

等高耕作对不同坡度坡面土壤侵蚀过程的影响

陆淑宁^{1,2}, 张泽瑜^{1,2}, 李荣融³, 吴发启^{1,3}, 张宁³, 杨佳乐³

(1.黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;3.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100)

摘要: 等高耕作是一种典型的农业耕作措施,通过影响坡面填洼、入渗等进而影响坡耕地坡面土壤侵蚀过程。通过人工模拟降雨试验,设计降雨强度(90 mm/h)、5 个地表坡度(3°,5°,10°,15°,20°)以及 2 种坡面处理(等高耕作和平整坡面),对径流强度、侵蚀率、径流含沙量、减流减沙效益等指标进行综合对比分析,与平整坡面进行比较,探究了黄土高原坡耕地等高耕作措施对坡面土壤侵蚀过程的影响。结果表明:(1)与平整坡面相比,等高耕作明显延缓坡面初始产流时间,使初始产流时间延迟 11.58~31.91 min,随着坡度增大,等高耕作初始产流时间延长效应逐渐减弱。(2)等高耕作具有削弱径流强度和侵蚀率的作用,与平整坡面相比,等高耕作的坡面径流强度、侵蚀率和径流含沙量分别减少 11.77%~94.92%,20.69%~99.27%和 2.46%~88.40%。但等高耕作减少产流产沙能力有限,若坡面发生断垄,等高耕作坡面的径流强度、侵蚀率、径流含沙量都可能接近或大于平整坡面。(3)在降雨过程中,累计产沙量与累计径流量之间满足线性正相关关系,等高耕作累计产沙量随累计径流量的增大幅度始终小于平整坡面。(4)等高耕作在不同坡度均具有较好的减流减沙效益,减流与减沙效益分别可以达到 45.35%~100%与 58.92%~100%,且减沙作用明显优于减流作用。研究结果揭示了等高耕作对坡面侵蚀过程的影响机制,为坡耕地土壤侵蚀治理提供科学依据。

关键词: 等高耕作; 坡度; 产流产沙; 人工模拟降雨

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2023)02-0037-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.02.005

Effects of Contour Tillage on Soil Erosion Process in Different Slope

LU Shuning^{1,2}, ZHANG Zeyu^{1,2}, LI Rongrong³, WU Faqi^{1,3}, ZHANG Ning³, YANG Jiale³

(1.State Key Labortory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100;

2.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;

3.College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Contour tillage is one of the typical agriculture tillage measures, which affects the soil erosion process of sloping farmland by affecting the slope filling and infiltration. In this study, the rainfall intensity (90 mm/h), five surface slopes (3°, 5°, 10°, 15°, 20°) and two types of slop treatments (contour tillage and flat slop) were designed through artificial simulated rainfall experiments, comprehensive comparison and analyses of indicators such as runoff rate, sediment rate, runoff sediment concentration and runoff reduction and sediment reduction benefits were carried out, compared with the flat slope, the effects the contour tillage on soil erosion process of slopeing farmland on the Loess Plateau were explored. The results showed that: (1) Compared with flat slope, the initial runoff producing time on the slope was significantly delayed by 11.58~31.91 min under contour tillage. With the increase of slope, the effect of prolonged the initial runoff producing time under contour tillage was gradually weakened. (2) The runoff rate and sediment rate were weakened under contour tillage. Compared with flat slope, the slope runoff rate, sediment rate and runoff sediment concentration under contour tillage were reduced by 11.77%~94.92%, 20.69%~99.27% and 2.46%~88.40%, respectively. However, the ability of contour tillage to reduce runoff and sediment production is limited, and the runoff tate, sedimeat rate and runoff sediment concentration under contour tillage slope may

收稿日期: 2022-07-04

资助项目: 国家自然科学基金项目(41977065); 国家重点实验室开放基金项目(K3050219171)

第一作者: 陆淑宁(1999—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 15698620077@163.com

通信作者: 吴发启(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持研究。E-mail: wufaqi@263.net

be closed to or greater than that of the flat slope if ridge breaking occurs on the slope. (3) In the process of rainfall, the relationship between the accumulated sediment production and the accumulated runoff meet the linear positive correlation, and the increase of the accumulated sediment production with the accumulated runoff under contour tillage is always smaller than that of flat slope. (4) The contour tillage has good benefits of runoff and sediment reduction on different slopes, the benefits can reach 45.35%~100% and 58.92%~100% respectively, and the sediment reduction effect is obviously better than the runoff reduction effect. The results revealed the influence mechanism of contour tillage on slope erosion process, and provided a scientific basis for soil erosion control in slope farmland.

Keywords: contour tillage; slope; runoff and sediment production; artificial simulated rainfall

我国是世界上水土流失最严重的国家之一,黄土高原又因其复杂的自然地理和长期的精耕细作成为中国土壤侵蚀重灾区。坡耕地是黄土高原水土流失的主要策源地,其土壤侵蚀量占区域土壤总侵蚀量的 60%~80%^[1]。黄土区常见的土壤侵蚀类型,根据外营力不同可以分为水蚀、风蚀和重力侵蚀 3 种类型,其中,水蚀是黄土区分布最广、危害最大的侵蚀类型^[2]。耕作措施常常会造成地表凹凸不平,影响降雨入渗、雨水填洼等,同时也通过影响径流流向和汇流路径,干扰产流、产沙过程^[3]。选取合理的农业耕作措施对当地经济社会发展和农田的生态保护具有重大意义,但过度翻耕往往会造成地表裸露,土壤结构不稳定,加剧土壤侵蚀。等高耕作是在坡耕地上采用的一种集水蓄墒耕作技术,由于与径流方向垂直,能够增加入渗,改变坡面径流入渗过程,有效拦截地表径流量,从而减少泥沙剥离与搬运,成为被广泛运用的保护性耕作措施^[4-5]。赵龙山等^[6]通过研究黄土坡耕地不同微地形水土保持效应发现,等高耕作可以增加降雨入渗,拦蓄雨水,阻止径流形成,在一定程度上减少坡面水土流失;林超文等^[7]通过对紫色土的研究得出,等高耕作在中小雨强下对地表径流侵蚀的控制作用非常明显,但在雨强较大时,这种控制作用会减弱;杨爱民等^[8]研究认为,在坡耕地上采取等高耕作技术使土壤含水量提高 3.2%~8.8%,径流量减少 85%~100%,冲刷量减少 90%~100%。

除耕作措施外,坡度也是影响坡面产流产沙的重要地形因子。坡度通过影响入渗量,改变雨滴对地面的打击角度以及雨滴分散土壤颗粒的能力,进而影响坡面土壤侵蚀。坡度增加时,土壤入渗量减少,坡面流速增加,坡面径流动能增大,加剧土壤侵蚀^[9-10]。Zingg^[11]最早给出土壤侵蚀量与坡度之间的经验公式;陈正发等^[12]进行坡度对坡耕地土壤侵蚀作用的试验研究,得到在坡长和降雨强度一定时,坡面侵蚀泥沙量随坡度增大而增大的结论;Ao 等^[13]研究认为,坡度增大导致重力沿坡面的分力增大,最终使得坡面产流增多;王占礼等^[14]研究了模拟降雨条件下

黄土裸坡的土壤侵蚀规律,得到在坡度增大至一定程度后,土壤侵蚀量反而减小的结论。等高耕作是黄土区一种主要的耕作措施,有利于缓解土壤侵蚀的现状,起到固水保土的作用。本文以人工模拟降雨为条件,将耕作措施与坡度相结合,探讨等高耕作对不同坡度坡耕地径流和侵蚀产沙的影响,为明确等高耕作蓄水保土效益提供科学依据,为该地区耕作方式的合理选用提供确切的理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验装置与材料

本试验于 2021 年 7—9 月在陕西省咸阳市杨凌高新技术产业示范区(34°14′—34°20′N, 107°59′—108°08′E)西北农林科技大学资源环境学院水土保持工程实验室 5.0 m×1.4 m 的径流小区上进行。该地属于暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均降水量 635.1~663.9 mm,年降水量的 60%集中于 7—10 月,且多大暴雨,年平均气温 12.9℃。试验土壤为杨凌壤土,是由当地森林褐土经长期耕作和施用土肥形成的一种特殊土壤。试验土样的全氮(TN)含量为 0.89 g/kg,全磷(TP)含量为 1.22 g/kg,速效磷(AP)含量为 23.87 g/kg,铵态氮(NH₄⁺—N)含量为 10.37 g/kg,硝态氮(NO₃⁻—N)含量为 14.33 g/kg,砂砾、粉粒和黏粒分别占 30.0%,43.7%,26.3%。

模拟降雨试验采用中科院水土保持研究所生产的侧喷式降雨机,降雨均匀度可达 80%以上。降雨机由 1 个水箱(长 2.0 m×宽 2.0 m×高 1.5 m)、1 个水泵(2.2 kW)、供水管(内径 48 mm)、2 个支架(高 7 m)和 2 个侧面喷头组成,通过改变管道中的水压和喷头尺寸,可以将降雨强度调整在 30~120 mm/h,每个支架安装 1 个喷头,两者相距 5 m,降雨高度可以达到 7.5 m 以确保雨滴滴落终速可达到自然雨滴降落速度的 98%以上。

1.2 试验设计

等高耕作一般适用于 25°以下的坡耕地,在 3°, 5°, 10°, 15°, 20°径流小区上,分别进行降雨。通过对研究区域气象资料进行分析,本试验降雨强度设置为

90 mm/h,降雨时间设置为 40 min,每场降雨的总降雨量为 60 mm。同时选择传统耕作方式等高耕作作为降雨前处理,以平整坡面为对照。每种处理进行 2 次重复,共 20 场降雨。

- (1)等高耕作:在坡面上沿等高线,垂直于坡面走向,进行横坡垄作,其中,垄高约为 6 cm,垄间距约为 14 cm。
- (2)平整坡面:无耕作措施坡面,平整无任何地表高低起伏的状态。

每场降雨前使用遮雨布遮盖小区,并对降雨强度进行多次滤定,以确保降雨强度和均匀度达到试验要求。待其稳定后,迅速揭开覆盖在小区上的遮雨布并开始计时,降雨开始后记录坡面产流时间。坡面产流开始后,用塑料桶收集径流泥沙,间隔时间为 2 min,直到降雨结束。对样品称重后静置 24 h,倒掉上层清液后将泥沙冲洗到铝盒中,放入烘箱,烘箱设置为 105 ℃,24 h 烘干后称重,可得在取样历时内的产流量与产沙量。

1.3 数据分析

本试验利用 Excel 及 Origin 2021 软件进行数据分析与图表绘制。

2 结果与分析

2.1 坡面初始产流时间变化

由表 1 可知,无论是等高耕作还是平整坡面,改

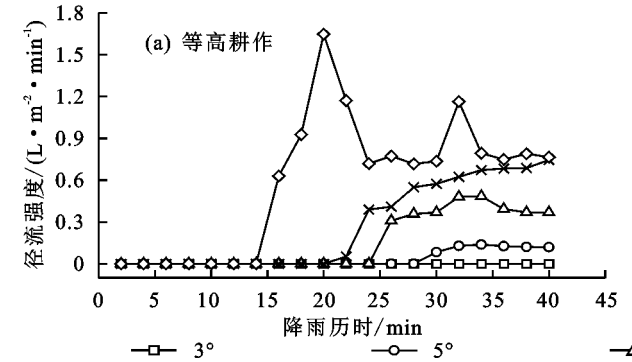


图 1 等高耕作和平整坡面下径流强度随降雨历时的变化

从图 2 可以看出,在 3°,5°,10°,15°坡时并未形成断垄情形下,等高耕作径流强度始终低于平整坡面,这表明等高耕作能够起到减小径流强度的作用。在 20°坡时,等高耕作存在以断垄时间为界的突变,垄体在被冲垮前,径流强度随降雨过程逐渐增大,却始终低于平整坡面,在降雨后 18~20 min 内发生断垄,断垄前径流强度为 0.928 L/(m²·min),断垄后径流强度逐渐增大,在 20 min 左右出现第 1 个峰值,为 1.648 L/(m²·min),然后急剧下降,之后在 32 min 左右出现第 2 个峰值,为 1.163 L/(m²·min),明显低于第 1 个峰值。这是因为在本次试验中,首先是径流小区中部的垄体被冲蚀,形成较大的细沟,径流经过细沟,积聚到出水口处的垄沟中,

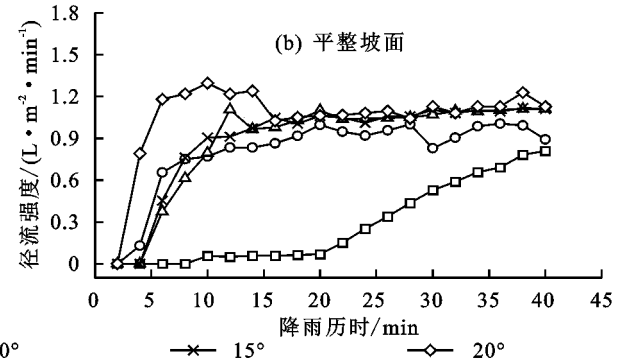
变坡面坡度即引起产流时间的变化,坡度越大,坡面初始产流时间越迟。在相同雨强、坡度条件下,等高耕作可以延缓初始产流时间,在 3°,5°,10°,15°,20°坡面,同一坡度坡面初始产流时间延迟 11.58~31.91 min,产生径流所用的时间分别增加 324.76%,87.87%,51.47%,42.96%,36.97%,说明等高耕作可以改变坡面初始产流时间,使坡面初始产流时间延长,且坡面坡度越小,延长作用越明显。

表 1 不同坡度下不同耕作方式初始产流时间

坡面处理	单位:min				
	3°	5°	10°	15°	20°
平整坡面	9.833	3.033	4.083	4.050	3.133
等高耕作	41.767	29.683	25.098	21.450	14.717

2.2 坡面产流产沙过程

2.2.1 坡面径流强度的变化过程 从图 1 可以看出,无论是等高耕作还是平整坡面,在降雨过程中产流后的一段时间内,随着产流历时的增加,不同坡度径流小区坡面径流强度基本呈现先增大后趋于稳定的变化趋势,其中,平整坡处理时,10°,15°,20°坡面的径流强度曲线变化区间接近且在降雨开始后 15~20 min 内逐渐趋于稳定,明显区别于 3°坡时的径流强度曲线;等高耕作坡面基本在降雨后 35 min 呈现稳定的趋势。在相同时刻,径流强度亦随坡度的增加而呈现增强趋势,说明坡度影响坡面径流强度的变化。



随着该处雨水的蓄积,出水口处的垄体被冲垮,径流强度急剧增大。其后 10 min 左右,小区中部又一垄体被冲垮,出现第 2 个峰值。说明发生断垄使等高耕作削弱坡面径流的能力减弱,使坡面径流强度在某些时刻大于或接近平整坡面径流强度。

2.2.2 坡面侵蚀率的变化过程 由图 3 可以看出,坡面侵蚀率表现为产流过程中的变化和坡度间的变化。从整体来看,随着产流的进行,各坡面侵蚀率基本表现为先增大再减小后逐渐稳定变化的趋势。其中以等高耕作 10°,15°坡面以及平整坡面 5°,10°时的曲线变化最为明显。在雨强和坡面处理均一致的情况下,各坡面侵蚀率随坡度的增大而增大,平整坡

面 3°,5°,10°,15°,20°坡面下,侵蚀率最大可以分别达到 0.350,1.139,1.563,2.990,5.509 kg/(m²·h);等高耕作处理坡面在产沙情况下,5°,10°,15°,20°坡面

侵蚀率最大可以分别达到 0.046,0.390,1.271,7.088 kg/(m²·h)。坡面侵蚀率在不同坡度下的差异说明坡度对坡面泥沙流失具有重要影响。

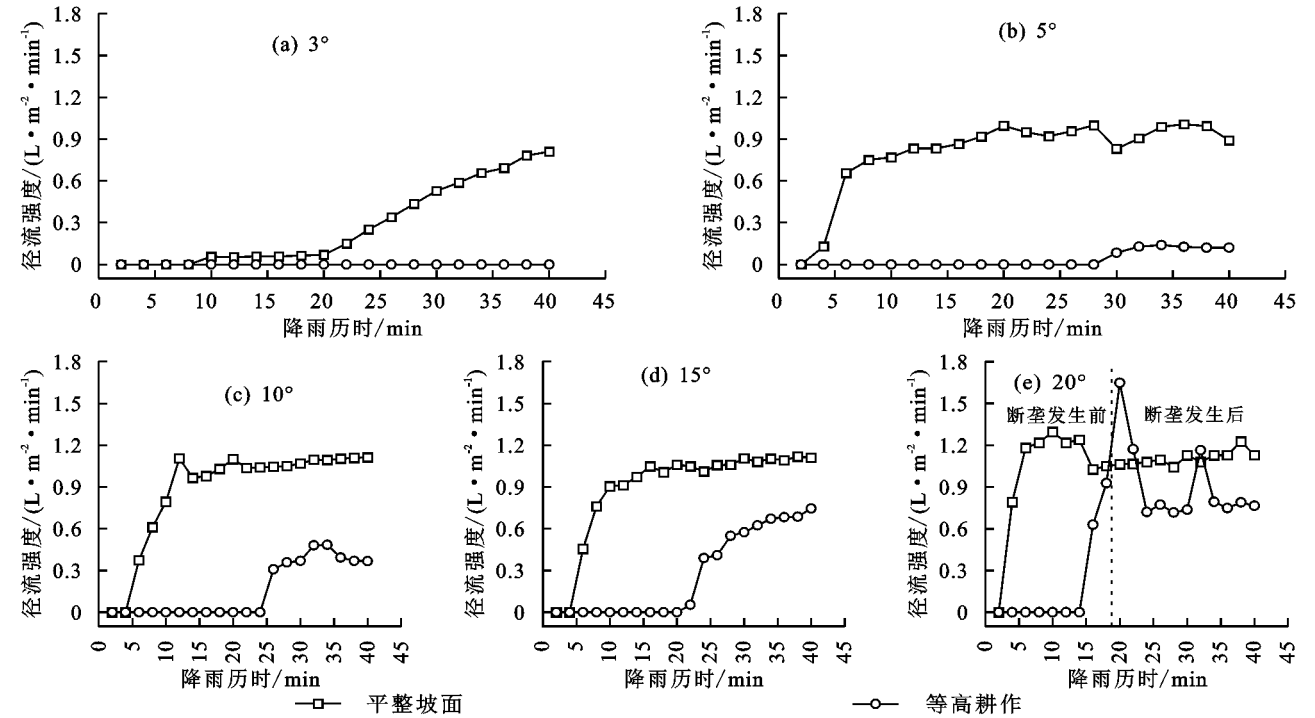


图 2 不同坡度下不同耕作方式径流强度随降雨历时的变化

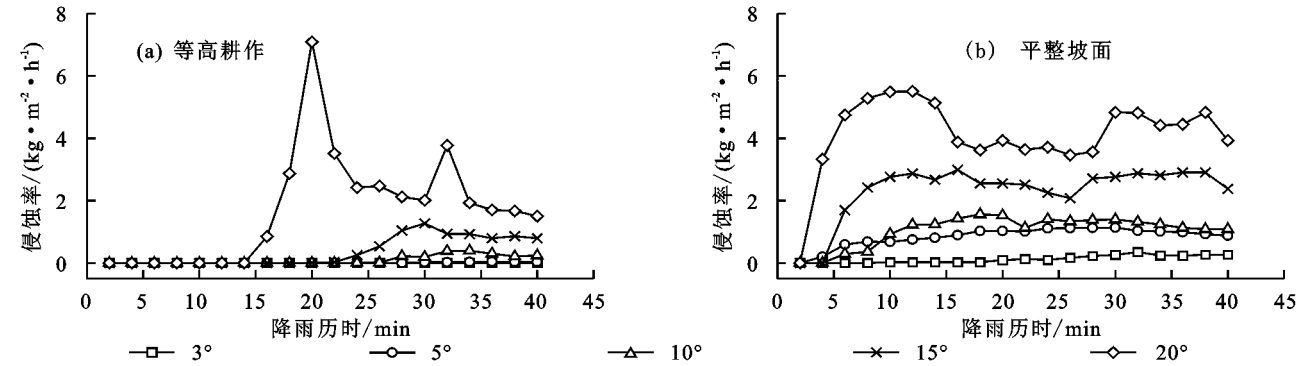


图 3 等高耕作和平整坡面下侵蚀率随降雨历时的变化

从图 4 可以看出,在断垄未发生时,等高耕作坡面侵蚀率始终低于平整坡面,在产沙开始后,等高耕作处理的 5°,10°,15°,20°坡面最多可以减少的侵蚀率分别为 97.56%,92.15%,99.14%,83.22%,说明等高耕作可以减小坡面侵蚀强度。在坡度为 20°时,等高耕作的侵蚀率在 20~25 min 时超过平整坡处理,出现第 1 个峰值,为 7.087 kg/(m²·h),这是由于该时间发生断垄,积蓄在垄沟内的雨水瞬间倾斜导致垄体被冲垮,断垄后的垄丘土体是该时段等高耕作坡面泥沙的主要来源,其值较平整坡面侵蚀率增加 80.43%;此后坡面侵蚀率急剧下降,在降雨历时 32 min 时到达第 2 个侵蚀率峰值,其值为 3.770 kg/(m²·h),但仍小于同时刻平整坡面侵蚀率;然后侵蚀率开始下降。

2.3 坡面水沙关系变化过程

2.3.1 坡面径流含沙量的变化过程 径流侵蚀输沙

过程受雨强、坡长、坡度等环境因素的影响,在时间空间上表现出不平衡性。坡面径流含沙量是指单位径流量中所含的泥沙量,从图 5 可以看出,坡面径流含沙量在到达峰值之后有 1 个明显的下降过程,且降雨过程中各坡度坡面径流含沙量变化波动较大,平整坡面下,3°,5°,10°,15°,20°坡面径流含沙量变化范围分别为 5.542~22.630,14.552~26.250,9.721~25.324,32.725~62.115,52.682~75.366 kg/m³;等高耕作产沙情况下,5°,10°,15°,20°坡面径流含沙量变化范围分别为 3.819~6.065,0.524~13.416,6.771~36.877,22.553~71.690 kg/m³,但随着降雨历时的进行,波动情况减缓。在相同时刻,径流含沙量整体上随坡度的增大而增大,等高耕作和平整坡面皆为如此。

不同坡度下等高耕作和平整坡面径流含沙量见图 6。从图 6 可以看出,除发生断垄的 20°坡面外,等

高耕作始终低于平整坡面的径流含沙量。在坡面产沙开始后,等高耕作处理的 5°,10°,15°,20°坡面最小可以达到平整坡面径流含沙量的 20.06%,0.02%,16.96%,35.78%。在 20°坡面,降雨开始后 20 min

时,由于发生断垄,等高耕作坡面的径流含沙量超过平整坡面的径流含沙量,达到 71.688 kg/m³;此后,等高耕作坡面的径流含沙量逐渐下降,并始终低于平整坡面的径流含沙量。

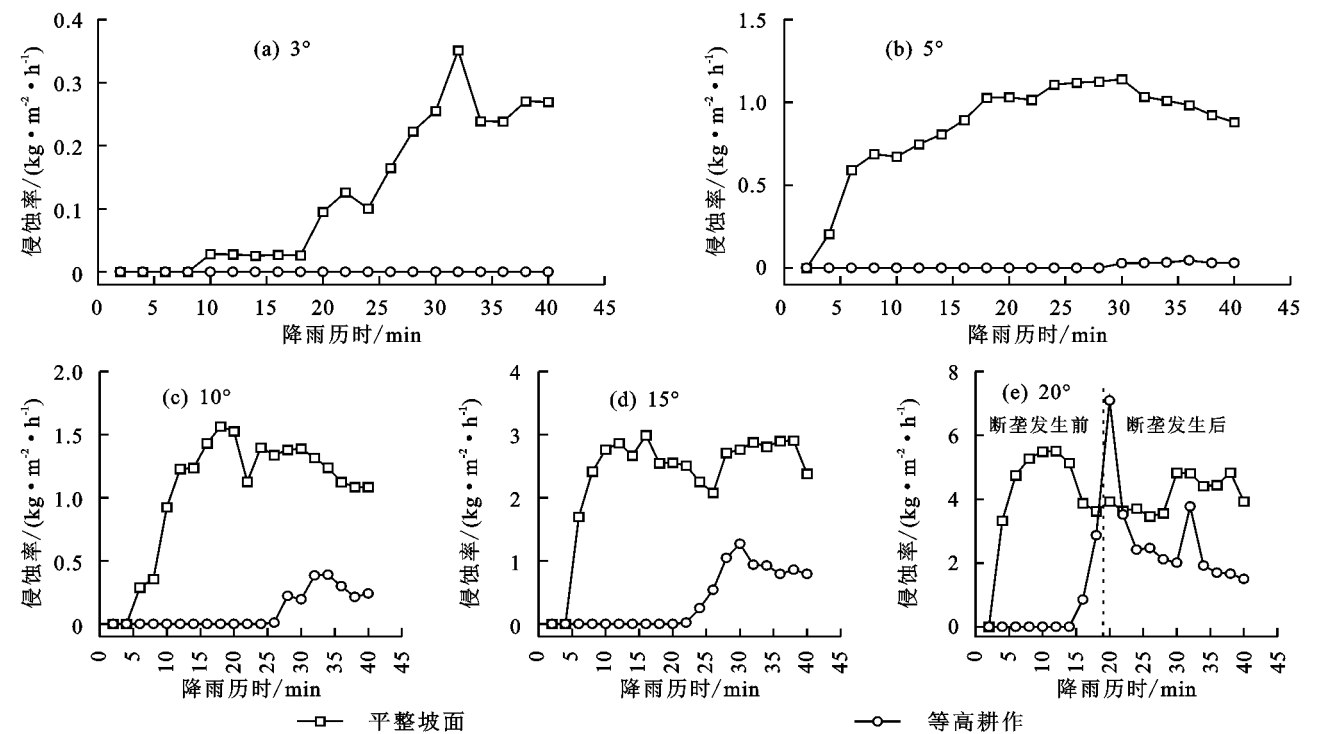


图 4 不同坡度下不同耕作方式侵蚀率随降雨历时的变化

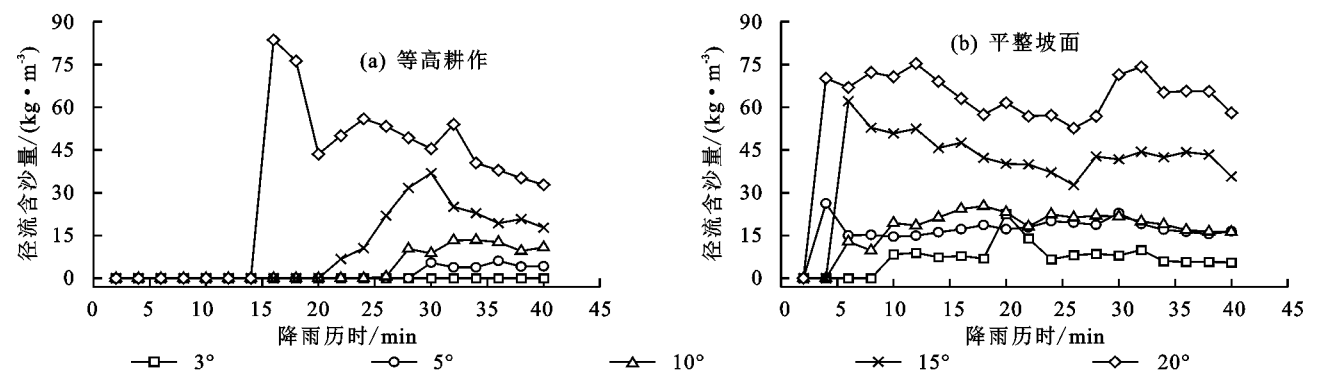


图 5 等高耕作和平整坡面下径流含沙量随降雨历时的变化

2.3.2 坡面累计产沙量和累计径流量相关关系 将不同坡度及不同坡面处理的累计产沙量和累计径流量进行回归分析(表 2)可以看出,坡面累计产沙量与累计径流量均呈现相关性较强的线性相关关系,决定系数均大于 0.98,这与很多研究^[15-17]结果一致,函数关系式为:

$$y=ax+b$$

式中: y 为累计产沙量(kg/m²); x 为累计产流量(L/m²); a 、 b 均为常数。

拟合方程的斜率 a 始终为大于零的常数,说明坡面累计产沙量随累计产流量的增大而增大。等高耕作和平整坡面在产流情况下, a 随着坡度的增大而增大,等高耕作和平整坡面增大幅度最大分别可达 161.48%,135.47%,表明坡度对坡面累计产沙量随累计产流量的

变化有较大影响。拟合方程系数(a)显示,在相同坡度条件下,平整坡面累计产沙量随累计径流量的增加幅度远大于等高耕作,5°,10°,15°,20°坡度下,平整坡面 a 值分别是等高耕作的 3.97,1.76,1.72,1.26 倍,说明等高耕作会改变坡面径流量对产沙量的影响。

2.4 等高耕作的减流减沙效益

由图 7 可知,对比平整坡面,等高耕作在 5 个坡度下的减流减沙效益均为正值,3°,5°,10°,15°,20°坡面下的减流效益与减沙效益分别为 100%,95.56%,82.31%,69.90%,45.35%与 100%,98.51%,90.73%,84.09%,58.92%,均有较好的蓄水保土效益。坡度始终对产流产沙呈现促进作用,等高耕作对产流产沙呈现抑制作用,二者相互影响,5 个坡度下的减流效益大小、减沙效益大小关系均表现为 3°>5°>10°>

15°>20°。由此可见,坡度较小时,等高耕作的水土保持效果较好。在产流产沙情况下,等高耕作的减沙

效益始终大于减流效益,其中以 15°坡度最为明显,减沙效益比减流效益高 14.19%。

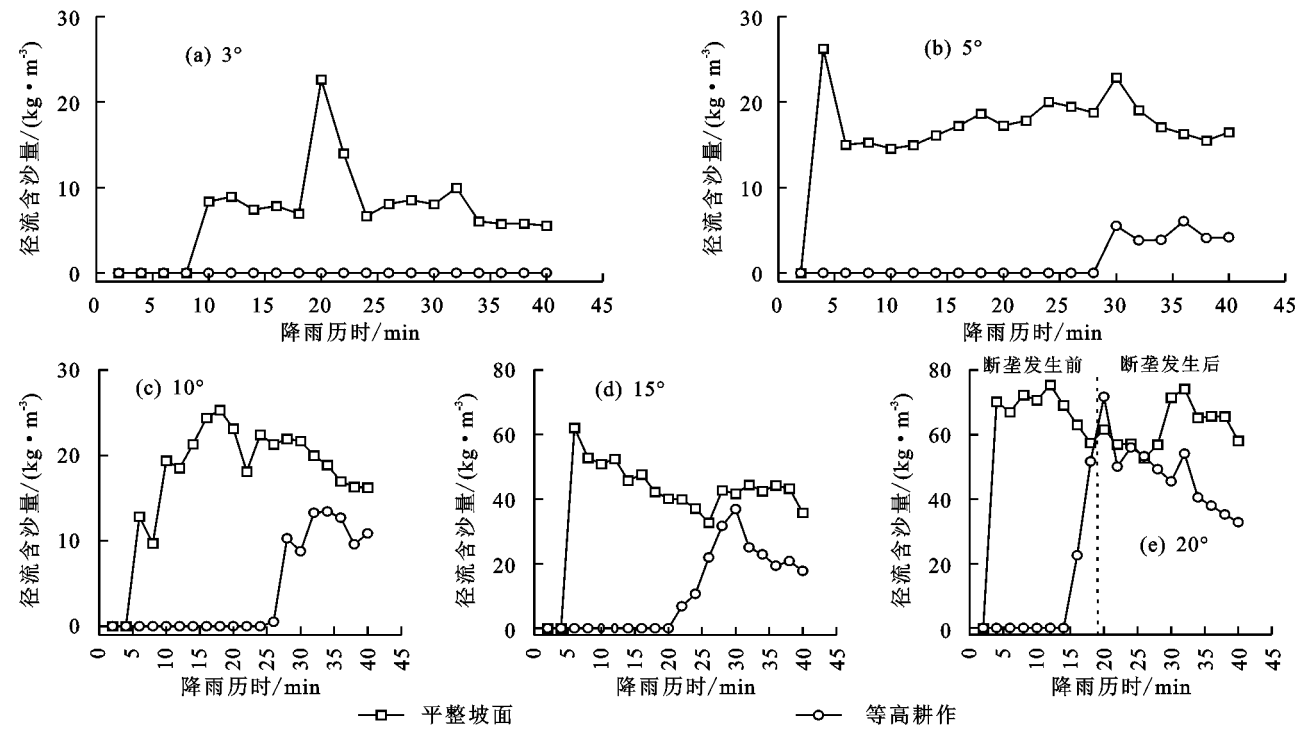


图 6 不同坡度下不同耕作方式径流含沙量随降雨历时的变化

表 2 坡面累计产沙量和累计径流量拟合关系

坡面处理	坡度/(°)	拟合方程	R ²
平整坡面	3	$y=7.6153x+2.475$	0.9896
	5	$y=17.9320x-11.271$	0.9984
	10	$y=20.8160x-14.038$	0.9980
	15	$y=42.1460x+59.835$	0.9984
	20	$y=63.7840x+52.655$	0.9989
等高耕作	5	$y=4.5113x+0.049$	0.9956
	10	$y=11.7960x-8.160$	0.9975
	15	$y=24.4980x-3.880$	0.9898
	20	$y=50.7760x+13.120$	0.9908

注: y 为累计产沙量(kg/m²); x 为累计产流量(L/m²)。

3 讨论

3.1 等高耕作对不同坡度坡面初始产流时间的影响

坡面初始产流时间是指从降水至坡面开始产流所消耗的时间,是衡量侵蚀产流过程的一个重要方面^[18]。随着坡度的增加,坡面初始产流时间基本呈现逐渐提前的趋势,这与耿晓东等^[19]、王保一等^[20]、张小娜等^[21]的研究结论一致。在雨强相同时,坡度增加致使雨滴降落坡面的垂直分力减小,沿坡面的分力增大,坡面入渗率减小,径流沿坡面运动速度加快,导致坡面径流出现越早。该试验中,平整坡面 15°和 10°产流时间极为接近,可能是由于在相同坡长条件下,随着坡度的增加,有效降雨面积减少,其产生的效果与增大坡度的效果相互抵消一部分,使得坡面初始

产流时间差异变小。等高耕作可以延缓坡面初始产流时间,这是由于等高耕作增加坡面微地形的起伏,阻碍径流的产生,且垄沟蓄水作用强,对水流的阻碍作用增加入渗,垄沟深度、容积均较大,降雨待垄沟蓄满之后才开始产流,而平整坡面由于土壤表面较为平坦,地表起伏小,坡面几乎无法积蓄雨水和阻挡径流,雨水更容易到达出水口而形成径流,因此相同坡度条件下,等高耕作的初始产流时间始终晚于平整坡面。

3.2 等高耕作对不同坡度坡面产流产沙过程的影响

在本试验中,坡面径流强度随降雨历时基本呈现先增大最后趋于稳定的趋势。在降雨初期,坡面土壤含水量逐渐增大并迅速达到饱和,实际降雨入渗损失减少,雨滴滴落在坡面形成径流,坡面径流强度迅速增大;在降雨后期,坡面产流一段时间后,坡面径流量基本达到稳定,径流强度呈现相对稳定的状态。相同雨强条件下,随着坡度的增加,促进坡面形成细沟侵蚀,细沟流量和流速均增加,径流强度随之增大^[22-23];且随着坡度增大,重力与雨滴降落坡面的力在坡面方向分力均增大,径流在坡面方向上的加速度越来越大,所以坡度增大使径流强度随之增大。等高耕作处理的坡面未发生断垄时,等高耕作的径流强度始终低于平整坡面。这是由于等高耕作形成的垄体有拦截降雨的作用,使得雨水汇集在垄内,且垄体能够有效减缓径流流速,明显削弱降雨过程中的地表径流^[24]。但在坡度陡时,雨水蓄满垄沟时,径流沿垄体上侧翻过并冲

刷垄肩,从而产生层状侵蚀,继而发生细沟侵蚀,当垄内汇集的雨水积聚到一定程度,便会发生断垄^[25],垄内汇集的雨水便会倾泻流出,径流较为集中,使得坡面径流强度大于或接近平整坡面径流强度。

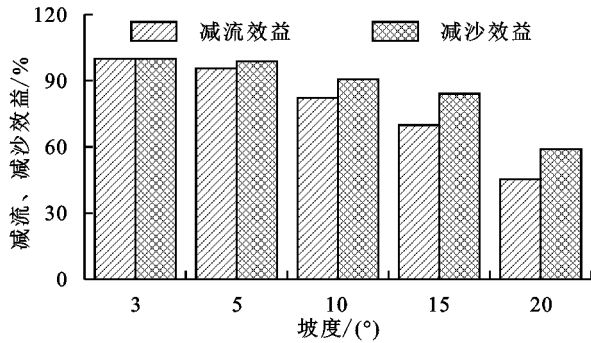


图7 不同坡度下等高耕作方式减流、减沙效益

在整个产流历程中,不同坡面侵蚀率均表现出先增大后减小至稳定的变化趋势,这可能是由于在产流初期,径流量逐渐增大,其携沙能力也相应变强,侵蚀率增加;随着降雨的进行,地表松散颗粒减少,在一定程度上阻碍侵蚀率的增加;降雨后期,土壤含水量和水分入渗趋于稳定,径流量趋于平稳,因此坡面侵蚀率逐渐稳定。在雨强相同时,坡度越大,坡面径流流速加大,雨水在坡面停留时间因此缩短,降雨入渗量随之变小,导致坡面径流量增大,在坡面流速和坡面径流量的共同作用下,使得坡面侵蚀能力增强,径流对土壤颗粒的分散作用及冲刷搬运能力增强^[26],所以坡面侵蚀率随坡度的增加呈现逐渐增大的趋势。等高耕作增加地表糙度,使地表微地形起伏增大,坡面泥沙沉积量相应增加,而无起伏的平坦地表几乎无拦蓄泥沙的作用,越高的泥沙淤积产生越少的泥沙损失^[27],所以等高耕作的侵蚀率始终小于平整坡面。而等高耕作若发生断垄,垄体本身会成为坡面侵蚀主要的物质来源,且此时坡面径流强度增大,加剧坡面侵蚀,使得坡面侵蚀率会在某些时刻高于平整坡面,但均值仍然小于平整坡面。

3.3 等高耕作对坡面水沙关系的影响

产流初期虽然径流强度较小,但此时地表松散颗粒较多,土壤结构疏松,且地表径流量小,所以含沙量较高;随着降雨过程的进行,雨滴滴落在土壤表面,水分下渗,土壤含水量增大,地表压实,减轻侵蚀强度,且此时的径流量变大,导致径流含沙量下降;当降雨后期径流强度和侵蚀率都趋于稳定时,径流含沙量的波动便随之变小。随着坡度的增大,土体稳定性降低,更容易被径流破坏侵蚀并搬运,且坡面细沟随坡度的增大而增多,使得细沟侵蚀加剧,侵蚀泥沙量则随之增大,表现为单位径流量中携带的泥沙量增加,

径流含沙量增大。等高耕作坡面的径流含沙量在未断垄下始终低于平整坡面,这是由于垄体未发生坍塌时,侵蚀泥沙主要是雨滴对垄体击溅剥蚀而产生的土壤碎屑物质,侵蚀泥沙量较小。而一旦垄体发生坍塌,坡面主要侵蚀物质转变为等高耕作形成的横坡垄,使得坡面侵蚀量瞬间增多,坡面径流含沙量随之增大。在降雨过程中,累计产沙量随累计径流量的增大而增大,这与吴淑芳等^[28]、张乐涛等^[29]的研究结果相一致,且增大幅度随坡度的增加而增大,这是因为径流是搬运泥沙的动力,且坡度越大,地表径流的流速越大,携带的泥沙量越多。等高耕作改变坡面径流量与侵蚀量,两者相互作用,使得坡面累计产沙量和累计径流量相关关系改变。

等高耕作具有较好的减流减沙效益,这是由于等高耕作条件下,将地表径流变为垄沟截留,减少雨水对垄上土壤的打击,从而减慢径流和土壤侵蚀过程。但等高耕作的减流减沙效益随着坡度的增大而减小,这可能是由于陡坡上的垄体需要分出比低坡度更多的力来平衡自身重力,导致垄体易于失稳垮塌破坏^[30-31],从而降低水土保持性能。本研究中等高耕作的减流减沙效益能够达到100%,是因为在坡面坡度为3°时,等高耕作措施在40 min内并未产流,而在实际的生产实践中,由于自然环境和人为因素等的制约,往往很难达到100%。

4 结论

(1)在90 mm/h雨强条件下,当垄高约为6 cm,垄间距约为14 cm时,等高耕作能明显延缓坡面初始产流时间,且坡度越小,延缓作用越明显。

(2)坡度影响坡面初始产流时间,坡度越大,坡面初始产流时间越短。等高耕作对不同坡度坡面的径流强度、侵蚀率、径流含沙量均有显著影响,在坡度较小时,等高耕作明显减小坡面的径流强度、侵蚀率和径流含沙量;而坡度较大时,坡面容易发生断垄,在坡面发生断垄的瞬间,等高耕作坡面的径流强度、侵蚀率、径流含沙量迅速增大,可能无限接近或大于平整坡面,但均值仍然小于平整坡面。

(3)等高耕作在不同坡度均具有较好的减流减沙效益,且减沙作用明显优于减流作用,但该效果随着坡度增大而减弱。在降雨过程中,不同处理坡面的累计产沙量与累计径流量之间满足不同程度的线性正相关关系。

综上所述,等高耕作对不同坡度坡面土壤侵蚀过程产生积极作用,但坡面坡度较大时,这种作用会减弱。

参考文献:

- [1] 唐克丽.黄河流域的侵蚀与径流泥沙变化[M].北京:中国科学技术出版社,1993.
- [2] 朱显谟.黄土区土壤侵蚀的分类[J].土壤学报,1956,4(2):99-115.
- [3] Gómez J A, Nearing M A. Runoff and sediment losses from rough and smooth soil surfaces in a laboratory experiment[J].Catena,2005,59(3):253-266.
- [4] Arnhold S, Ruidisch M, Bartsch S, et al. Simulation of runoff patterns and soil erosion on mountainous farmland with and without plastic-covered ridge-furrow cultivation in South Korea[J].Transactions of the ASAE, 2013,56(2):667-679.
- [5] 谢林好,白玉洁,张风宝,等.沙层厚度和粒径组成对覆沙黄土坡面产流产沙的影响[J].土壤学报,2017,54(1):60-72.
- [6] 赵龙山,宋向阳,梁心蓝,等.黄土坡耕地耕作方式不同时微地形分布特征及水土保持效应[J].中国水土保持科学,2011,9(2):64-70.
- [7] 林超文,陈一兵,黄晶晶,等.不同耕作方式和雨强对紫色土养分流失的影响[J].中国农业科学,2007,40(10):2241-2249.
- [8] 杨爱民,沈波.坡耕地垄作区田保水增产效益的研究[J].干旱地区农业研究,1997,15(4):6-9.
- [9] 杨勤科,赵牡丹,刘咏梅,等.DEM 与区域土壤侵蚀地形因子研究[J].地理信息世界,2009,7(1):25-31.
- [10] 苏远逸,李鹏,任宗萍,等.坡度对黄土坡面产流产沙过程及水沙关系的影响[J].水土保持研究,2020,27(2):118-122.
- [11] Zingg A W. Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff[J].Agricultural Engineering, 1940,21(2):59-64.
- [12] 陈正发,郭宏忠,史东梅,等.地形因子对紫色土坡耕地土壤侵蚀作用的试验研究[J].水土保持学报,2010,24(5):83-87.
- [13] Ao C, Yang P L, Ren S M, et al. Efficacy of granular polyacrylamide on runoff, erosion and nitrogen loss at loess slope under rainfall simulation[J].Environmental Earth Sciences,2016,75(6):490-499.
- [14] 王占礼,王亚云,黄新会,等.黄土裸坡土壤侵蚀过程研究[J].水土保持研究,2004,11(4):84-87.
- [15] Benik S R, Wilson B N, Biesboer D D, et al. Performance of erosion control products on a highway embankment[J].Transactions of the ASAE,2003,46(4):1113-1119.
- [16] Huang C H, Bradford J M. Analyses of slope and runoff factors based on the WEPP Erosion Model[J].Soil Science Society of America Journal,1993,57(5):1176-1183.
- [17] 马波,刘雨鑫,吴发启.植大豆对坡耕地径流侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2012,26(4):32-36.
- [18] Chul H E, Yong H C, Min H S, et al. Effects of rice straw mats on runoff and sediment discharge in a laboratory rainfall simulation [J]. Geoderma, 2012, 189/190:164-169.
- [19] 耿晓东,郑粉莉,张会茹.红壤坡面降雨入渗及产流产沙特征试验研究[J].水土保持学报,2009,23(4):39-45.
- [20] 王保一,张荣华,荆莎莎,等.降雨和坡度对路基边坡产流产沙的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版), 2019,43(2):114-120.
- [21] 张小娜,冯杰,邵伟.不同雨强下植被对坡地产汇流和溶质运移的影响[J].河海大学学报(自然科学版), 2010,38(3):246-251.
- [22] 赵哈林,郭轶瑞,周瑞莲,等.植被覆盖对科尔沁沙地土壤生物结皮及其下层土壤理化特性的影响[J].应用生态学报,2009,20(7):1657-1663.
- [23] 张小娜,冯杰,高永波,等.不同雨强条件下坡度对坡地产汇流及溶质运移的影响[J].水土保持通报,2010,30(2):119-123.
- [24] 王磊,何超,郑粉莉,等.黑土区坡耕地横坡垄作措施防治土壤侵蚀的土槽试验[J].农业工程学报,2018,34(15):141-148.
- [25] 侯雷,谢欣利,姚冲,等.不同规格鱼鳞坑坡面侵蚀过程及特征研究[J].农业工程学报,2020,36(8):62-68.
- [26] 张玉斌,郑粉莉.近地表土壤水分条件对坡面土壤侵蚀过程的影响[J].中国水土保持科学,2007,5(2):5-10.
- [27] Locke M A, Krutz L J, Steinriede R W, et al. Conservation management improves runoff water quality: Implications for environmental sustainability in a glyphosate-resistant cotton production system[J].Soil Science Society of America Journal,2014,9:e0308.
- [28] 吴淑芳,吴普特,宋维秀,等.坡面调控措施下的水沙输出过程及减流减沙效应研究[J].水利学报,2010,41(7):870-875.
- [29] 张乐涛,高照良,李永红,等.模拟径流条件下工程堆积体陡坡土壤侵蚀过程[J].农业工程学报,2013,29(8):145-153.
- [30] Liu M X, Wang J A, Yan P, et al. Wind tunnel simulation of ridge-tillage effects on soil erosion from cropland[J].Soil and Tillage Research,2006,90(1/2):242-249.
- [31] Liu X B, Zhang S L, Zhang X Y, et al. Soil erosion control practices in Northeast China: A mini-review [J].Soil and Tillage Research,2012,117:44-48.