境学院 武汉 430070; 4. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测站, 广西 环江 547100)

摘要: 为揭示不同耕作措施对岩溶地区坡耕地产流产沙的影响, 采用独立设计土槽、室内人工模拟降雨的方法, 通过设定一定雨强下研究不同耕作措施对西南岩溶区裸坡耕地径流与土壤流失特征。结果表明: 雨强为 63 mm/h, 坡度小于 10°时, 翻耕措施能够加快地下孔隙的产流时间, 而免耕能够滞缓其产流, 翻耕的产沙量为免耕的 66%; 当坡度大于 10°时, 翻耕措施能够延缓地下孔隙的产流时间, 而免耕则加速其产流, 翻耕的产沙量分别为免耕的 16% 和 6%。雨强为 100 mm/h, 坡度小于 10°时, 随着坡度的增大, 翻耕措施会加速地下孔隙流的汇流过程, 免耕的产沙量是翻耕的 41%; 坡度大于 10°时, 翻耕措施能延缓地表径流的汇流过程, 且翻耕的产沙量为免耕的 68% 和 0.9%。同一坡度和雨强下, 翻耕措施较免耕措施可减少土壤随径流流失。

关键词: 西南岩溶区; 免耕措施; 翻耕措施; 径流; 土壤流失

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2017)01-0068-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.01.012

Research on the Influence of No-till and Ploughing Measures on the Process of the Runoff and Sediment of Slope Farmland in Karst Region

FANG Rongjie^{1,2}, ZHU Xiaofeng¹, XU Qinxue^{1,4}, JIANG Binwei¹, HAN Xu³

(1. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004; 2. Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004; 3. Institute of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070; 4. Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Science, Huanjiang, Guangxi, 547100)

Abstract: In order to reveal the influences on the runoff producing and sediment on the hillslope which were exerted by different tillage measures in Karst region, the researchers used independent designed soil storehouse and indoor simulated rainfall measures, set particular rainfall intensity to study the features of runoff and the soil loss of the naked slope farmland in Karst region. The results showed: When the rainfall intensity was 63 mm/h and the declivity was less than 10°, ploughing measures could decrease the time of runoff producing of underground pores, and no-till could slow down its runoff producing, and its sediment yield was 66% of no-till. Otherwise, it conversed when the declivity was greater than 10°, and the sediment yield of ploughing were 16% and 6% of no-till separately. When the rainfall intensity was 100 mm/h and the declivity was less than 10°, the ploughing measures could speed up the confluence process of surface runoff on slopes, and the sediment yield of no-till was 41% of ploughing. Otherwise, it conversed when the declivity was greater than 10°, and the sediment yield of ploughing were 68% and 0.9% of no-till separately. In the circumstance of the same declivity and rainfall intensity, ploughing measures could decrease the loss of soil with surface runoff.

Keywords: the southwest karst area; no-till measures; ploughing measures; runoff; soil loss

我国西南地区岩溶广布, 在高温多雨的亚热带气候条件作用下, 加之人们不合理的利用, 农耕方式落后, 使得该地区本来土层就薄, 砂石较多的地表容易造成石漠化影响耕作^[1-4]。人类长久的耕作等活动改

变了下垫面性质, 直接或间接影响了径流, 加之复杂的水力侵蚀, 石漠化形势日趋严峻^[5-7]。随着少耕、免耕等保护性耕作措施的推广应用, 对耕作措施与土壤水蚀之间的关系的认识也不断深入。Leys 等^[8]在分

收稿日期: 2016-09-27

资助项目: 国家自然科学基金项目(41301289); 广西矿冶与环境科学实验中心项目(KH2012ZD004); 广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目(002401013001)

第一作者: 方荣杰(1966—), 男, 广西桂林人, 研究员, 硕士生导师, 主要从事水资源可持续利用与水环境保护研究。E-mail: glfrj@126.com

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

析大量文献的基础上总结了常规耕作和保护性耕作 2 种耕作措施对产流产沙的影响,结果表明保护性耕作措施下坡地径流量是常规耕作的 0.35~0.94 倍,产沙量是常规耕作的 0.14~0.52 倍。Schuller 等^[9]的研究结果表明在常规耕作措施转为免耕后,坡地发生土壤侵蚀的面积减少 43%,土壤侵蚀量减少 87%。同时,研究者通过试验认为耕作破坏了土壤中大孔隙的连通性从而减少大孔隙流的产生^[10],因此,在免耕和少耕措施下,降雨过程中土壤入渗率显著增加^[11]。

目前我国对于岩溶地区土壤侵蚀过程及其机制方面的研究较多。张信宝等^[12]认为岩溶坡地土壤地下流失主要表现为土壤以蠕滑或错落等形式填充岩溶孔隙和孔洞,造成坡地地面溶沟、溶槽、洼地和岩石缝隙内的土壤沉陷;唐益群等^[13]认为团聚体的崩解和离散形成的细颗粒物容易沿着土间孔隙和岩溶裂隙向地下空间迁移,引起土壤地下流失;罗为群等^[14]在分析岩溶峰丛洼地不同地貌部位土壤侵蚀特点时指出,在坡面上土壤流失以地下漏失为主;而研究人员对耕作措施与岩溶坡地土壤水蚀过程之间的关系很少涉及,其特殊地形使在黑土区、黄土区等的研究成果无法适用^[15-18]。因此,本试验采用室内人工模拟降雨^[19-21],以裸坡为研究对象,通过模拟翻耕和免耕 2 种措施,比较 2 种条件下的产流产沙状况,以期明确耕作措施对岩溶坡地石灰土的坡面径流和产沙的影响,为岩溶坡耕地的合理利用和水土保持治理提供科学依据。

1 研究方法

本试验在中国科学院环江喀斯特农业生态试验站的模拟降雨实验室内进行,试验装置有上喷式模拟降雨系统和人工土槽。采用上喷式模拟降雨系统,高度为 6 m,有 4 个喷头,在水泵的配合下可组成产生不同强度的雨强,雨滴降落到地面的终点速度达到自然降雨雨滴的 90%以上,降雨均匀系数均在 0.8 以上,达到室内降雨的要求,有效范围在半径 2 m 的圆形区域内,试验设计以降雨雨强和降雨历时作为岩溶区的降雨特性指标,每场降雨历时 60 min,结合模拟降雨系统的实际情况,雨强分别为 63,100 mm/h,即翻耕和免耕的试验设计雨强因子分别为 63,100 mm/h。人工土槽为长 2 m,宽和高均 1 m 的长方体,坡度可调节,范围在 0°~20°。土槽底板均匀分布地打 6 个孔,作为地下孔隙,孔的直径为 5 cm,在土槽的下端安装了“V”形地表集流槽,集流槽通过连接水管收集径流到集流桶里,以便收集地表产生的径流和产沙到统一编号的集流桶里。在土槽的下端一侧安装了壤中流集流管,通过连接水管将产生的径流直接流到统一编号的集流桶里。在土槽的底板打孔处焊接了可以安装阀门的钢管,在阀门上连接水管以便收

集径流到集水桶里。

试验所用土壤均取自试验站内的坡耕地,为石灰土,经自然风干后,过 5 mm 筛,试验装土厚度为 30 cm,分 3 层装填,每层 10 cm,在试验土槽的内面壁提前画好边界线,按照在供试土壤的取样地所测容重 1.27 g/cm³ 装填,由此容重和装土体积计算得出每层应该装填供试土壤的重量,装土之前,先将底板的孔隙阀门合上,在孔口的底板面上铺上滤网和砂,然后进行装土,每装填完一层,用自制的铁板对土层进行均匀地压实,填土边界也要仔细地进行压实,减免边界效应的影响,在装填下一层之前,均对先前装填好的一层进行刮毛,可以使上下两层之间能很好地接触,防止了土层之间出现分层现象。

试验采用控制变量对比法。在室内进行模拟降雨,在试验槽中设置翻耕小区和免耕小区,设计降雨强度分别为 63 mm/h 和 100 mm/h,坡度变化为 5°,10°,15°,比较 2 个小区的初始产流时间、径流量、产流过程及土壤流失量。

2 结果与分析

2.1 不同耕作措施在不同雨强下初始产流时间

由于岩溶地区地质地貌的“二元结构”,裸坡耕地产流存在沿坡面的地表产流、壤中流以及沿地下孔隙的产流。从图 1 可以看出,将雨强设置为 63 mm/h,改变坡度,经过翻耕的土壤与免耕的土壤的地表径流与壤中流初始产流时间均有差别。坡度为 5°时,免耕措施对地表径流、壤中流及地下孔隙产流初始时间影响不大。坡度为 10°时,产流状况与 5°坡类似,差距分别为 8%,26%和 35%。坡度为 15°时,情况与 5°,10°相反,即免耕土壤的地表径流与地下孔隙产流时间早于翻耕土壤 47%和 130%,壤中流产流时间晚于翻耕土壤 67%。由此表明,在 63 mm/h 雨强下,在 10°以下的土坡翻耕,地表径流变化不明显,而地下孔隙快速产流,加快雨水流失;在 10°以上的土坡翻耕,则可以减缓地下孔隙产流,减少雨水流失。

将雨强设置为 100 mm/h,从不同耕作措施下不同径流的初始产流时间(图 2)可知,当坡度为 5°时,免耕土壤的地表径流产流时间与翻耕土壤的地表径流产流时间基本一致,壤中流与地下孔隙的产流时间则晚于翻耕土壤,差距为 7%和 50%。坡度为 10°时,免耕土壤的地表径流产流时间晚于翻耕土壤 22%,壤中流和地下孔隙产流时间早于翻耕土壤 53%和 21%。坡度为 15°时,免耕土壤的地表径流与地下孔隙产流时间早于翻耕土壤 64%和 26%,壤中流则晚了 75%。由此表明,在 100 mm/h 雨强下,10°以下坡度,翻耕和免耕措施对地表径流和壤中流产流时间影响不明显。10°以上坡度,翻耕能使地下产流滞后,减少地下水分的流失。

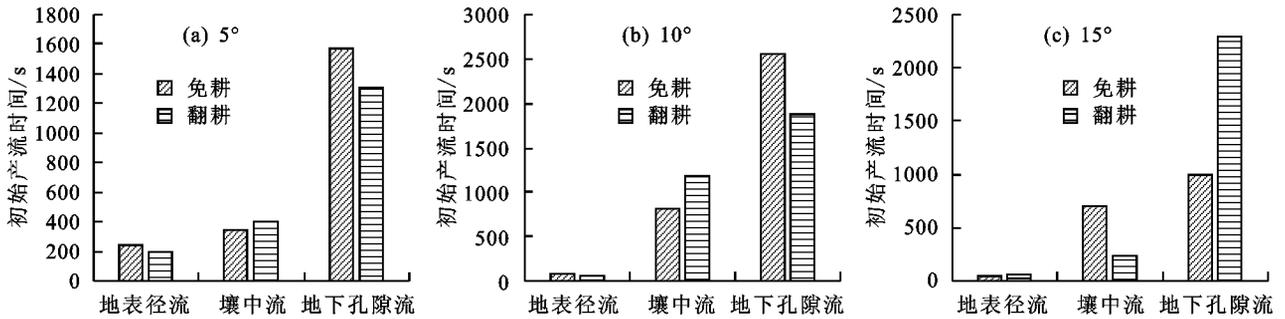


图 1 不同耕作措施在 63 mm/h 雨强下的初始产流时间

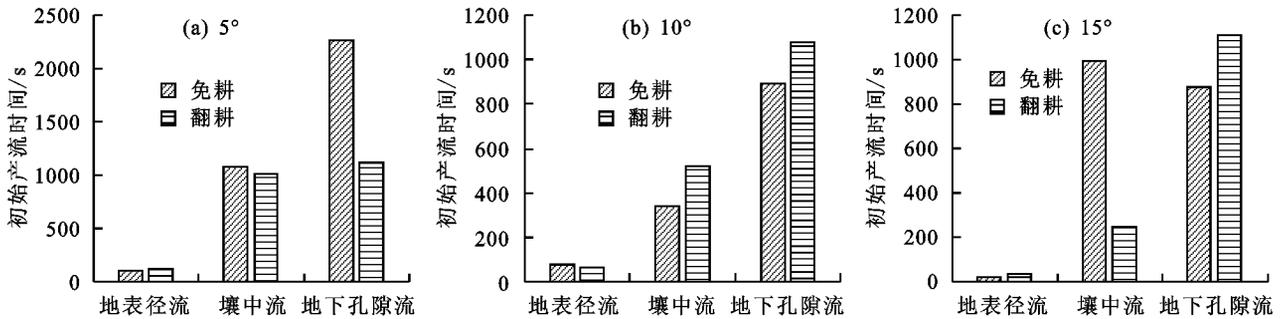


图 2 不同耕作措施在 100 mm/h 雨强下的初始产流时间

2.2 不同耕作措施在不同雨强下径流量

由图 3 可知,当雨强为 63 mm/h 时,3 个坡度下,翻耕土壤的径流过程均以壤中流及地下孔隙径流为主,免耕土壤均以地表径流为主。坡度为 5°时,翻耕土壤的地表径流量为免耕土壤的 1.3%,壤中流及地下孔隙径流量则分别是免耕土壤的 2.4 倍和 4.2 倍。坡度为 10°时,翻耕土壤的地表径流为免耕土壤的 1.4%,壤中流为免耕土壤的 13 倍,地下孔隙流量达到 15 694 ml,免耕土壤仅为 72 ml。坡度为 15°时,翻耕土壤地表径流流量为免耕土壤的 2%,壤中流及地下孔隙流量分别为 30 626 ml 和 4 400 ml,免耕土壤则只达到 429 ml 和 253 ml。由此表明,63 mm/h 雨强下,翻耕可有效减少降雨形成地表径流,减少随地表径流流失的土壤,但是也会促进降雨随地下水流

流失。当设定雨强为 100 mm/h 时,情况与 63 mm/h 雨强的情况相似(图 4)。在 3 个坡度下,翻耕土壤的径流过程均以壤中流及地下孔隙径流为主,免耕土壤均以地表径流为主。坡度为 5°时,翻耕土壤的地表径流流量为免耕土壤的 7%,壤中流及地下孔隙径流流量则分别比免耕土壤多了 20% 和 13 倍。坡度为 10°时,翻耕土壤的地表径流为免耕土壤的 2%,壤中流与地下孔隙流量分别是免耕土壤的 1.9 倍和 2.8 倍。坡度为 15°时,翻耕土壤地表径流流量为免耕土壤的 2%,壤中流及地下孔隙流量分别为 77 535 ml 和 22 553 ml,免耕土壤则只达到 710 ml 和 332 ml。由此表明,100 mm/h 雨强下,翻耕可有效减少降雨形成地表径流,减少随地表径流流失的土壤,但是也会促进降雨随地下水流流失。

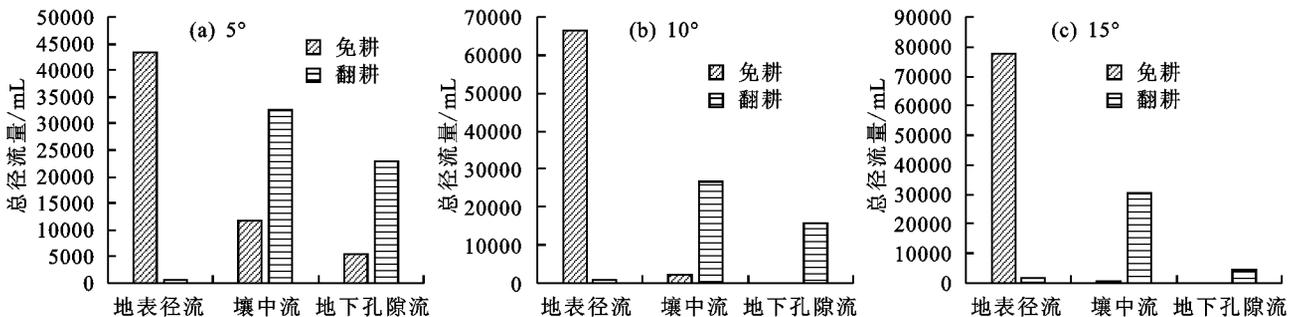


图 3 不同耕作措施在 63 mm/h 雨强下的径流量

2.3 不同耕作措施在不同雨强下产流过程

2.3.1 地表径流过程

在地表径流过程中,雨强为 63 mm/h,不同坡度下不同耕作措施的地表径流过程变化存在较大差异(图 5)。其中,雨强为 63 mm/h,坡度为 5°时,翻耕的在产流初始后径流量相对稳定,

而免耕的在初始产流后至 24 min 内径流量持续快速增长,之后径流量小幅上升直至降雨结束;在坡度为 10°时,翻耕的地表径流过程线出现明显波动,而免耕的径流过程线较紊乱,在初始产流后至 30 min 内径流量持续快速增加,在此之后径流量在一定范围内上

下波动,较不稳定;在坡度为 15°时,翻耕的地表径流过程线从初始产流后均较稳定,而免耕的在初始产流

后至 18 min 内径流量持续快速增加,之后径流量总体上呈现小幅上升的趋势。

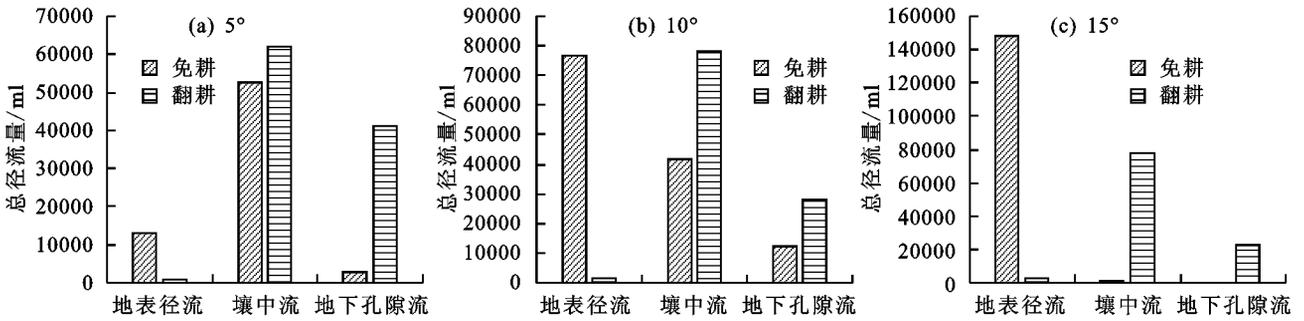


图 4 不同耕作措施在 100 mm/h 雨强下的总径流量

从图 6 可以看出,在雨强为 100 mm/h,坡度为 5°时,免耕的地表径流在初始产流至 18 min 内径流量持续上升后稳定产流量在 240 ml/min 左右,而翻耕的产流量在开始产流后就很快趋于稳定,稳定产流量为 18 ml/min 左右;在坡度为 10°时,免耕的在初始产流至 12 min 内径流量持续增长,而后总体上逐步趋于稳定在产流量为 1 500 ml/min 左右,翻耕的产流量在开始产流就很快趋于稳定,稳定产流量为 25 ml/min 左右;在坡度为 15°时,免耕的在初始产流至

12 min 内径流量持续上升,之后径流量逐步趋于稳定,稳定产流量为 2 900 ml/min 左右,翻耕的产流量在开始产流 12 min 后逐步趋于稳定,稳定产流量为 50 ml/min 左右。综上可知,翻耕的地表径流过程在各坡度下大致相似,除 10°坡有波动外,其余坡度均没有明显变化,产流量较小,达到稳定的时间较短;免耕土壤的地表径流过程在各坡度下大致相似,径流量在产流初期快速增长,后趋于稳定,但产流至稳定的时间不同,径流量比翻耕的大。

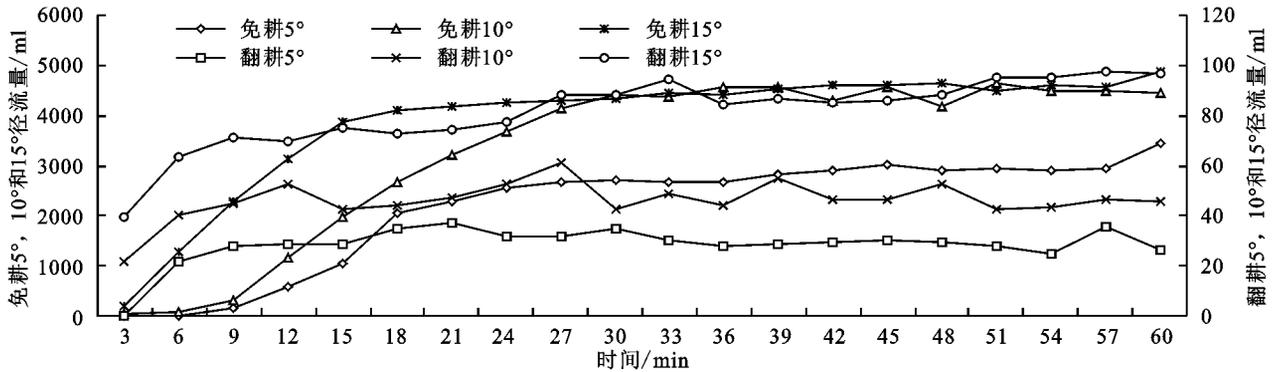


图 5 不同耕作措施在 63 mm/h 雨强下的地表径流过程

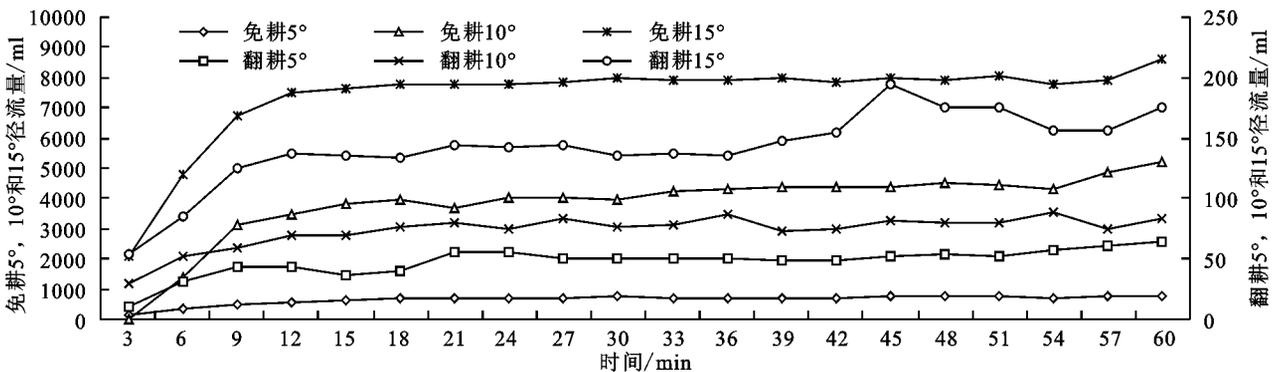


图 6 不同耕作措施在 100 mm/h 雨强下的地表径流过程

2.3.2 壤中流过程 从图 7 可以看出,当雨强为 63 mm/h 时,坡度为 5°时,翻耕与免耕的壤中流产流量在开始产流后均持续上升,而在免耕中,产流量自初始产流至 21 min 内快速增长,而后缓慢上升。在翻耕当中,产流量自初始产流至 39 min 内快速上升,在 39 min 之后产流量出现了小范围的波动;坡度为 10°

时,免耕的壤中流开始产流较翻耕的早 18 min,免耕的在 18 min 左右产流量基本趋于稳定,而翻耕的在开始产流后,产流量快速增长,直至 51 min 后产流量仍缓慢上升;坡度为 15°时,免耕的壤中流径流过程初始产流后趋于稳定,而翻耕的壤中流径流过程在开始产流后直至降雨结束,产流量持续上升,未表现出

稳定的趋势。由此表明,在 10° 和 15° 坡度下,翻耕土壤壤中流产量明显比免耕土壤产量大,且产量持续上升,未出现稳定的趋势,而在 5° 坡度下,免耕土壤的壤中流在30 min前处于最高水平,后趋于稳定,主要原因是岩溶地区特殊的地质构造,加之坡度较小,降雨容易下渗,而翻耕造成地面坑洼,使雨水不能均匀降落到地面,因而在壤中流汇流较慢。但免耕土壤壤中流过程易于趋向稳定,因此,翻耕对壤中流的径流过程影响更大。

由图8可知,当雨强为 100 mm/h 时,在不同坡度下,翻耕土壤在产流初期流量增长较快,后期逐渐趋于稳定;免耕土壤在 5° 坡时流量持续上升,没有稳定的趋势; 10° 坡时流量在产流初期快速上升,后期稳定; 15° 坡时,径流线基本没变化,且流量非常小。因此,在 10° 和 15° 坡度下,翻耕土壤的壤中流径流过程影响程度比免耕土壤的大,且其稳定产流量也大,而在 5° 坡度, 100 mm/h 雨强下,免耕土壤中的壤中流与翻耕的表现一致,径流量持续增加至后期超越了翻耕土壤的壤中流流量,原因可能是经过大雨强的淋蚀作用,形成了壤中流通道,进而促进了壤中流的生成。

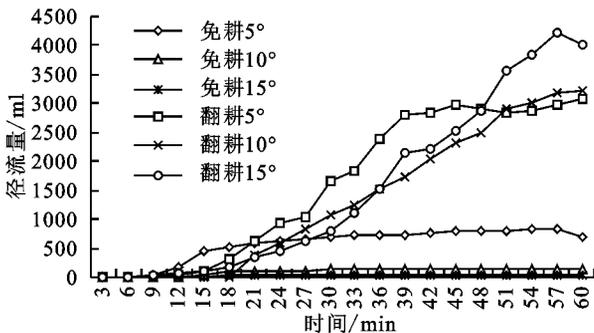


图7 不同耕作措施在 63 mm/h 雨强下的壤中流径流过程

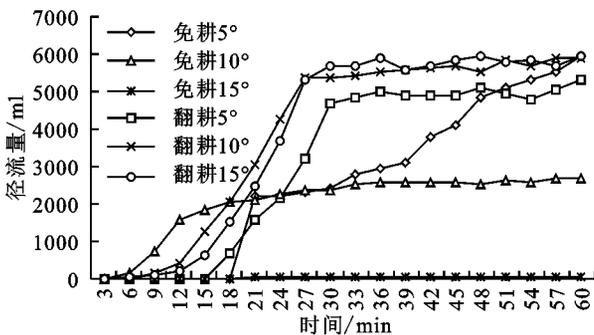


图8 不同耕作措施在 100 mm/h 雨强下的壤中流径流过程

2.3.3 地下孔隙径流过程 不同耕作措施在设定雨强下地下孔隙流的径流过程如图9所示,当雨强为 63 mm/h ,在坡度为 5° 时,翻耕与地下孔隙流径流过程线迅速增加,而免耕的地下孔隙流径流过程线增加缓慢,但翻耕的先于免耕的发生后流。坡度为 10° 时,翻耕土壤地下孔隙流量持续上升,没有稳定的趋势, 15° 时呈阶梯状,降雨末期流量出现下降。免耕土壤在坡度 5° 和 10° 时流量少且产流时间晚。

从图10可以看出,当雨强为 100 mm/h ,坡度为

5° 时,翻耕与免耕的地下孔隙流径流过程线存在着差异,翻耕的产流快。在坡度为 10° 时,翻耕与免耕的地下孔隙流径流过程线趋势大体相似,免耕的在初始产流至42 min内产流量持续上升,之后产流量逐步趋于稳定,稳定产流量为 300 ml/min 左右,翻耕的在初始产流至33 min内产流量快速增长,之后产流量逐步趋于稳定,稳定产流量为 750 ml/min 左右;在坡度为 15° 时,免耕的在整个降雨过程中均没有大的变化,而且产流量较小,翻耕的产流量明显较免耕的大,且翻耕的产流初期直至27 min内产流量快速增长,之后产流量基本趋于稳定,稳定产流量为 590 ml/min 左右。综上可知,在雨强为 100 mm/h ,3个坡度下,翻耕条件对地下孔隙流的影响均较未翻耕显著,加速了降雨从地下流失。

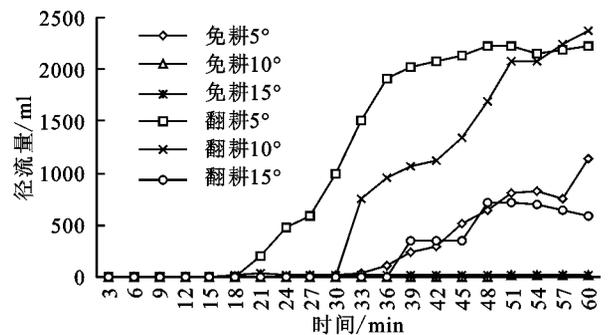


图9 不同耕作措施在 63 mm/h 雨强下的孔隙流径流过程

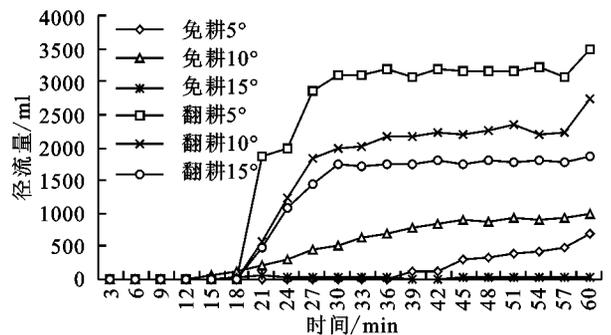


图10 不同耕作措施在 100 mm/h 雨强下的孔隙流径流过程

2.4 不同耕作措施在不同雨强下土壤流失量

耕作措施的不同对坡耕地产沙量具有显著影响(图11)。当雨强为 63 mm/h ,坡度为 5° 时,二者之间的产沙量差异不大,坡度为 10° , 15° 时,翻耕的分别为免耕的16%,6%;当雨强为 100 mm/h ,坡度为 5° 时,免耕的产沙量比翻耕的大,前者为后者的41%;坡度为 10° , 15° 时,翻耕的产沙量均比免耕的小,分别为后者的68%和0.9%;在相同的雨强和坡度下,翻耕土壤的产沙量均比免耕土壤少,随着坡度的增加,二者产沙量的差异逐渐增大,在 15° 坡时最明显。原因可能是试验用土本身就有少许扰动,而且翻耕过后,在地表形成细小的沟壑能够在一定程度上起到蓄水和减缓水流速的作用,从而有效防止了水土流失,相反免耕的地表面相对平齐,随着坡度和雨强的增大,地表水流速也随之增大,进一步促进了水土流失的发生。

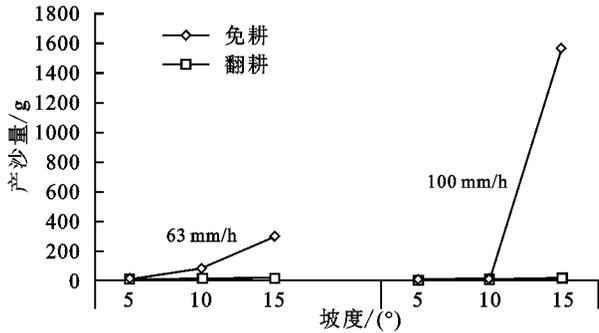


图 11 不同耕作措施在不同雨强下的产沙量

3 结论

(1)在不同雨强、不同坡度下,免耕和翻耕措施对地表产流初始产流时间影响甚微,而对壤中流和地下孔隙流影响较显著。在 63 mm/h 的雨强下,坡度小于 10° 时,翻耕措施会加速地下孔隙的产流时间,加快了雨水的流失,而免耕能够延缓其产流;当坡度大于 10° 时,翻耕措施能够延缓地下孔隙的产流时间,而免耕则加速其产流;当雨强为 100 mm/h 时,在坡度小于 10° 下,随着坡度的增大,翻耕措施加速了地下孔隙的汇流过程,在坡度大于 10° 下,免耕措施能够加速地下孔隙的汇流过程。

(2)在不同坡度、同一雨强下,免耕和翻耕措施对不同水文路径的产流量具有显著影响。在 63 mm/h 的雨强, 15° 坡时,翻耕土壤在地表的汇流量最大,在 5° 坡翻耕土壤在地表的汇流量最小;在 100 mm/h 的雨强, 15° 坡时,免耕土壤在地表的汇流量最大,在 5° 坡免耕土壤在地表的汇流量最小;随着坡度的增大,翻耕的壤中流越大,而免耕的壤中流和翻耕的地下孔隙流越小,免耕土壤的地下孔隙流变化不太明显。

(3)同一坡度、雨强下,翻耕措施较免耕能有效减少土壤随径流流失,与前人研究的少耕措施以及免耕措施更能够起到保水保土的作用不一致,原因是与岩溶区的水文地质结构以及土壤特性有关;有学者研究发现西南岩溶区的主要水文路径是壤中流以及深层渗漏,地表无明显径流和产沙,本文试验结果与此相似。

参考文献:

- [1] 田卫堂,胡维银,李军,等.我国水土流失现状和防治对策分析[J].水土保持研究,2008,15(4):204-209.
- [2] 宋同清,彭晚霞,杜虎,等.中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策[J].生态学报,2014,34(18):5328-5341.
- [3] 张信宝,王世杰,孟天友.农耕驱动西南喀斯特地区坡地石质化的机制[J].地球与环境,2010,38(2):123-128.
- [4] 黄刚.重庆市喀斯特山地农耕地水土流失特征及其影响因素分析[D].重庆:西南大学,2009.
- [5] 李孝良,陈效民,周炼川,等.西南喀斯特石漠化过程对土壤水分特性的影响[J].水土保持学报,2008,22(5):198-203.
- [6] 盛茂银,刘洋,熊康宁.中国南方喀斯特石漠化演替过程

中土壤理化性质的响应[J].生态学报,2013,33(19):6303-6313.

- [7] 李阳兵,罗光杰,白晓永,等.典型峰丛洼地耕地、聚落及其与喀斯特石漠化的相互关系:案例研究[J].生态学报,2014,34(9):2195-2207.
- [8] Leys A, Govers G, Gillijns K, et al. Scale effects on runoff and erosion losses from arable land under conservation and conventional tillage: The role of residue cover[J]. Journal of Hydrology, 2010, 390(3/4):143-154.
- [9] Schuller P, Walling D E, Sepulveda A, et al. Changes in soil erosion associated with the shift from conventional tillage to a no-tillage system, documented using ^{137}Cs measurements[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 94(1):183-192.
- [10] Cameira M R, Fernando R M, Pereira L S. Soil macropore dynamics affected by tillage and irrigation for a silty loam alluvial soil in southern Portugal[J]. Soil & Tillage Research, 2003, 70(2):131-140.
- [11] Alvarez R, Steinbach H S. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas[J]. Soil & Tillage Research, 2009, 104(1):1-15.
- [12] 张信宝,王世杰,贺秀斌,等.碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失[J].地球与环境,2007,35(3):202-206.
- [13] 唐益群,张晓辉,周洁,等.喀斯特石漠化地区土壤地下漏失的机理研究:以贵州普定县陈旗小流域为例[J].中国岩溶,2010,29(2):121-127.
- [14] 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,2008,12(2):46-49.
- [15] Chen S Q, Xue J F, Du X D, et al. Comparisons of protein composition of grains at different positions in panicles between erect and curved panicle type japonica rice[J]. Agricultural Biotechnology, 2015, 4(6):1-6, 9.
- [16] Zhang B B, Ma R J, Zhang C H, et al. Effect of bag removing with reflective film mulching before harvest on fruit coloration and expression of anthocyanin related genes in peach[J]. Horticultural Plant Journal, 2015, 1(3):139-146.
- [17] 王艳萍,王力,韩雪,等.黄土塬区不同土地利用方式土壤水分消耗与补给变化特征[J].生态学报,2015,35(22):7571-7579.
- [18] 温磊磊,郑粉莉,杨青森,等.雨型对东北黑土区坡耕地土壤侵蚀影响的试验研究[J].水利学报,2012,43(9):1084-1091.
- [19] 赵玉丽,牛健植.人工模拟降雨试验降雨特性及问题分析[J].水土保持研究,2012,19(4):278-283.
- [20] 刘正堂,戴全厚,倪九派,等.喀斯特地区裸坡面土壤侵蚀的人工模拟降雨试验研究[J].水土保持学报,2013,27(5):12-16.
- [21] 栾莉莉,张光辉,刘如心,等.人工模拟降雨水质对土壤入渗性能的影响[J].水土保持学报,2015,29(2):122-127.