

不同播种方式微地形差异对坡耕地水土流失的影响

朱上卿, 赵桂茹, 安瞳昕, 李海, 郭锦涛, 格茸吾姆, 吴伯志

(云南农业大学农学与生物技术学院, 昆明 650201)

摘要: 为减少坡耕地作物播种至出苗期间的水土流失, 通过模拟降雨试验研究不同播种方式形成微地形对水土流失的影响, 共设置 6 个处理, T1 处理为深开沟播种(沟深 20 cm), T2 处理为浅开沟播种(沟深 10 cm), T3 处理为塘播, T4 处理为起高垄播种(垄高 20 cm, 宽 30 cm), T5 处理为起低垄播种(垄高 10 cm, 宽 15 cm), T6 处理为无处理直接播种(空白对照), 各处理分别以 10°, 15°, 20° 坡度在 40, 80, 120 mm/h 雨强下进行 27 场模拟降雨试验。结果表明: 开沟和起垄播种处理都能有效减轻水土流失, 各处理的水土保持效果为 T1>T4>T2>T5, T3 和 T6 间差异不显著, T1 的水土保持效果最好, 在各坡度和雨强下, 较 T6 地表径流产生时间延缓 65.9%~178.1%, 入渗强度增大 102.6%~195.1%, 地表径流量减少 75.6%~82.6%, 土壤侵蚀量减少 95.3%~99.1%。深开沟播种 T1 和起高垄播种 T4 能够很好地将雨水积留在沟或垄沟中, 并且能有效防止沟中积水破垄或越沟流出, 其中 T1 防止沟中积水越沟流出效果最好, 仅在极少情况下发生。通过研究不同播种方式形成的微地形对水土流失的影响, 对于坡耕地作物生长前期水土保持具有参考意义。

关键词: 播种方式; 雨强; 坡度; 水土流失; 微地形

中图分类号: S157.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)03-0043-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.03.006

Effects of Microtopography Difference of Different Sowing Patterns on Soil and Water Loss in Sloping Farmland

ZHU Shangqing, ZHAO Guiru, AN Tongxin, LI Hai, GUO Jintao, GERONG Wumu, WU Bozhi

(Faculty of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201)

Abstract: In order to reduce soil erosion during the period from sowing to emergence of crops in sloping farmland, the effects of microtopography formed by different sowing patterns on soil and water erosion were studied by simulating rainfall. A total of six treatments were set up, among which T1 treatment was deep ditching sowing (20 cm deep), T2 treatment was shallow ditching sowing (10 cm deep), T3 treatment was pond sowing, T4 treatment was high ridge sowing (20 cm high, 30 cm wide), T5 treatment was low ridge sowing (10 cm high, 15 cm wide) and T6 treatment was flat sowing (blank control). 27 simulated rainfall experiments were carried out under 40 mm/h, 80 mm/h and 120 mm/h rainfall intensities on 10°, 15° and 20° slopes for each treatment. The results showed that both ditching and ridging sowing treatments could effectively reduce soil and water erosion. The soil and water conservation effects of each treatment followed the order of T1>T4>T2>T5, and there was no significant difference between T3 and T6. Among them, the soil and water conservation effect of T1 treatment was the best. Under each slope and rainfall intensity, compared with T6 treatment, the time of surface runoff generation was delayed by 65.9%~178.1%, the infiltration rate increased by 102.6%~195.1%, the surface runoff and the soil erosion reduced by 75.6%~82.6% and 95.3%~99.1%, respectively, in T1 treatment. T1 and T4 could well retain rainwater in ditch or ridge, and could effectively prevent water from crossing ridge or flowing out of ditch. Among them, T1 treatment had the best effect in preventing water from flowing out of the ditch, which only occurred in rare cases. The study on the influence of microtopography formed by different sowing patterns on soil and water loss was of reference significance for soil and water conservation in the early stage of crop growth in sloping farmland.

收稿日期: 2022-09-23

资助项目: 云南省重点研发项目(2018BB015); 云南省重大科技专项—绿色食品国际合作研究中心项目(2019ZG00902)

第一作者: 朱上卿(1997—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事作物多样性种植与山地可持续农业研究。E-mail: 1903974097@qq.com

通信作者: 吴伯志(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事作物多样性种植可持续发展研究。E-mail: bozhiwu@outlook.com

Keywords: sowing patterns; rainfall intensity; slope degree; soil erosion; microtopography

随着中国经济发展和人口增长,为坚守我国 18 亿亩耕地红线,坡耕地的保护与利用愈发受到人们重视。而坡耕地水土流失现象严重影响着可用坡耕地面积与肥力,据 2011 年我国第一次水利普查^[1]结果显示,中国水土流失面积 $29.49 \times 10^7 \text{ hm}^2$,达到总普查面积的 31.12%,每年因水土流失损失土壤超过 40 亿 $\text{t}^{[2]}$,失去耕地 $6.67 \times 10^4 \text{ hm}^2$,是水土流失最严重的国家之一^[3]。坡耕地是水土流失的主要策源地,据统计^[4],中国坡耕地总面积达 $0.24 \times 10^8 \text{ hm}^2$,约占全国耕地总量的 20%,是主要的旱耕地使用类型,坡耕地的水土流失面积占全国水土流失面积的 6.7%,但土壤侵蚀量却占全国总量的 28.3%,年均流失土壤 14.15 亿 $\text{t}^{[5]}$ 。水土流失影响道路沿线的水源保护区功能,降低生态系统自净能力,堵塞河流湖泊,引发洪涝灾害^[6]。水土流失还减少土壤肥力^[7],破坏现有土地资源,由此可见,治理坡耕地水土流失具有重大的现实意义。

前人^[8-11]研究表明,作物随着生长发育对水土保持的影响逐渐增大,主要原因是其生育期后期覆盖度大,地表覆盖在减少雨水溅蚀、改善土壤结构、阻挡径流的同时增加水分入渗^[12-16],但作物播种至苗期的水土保持效果差,如何在该时期减少水土流失鲜有研究。微地形是坡耕地水土流失的重要影响因素之一,如张晶玲等^[17]和桑琦明等^[18]发现,横坡垄作较顺坡垄作可极大减少产流产沙量;齐智娟等^[19]发现,横坡耕作和垄向区田能够有效减少坡面径流和土壤侵蚀并起到蓄水保土的作用,说明常见的横坡耕作、垄作和垄向区田等通过改变微地形的耕作方式都能影响坡耕地的水土流失。而播种方式也可以改变土表微地形,通过不同播种方式形成不同的微地形来减少播种后至苗期的水土流失具有可行性。

考虑到作物苗期地表覆盖度低且根系固土能力弱,该时期很难通过作物因子来减少水土流失,旨在探寻不依靠作物因子且能够在易产生严重水土流失现象的播种后至出苗期间具有较好水土保持效果的播种措施。故通过研究不同播种方式改变微地形提高水土保持的效果,找到能够有效减少水土流失的坡耕地播种方式,为治理坡耕地水土流失提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2022 年 7 月 12—28 日在云南省昆明市盘龙区云南农业大学节水灌溉试验中心进行($25^{\circ}07'56''\text{N}$, $102^{\circ}44'51''\text{E}$)。该地海拔高度 1 930 m,属于低纬度高原季风气候。试验地年均气温 14.9°C ,年蒸发量 1 856.4 mm,年日照时间约为 2 327.5 h,年降水量 1 000.5 mm 且主要集中在 5—10 月,雨热同期。

1.2 供试材料

供试土壤取自云南农业大学坡耕地教学试验农场 0—20 mm 耕层土壤,为旱地红壤(中国分类标准)^[20]。土壤质地为粉质黏壤土,砂粒($2\ 000 \sim 60 \mu\text{m}$)、粉粒($60 \sim 2 \mu\text{m}$)和黏粒($< 2 \mu\text{m}$)分别约占 10%,50%和 40%。试验土壤 pH 为 7.2,有机质、全氮、全磷、全钾含量分别为 40.2,1.9,2.9,3.7 g/kg,水解性氮、有效磷、速效钾含量分别为 127.3,119.1,220.3 mg/kg。

1.3 试验装置

试验采用 HQJY 型下喷式人工模拟降雨装置(南京林业大学电子科技有限公司制造)并配有钢制可移动式微型径流小区。HQJY 型下喷式人工模拟降雨装置雨强调节范围 $15 \sim 150 \text{ mm/h}$,降雨均匀系数可达 85%以上,降雨喷头高度设置为 9 m,该装置具有操作简便、降雨均匀度高和雨强精准稳定的特点。

钢制可移动式微型径流小区长、宽、深分别为 1 600,800,300 mm,可调节坡度 $0 \sim 25^{\circ}$,小区的底部上下端设置有导流槽,上端导流槽用以记录地表径流和土壤侵蚀数据,下端导流槽用以记录下渗流数据。供试土壤过 10 mm 筛使土壤容重基本一致,其后均匀填满小区使其与上端导流槽齐平。

1.4 试验设计

试验采用单因素设计,以坡耕地播种时常见的耕作方式为处理。主要模拟不同播种方式形成的土壤微地形来对水土流失产生影响,综合参考坡耕地常见作物马铃薯、玉米等播种时的株行距,所有处理统一按照行距、株距分别为 40,30 cm 进行设置,都沿等高线种植,具体处理为

T1:模拟深开沟播种,沿等高线开沟 4 行,每沟深 20 cm;

T2:模拟浅开沟播种,沿等高线开沟 4 行,每沟深 10 cm;

T3:模拟塘播,沿等高线塘播 4 行,每行 3 塘;

T4:模拟起高垄播种,沿等高线起垄 4 行,每垄高 20 cm,宽 30 cm;

T5:模拟起低垄播种,沿等高线起垄 4 行,每垄高 10 cm,宽 15 cm;

T6:模拟直接播种,保持小区平整,不对微地形进行任何改变。

根据当地作物生长期前期降雨特性,设置 40,80,120 mm/h 的 3 种不同雨强,坡度设置为 10° , 15° 和 20° ,每个坡度和雨强重复 3 次,共进行 27 次人工模拟降雨试验,每次降雨时间为 1 h,每次降雨后取供试土壤重新填土并修复各处理微地形。每次试验

前 24 h,将试验小区以 20 mm/h 雨强进行降雨 1 h,使得各小区含水量保持一致。

1.5 测定指标与方法

(1)地表径流产生时间测定:模拟降雨试验开始后观察微型径流小区底部上端导流槽,当产生水流时记录时间为地表径流产生时间。

(2)入渗强度测定:模拟降雨试验开始后记录各处理 1 h 入渗量,并计算标准单位下的入渗强度(mm/h)。

(3)地表径流测定:模拟降雨开始后每隔 5 min 测定 1 次所产生的地表径流量。用径流收集桶收集微型径流小区底部上端导流槽流出的地表径流,若径流收集桶内径流较少则使用 2 L 容积量筒量取,若径流收集桶内径流较多则使用精度 1 mm 的钢制直尺记录径流收集桶中的水深并算出体积(V, m^3),并通过径流量(V)计算标准单位下的径流量(m^3/hm^2),计算公式为:

$$V = \frac{\pi}{3}(hr^2 + h^2 \text{rctg } \alpha + h^3 \text{ctg}^2 \alpha)$$

式中: r 为径流收集桶底部半径(m); α 为桶壁与桶底夹角($^\circ$); h 为桶高(m)。

(3)侵蚀量与侵蚀强度测定:模拟降雨开始后每隔 5 min 测定 1 次所产生的侵蚀量。待测量完径流收集桶内径流量后,将桶内经流充分搅拌,分别取桶上、中、下层水样混合共 250 mL,将该 250 mL 样本倒入干燥且质量为 m_1 的烘干杯中,放入烘箱 105 $^\circ\text{C}$ 条件下烘干至恒重并记录重量(m_2),获得 m_1 与 m_2 的差值记为 m ,并通过侵蚀量 m 计算标准单位下的侵蚀强度(kg/hm^2)。

1.6 数据处理

采用 Excel 2017 软件录入数据,使用 DPS 11.0

和 Origin Pro 2017 软件进行统计分析并制作图表,采用单因素完全随机设计和最小显著差异法(LSD)进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同雨强和坡度下播种方式对产流时间及入渗强度的影响

2.1.1 不同雨强和坡度下播种方式对地表径流产流时间的影响 由表 1 可知,在各种雨强和坡度条件下,T3 和 T6 的地表径流产生时间极显著短于开沟播种和起垄播种处理($p<0.01$),40 mm/h 雨强时开沟和起垄播种处理间产流时间差异不显著($p>0.05$),T1 延长产流效果最好,相较于对照处理 T6 延长 65.9%~75.9%;80 mm/h 雨强时,产流时间总体表现为 T2、T4 和 T5 小于 T1,随着坡度的增大,T1 延长产流时间效果最明显,较对照处理 T6 延长 103.5%~116.4%;120 mm/h 雨强时,各坡度下 T5 和 T2 差异不显著($p>0.05$)且其产流时间均显著短于 T1($p<0.05$),T1 除 10 $^\circ$ 坡度下产流时间显著长于 T4($p<0.05$)外,其余各坡度与 T4 差异不显著($p>0.05$),产流时间总体表现为 $T5<T2<T4<T1$,T1 延长产流时间效果最好,较对照,T6 延长 106.6%~178.1%,并且延长产流时间效果随着坡度增大而增大。

综上所述可知,在不同坡度和雨强下,T3 和 T6 的产流时间均极显著短于其他处理,说明起垄和开沟的播种方式都极显著延长产流时间,T1 的产流时间在不同坡度和雨强下均显著长于其他处理,说明 T1 延长产流时间的效果最好。

表 1 不同雨强和坡度下播种方式对地表径流产流时间的影响 单位:s

雨强/ (mm · h ⁻¹)	处理	10 $^\circ$	15 $^\circ$	20 $^\circ$
40	T1	229.00±7.55Aa	217.67±9.02Aa	221.00±6.56Aa
	T2	229.00±4.00Aa	222.00±2.65Aa	212.00±5.57Aa
	T3	141.33±2.52Bb	124.00±10.00Bb	124.67±9.07Bb
	T4	224.67±6.03Aa	211.67±6.03Aa	221.00±13.53Aa
	T5	222.33±3.51Aa	215.67±12.90Aa	209.00±10.00Aa
	T6	138.00±8.00Bb	132.00±6.93Bb	125.67±11.02Bb
80	T1	163.00±10.58Aa	156.00±7.94Aa	127.67±8.50Aa
	T2	156.67±9.29ABab	151.67±3.51Aa	121.00±5.57ABa
	T3	88.00±7.21Cc	71.67±8.62Bc	61.00±6.56Cc
	T4	162.00±3.61ABa	140.00±1.73Ab	122.33±4.16ABa
	T5	147.67±6.35Bb	145.00±5.00Aab	106.00±9.00Bb
	T6	80.00±6.56Cc	76.67±6.51Bc	59.00±8.89Cc
120	T1	156.33±6.66Aa	138.67±8.50Aa	97.33±4.73Aa
	T2	133.33±5.69Bc	124.33±4.16ABbc	87.67±3.06BCbc
	T3	75.67±6.11Cd	65.00±8.89Cd	36.00±6.08Dd
	T4	146.00±3.61ABb	134.00±3.61ABab	92.67±4.93ABab
	T5	133.33±2.52Bc	120.33±4.16Bc	84.67±4.93Cc
	T6	77.00±5.29Cd	68.33±7.09Cd	35.00±1.00Dd

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($p<0.05$);同列不同大写字母表示不同处理间差异极显著($p<0.01$)。下同。

2.1.2 不同雨强和坡度下播种方式对入渗强度的影响 由表 2 可知,在不同坡度和雨强下 T3 和 T6 的入渗强度极显著低于其他开沟和起垄处理($p < 0.01$)。40 mm/h 雨强下,各坡度下 T1、T2、T4 和 T5 间入渗强度差异不显著($p > 0.05$),80 mm/h 雨强下,各坡度下 T2 和 T5 间差异不显著($p > 0.05$),T1 和 T4 的入渗强度在坡度 10° 和 15° 时显著高于 T2 和 T5 ($p < 0.05$),坡度为 20° 时,T1 显著高于 T4 ($p < 0.05$),T4 显著高于 T2 和 T5 ($p < 0.05$)。120 mm/h 雨强下,坡度为 10° 和 15° 时,T2 和 T5 的入渗强度差异不显著($p >$

0.05);各处理入渗强度差异随着坡度增大而增大,总体表现为 T2 和 T5 $<$ T4 $<$ T1,T1 入渗强度最高,较对照处理 T6 提高 102.6%~195.1%。

综上所述,较塘播和无处理播种,在不同坡度和雨强下开沟和起垄播种能够有效地提高入渗强度。各处理入渗强度大小总体表现为 T1 $>$ T4 $>$ T2 $>$ T5,随着坡度和雨强的增大该趋势表现明显,因为开沟处理较起垄处理更不易出现沟中洼积的雨水破垄或是越沟而出的现象,并且高垄和深沟处理的沟中可以积存更多的雨水。

表 2 不同雨强和坡度下播种方式对入渗强度的影响

单位:mm/h

雨强/ (mm · h ⁻¹)	处理	10°	15°	20°
40	T1	35.43±0.09Aa	35.48±0.12Aa	35.14±0.16Aa
	T2	35.32±0.02Aa	35.33±0.08Aa	35.03±0.19Aa
	T3	19.43±2.01Bb	18.47±2.17Bc	17.88±1.02Bb
	T4	35.51±0.23Aa	35.45±0.15Aa	35.15±0.12Aa
	T5	35.29±0.18Aa	34.90±0.42Aa	33.84±0.05Aa
	T6	20.27±1.71Bb	21.33±1.84Bb	17.90±1.56Bb
80	T1	69.08±0.60ABa	70.71±0.86Aa	69.83±0.87Aa
	T2	68.36±0.70ABab	64.79±0.97ABab	56.06±2.47BCc
	T3	28.66±3.35Cc	26.94±2.74Cc	22.06±2.92Dd
	T4	69.92±0.78Aa	67.68±0.95ABa	63.55±1.34ABb
	T5	65.63±1.16Bb	60.25±1.07Bb	50.50±3.83Cc
	T6	26.76±1.25Cc	26.75±7.52Cc	23.44±6.53Dd
120	T1	106.64±2.12Aa	104.26±0.73Aa	103.65±0.51Aa
	T2	89.62±1.27Bc	68.69±4.59Cc	53.86±3.37Cc
	T3	47.06±2.91De	45.48±6.39Dd	33.61±5.12De
	T4	101.52±0.99Ab	88.18±2.18Bb	77.23±3.74Bb
	T5	87.80±2.84Bc	64.90±1.91Cc	45.18±4.08Cd
	T6	53.09±2.19Cd	51.45±1.63Dd	35.12±3.46De

2.2 不同雨强和坡度下播种方式对地表径流及土壤侵蚀的影响

2.2.1 不同雨强和坡度下播种方式对地表径流的影响 由表 3 可知,在不同坡度和雨强下,T3 和 T6 地表径流量极显著高于其他处理($p < 0.01$),且 T3 和 T6 差异不显著($p > 0.05$),仅当 T3 和 T6 在 120 mm/h 雨强下且坡度为 10° 和 15° 时因形成细沟,使得其产流波动较大而差异显著($p < 0.05$)。40 mm/h 雨强下,除坡度为 15° 时 T5 的地表径流量显著高于 T1、T2、T4 外,各坡度和雨强下 T1、T2、T4 和 T5 间差异不显著($p > 0.05$)。80 mm/h 雨强下,T1 和 T4 间差异不显著($p > 0.05$),T5 的地表径流量显著高于 T1 和 T4 ($p < 0.05$),且随着坡度的增大 T5 和 T2 的产流差异减小,其中,T1 和 T4 的产流量最少,较对照处理 T6 分别减少 79.5%~82.6%和

57.7%~81.1%。120 mm/h 雨强下,坡度为 10° 和 15° 时 T2 和 T5 的地表径流量差异不显著($p > 0.05$),坡度为 20° 时,各处理产流量差异显著($p < 0.05$),且随着坡度增大而增大,总体表现为 T2 和 T5 $>$ T4 $>$ T1,T1 减少产流的效果最好,较其他各处理减少 27.7%~82.6%。

综上所述,较塘播和无处理播种,在不同坡度和雨强下开沟和起垄播种能够有效地减少地表径流量。各处理地表径流量大小总体表现为 T1 $<$ T4 $<$ T2 $<$ T5,当雨强为 120 mm/h 时,该规律表现显著,是因为该雨强下,起垄处理 T4 和 T5 垄沟中积水发生较多的破垄泄出而造成。

2.2.2 不同雨强和坡度下播种方式对土壤侵蚀强度的影响 由表 4 可知,不同雨强和坡度下 T3 和 T6 的土壤侵蚀强度都极显著高于其他处理($p < 0.01$),T3

和 T6 较易产生细沟,其侵蚀强度受细沟影响变异较大。当雨强不超过 80 mm/h 且坡度不超过 15°时和 40 mm/h 雨强且坡度为 20°条件下时,T1、T2、T4 和 T5 间差异不显著($p>0.05$);当 120 mm/h 雨强条件下和 80 mm/h 雨强且 20°坡度条件下时,T5 的土壤侵蚀强度显著高于 T1、T2 和 T4($p<0.05$),可能是高强度降雨和较陡坡度下起垄处理垄沟内的水越垄而出,高垄播种处理 T4 由于垄高,越垄而出的径流带出的泥沙在下一条垄沟内沉积形成缓冲,而低垄播种处理 T5 由于垄

低,其造成的缓冲效果不明显,其中,120 mm/h 雨强下,各处理减少侵蚀的效果最为明显,T1、T2 和 T4 的土壤侵蚀强度较对照处理 T6 分别减少 95.3%~99.1%,87.0%~93.5%和 91.8%~95.9%。

综上所述,在不同坡度和雨强下,T1、T2、T4 和 T5 的土壤侵蚀强度极显著低于 T3 和 T6,表明较塘播和无处理播种,开沟和起垄播种能够有效地减少土壤侵蚀。所有播种方式中,T1 减少土壤侵蚀的效果最明显,可减少 99.1%的土壤侵蚀。

表 3 不同雨强和坡度下播种方式对地表径流的影响 单位:m³/hm²

雨强/ (mm·h ⁻¹)	处理	10°	15°	20°
40	T1	45.71±0.91Bb	45.16±1.21Bc	48.57±1.62Bb
	T2	46.82±0.18Bb	46.71±0.78Bc	49.71±1.93Bb
	T3	205.70±20.11Aa	215.34±21.65Aa	221.18±10.19Aa
	T4	44.90±2.34Bb	45.48±1.53Bc	48.46±1.18Bb
	T5	47.06±1.85Bb	50.95±4.18Bc	61.59±0.54Bb
	T6	197.28±17.10Aa	186.69±18.44Ab	220.96±15.64Aa
80	T1	109.20±5.96BCc	92.87±8.61Cc	101.72±8.67Dc
	T2	116.42±7.04BCbc	152.11±9.70BCbc	239.42±24.66BCb
	T3	513.44±33.45Aa	530.63±27.41Aa	579.36±29.23Aa
	T4	100.80±7.80Cc	123.21±9.45BCc	164.53±13.37CDc
	T5	143.67±11.62Bb	197.46±10.75Bb	294.98±38.35Bb
	T6	532.40±12.46Aa	532.52±75.22Aa	565.56±65.26Aa
120	T1	133.61±21.20De	157.40±7.26De	163.53±5.12Ee
	T2	303.79±12.69Cc	513.06±45.94Bc	661.42±33.66Cc
	T3	729.38±29.07Aa	745.24±63.87Aa	863.87±51.20Aa
	T4	184.78±9.94Dd	318.22±21.85Cd	427.66±37.35Dd
	T5	321.96±28.37Cc	551.02±19.09Bc	748.15±40.80Bb
	T6	669.07±21.94Bb	685.55±16.33Ab	848.76±34.64Aa

2.3 不同雨强和坡度下播种方式对地表径流和土壤侵蚀动态变化的影响

2.3.1 不同雨强和坡度下播种方式对地表径流动态变化的影响 由图 1 可知,不同坡度和雨强下,T3 和 T6 的地表径流量都在降雨开始后迅速增大后波动上升,当雨强<80 mm/h 时,T1、T2、T4 和 T5 的地表径流量在降雨一定时间内保持在相近的水平上。在 40 mm/h 雨强下,降雨 35~50 min 后,T5 的地表径流量快速增大,因为 T5 起低垄播种处理的垄沟内积水达到垄高后具有较大的水势,容易从播种位置破垄泻出。在 80 mm/h 雨强下,降雨 15~30 min 后,T5 和 T2 先后发生积水破垄和越沟现象,而后径流量快速增大,且随着坡度的增大发生积水破垄和越沟现象的时间提前。T4 在 20°坡度降雨 25~30 min 后出现积水破垄,而后径流量快速增大,T1 始终未出现沟内

雨水越沟流下的现象,一直保持着最低的地表径流量水平。在 120 mm/h 雨强下,降雨 0~25 min 时,T2 和 T5 发生积水破垄或越沟现象,5~30 min 时,T4 发生积水破垄现象,使得地表径流量快速增大,T4 的地表径流量增大而显著大于 T1,是因为 T4 高垄中未下渗的雨水具有较高的水势,雨水冲破垄上因播种而较为疏松的土壤从而形成破垄的水流,而 T1 因沟深且播种位置在沟底部不影响沟上部土壤使得沟中的水流不易破沟而出,所以,T1 的地表径流量始终处于最低水平。

不同雨强和坡度下,T3 和 T6 在开始降雨后都快速产生地表径流,而开沟和起垄播种一定程度上均减少地表径流量,其中,T1 开深沟播种减少地表径流的效果最为显著并且极少出现积水越沟现象($p<0.05$),而 T2、T4 和 T5 随着雨强和坡度的增大,其积

水越沟或破垄现象越严重,并可能出现连锁越沟或破垄现象。沟中未下渗雨水产生越沟或破垄现象的趋势表现为 $T1 < T4 < T2 < T5$,开沟播种较起垄播种

更不易出现该雨水越沟或者破垄现象,因为起垄播种导致播种位置土壤较为稀松,未下渗雨水易从播种的位置破垄流出。

表 4 不同雨强和坡度下播种方式对土壤侵蚀强度的影响 单位:kg/hm²

雨强/ (mm · h ⁻¹)	处理	10°	15°	20°
40	T1	78.05±11.38Bb	84.79±6.65Bc	97.74±8.41Bb
	T2	78.31±7.62Bb	96.31±10.81Bc	115.81±3.80Bc
	T3	1711.45±410.38Aa	2517.98±400.10Aa	2914.06±162.91Aa
	T4	76.51±3.34Bb	93.58±5.95Bc	102.77±9.72Bc
	T5	91.57±2.17Bb	123.44±22.85Bc	181.48±9.24Bc
	T6	1772.83±233.81Aa	2149.92±120.73Ab	2663.38±239.21Ab
80	T1	617.99±119.33Bb	814.45±48.71Bb	808.28±2.37Cc
	T2	795.25±60.63Bb	1785.46±108.67Bb	3390.39±187.86Cc
	T3	13434.84±1044.13Aa	22313.04±755.09Aa	33458.96±846.37Aa
	T4	583.36±54.47Bb	1292.82±46.57Bb	1643.47±115.16Cc
	T5	1346.54±177.71Bb	3470.15±632.30Bb	7516.24±593.66Bb
	T6	13614.47±822.00Aa	20875.66±5058.13Aa	33363.11±3411.88Aa
120	T1	1249.98±237.62Cc	1343.16±44.27Dd	1557.15±123.30Cd
	T2	4401.76±1361.02BCbc	7139.46±556.86Dd	10851.28±1816.05Cd
	T3	29200.68±3583.46Aa	40254.68±6314.89Bb	144767.21±11757.23Ab
	T4	2206.77±263.62Cc	3846.08±960.77Dd	6918.35±437.35Cd
	T5	7661.71±1255.18Bb	19023.71±3677.90Cc	76262.53±5360.31Bc
	T6	26753.94±2869.06Aa	55076.43±4970.12Aa	166289.94±21576.23Aa

2.3.2 不同雨强和坡度下播种方式对土壤侵蚀动态变化的影响 由图 2 可知,不同坡度和雨强下,T3 和 T6 的土壤侵蚀量在降雨开始后陡增至极显著高于起垄开沟播种处理,并呈现波动上升趋势。40 mm/h 雨强下,T1、T2、T4 和 T5 的土壤侵蚀量呈现缓慢波动上升的趋势,其中,随着坡度的增大,T5 在降雨 40~50 min 后出现积水破垄现象,导致土壤侵蚀量快速上升。80 和 120 mm/h 雨强下,T1 未出现明显的破垄或越沟现象,故土壤侵蚀量一直保持在较低水平且无快速增大。随着坡度的增大,各处理以 T5、T2、T4 的顺序先后发生积水破垄或越沟现象,破垄而下的雨水冲刷破垄口,夹带大量的泥沙使得侵蚀量迅速增大。在不同坡度和雨强下,T4 较 T2 出现破垄或越沟现象延后 5~15 min,较 T5 延后 10~30 min。

综上所述,不同雨强和坡度下塘播处理 T3 和无处理播种处理 T6 在开始降雨后土壤侵蚀量都快速增大,并随着坡度和雨强的增大其细沟形成越为明显,各处理减少土壤侵蚀效果大小表现为 $T1 > T4 > T2 > T5 > T3$,其中,T3 和 T6 的土壤侵蚀量差异不显著,而开沟和起垄播种都能一定程度上减少土壤侵蚀,尽管 T5 和 T2 较易发生破垄和越沟现象,但泥沙

在下一沟中沉积并能有效减少土壤侵蚀。T1 在不同坡度和雨强下土壤侵蚀量都维持在较低水平,因为 T1 能有效地将雨水阻拦在沟中,不易发生积水越沟现象,极大地减少地表径流,从而减缓径流对地表的侵蚀作用。T4 减少土壤侵蚀的效果仅次于 T1,因 T4 只有在坡度不小于 15°且雨强不小于 80 mm/h 时才发生明显的积水破垄现象。

3 讨论

本试验表明,不同播种方式对水土流失影响极大,开沟和起垄播种都能有效减缓地表径流的产生,加快雨水下渗速度,显著减少地表径流量与泥沙侵蚀量。对于坡耕地如何通过播种方式改变微地形从而减少水土流失提供科学依据。

T3 在各坡度与雨强下与 T6 产流产沙及入渗差异不显著,说明塘播形成的微地形并不能有效减少播种后至苗期的水土流失;当雨强和坡度增大,各处理间的差异增大。当雨强为 40 mm/h 时,不同坡度下开沟播种和起垄播种处理间差异不显著,当雨强为 80 mm/h,不同坡度下表现为 T1 产流产沙量总是小于其他开沟和起垄处理,当雨强为 120 mm/h 且坡度为 20°时,各处理间产流产沙量差异最为明显,表现

为 $T1 < T4 < T2 < T5$ 。原因是 $T3$ 在一定程度上增大地表粗糙度,但雨水易聚集在塘与塘的间隙中流下,当坡度和雨强增大时,汇流的流速增大,较易形成侵蚀细沟,从而加剧侵蚀,故 $T3$ 的水土保持效应较差。起垄处理出现垄沟中注积的雨水破垄而出的现象,随着坡度和雨强的增大该现象出现的概率增大,同时, $T4$ 较 $T5$ 出现该现象的概率小,表明增大垄高和垄宽可以有效减少垄沟中注积的雨水破垄而出,与 Liu 等^[21]的研究结论一致。本试验认为,在起垄播种处理中,当出现垄沟中注积雨水破垄而出现象后,地表径流量和土壤侵蚀量都急剧上升,与 Liu 等^[21]的研究结果一致,破垄发生的位置往往处在播种处,是

因为播种处垄上的土壤较其他位置更疏松,当垄沟中注积的雨水具有足够高的水势之后,往往从播种处破垄而出。开沟播种较起垄播种更不易出现注积雨水破垄或越沟而出的现象,是因为播种位置都在沟底而沟峰的土壤则不会因为播种而松动,注积的雨水具有足够高的水势之后较难越沟而出,在 Liu 等^[22]的研究中,将积水破垄或越沟现象称之为等高线失效。起垄播种和开沟播种减少水土流失的原理本质上都是将雨水累积在垄沟中,加快雨水的下渗并减缓坡面流流速,从而减少地表径流对土壤的冲刷作用,表明开沟播种较起垄播种能更好地将雨水积留在沟中,其等高线失效的风险更小。

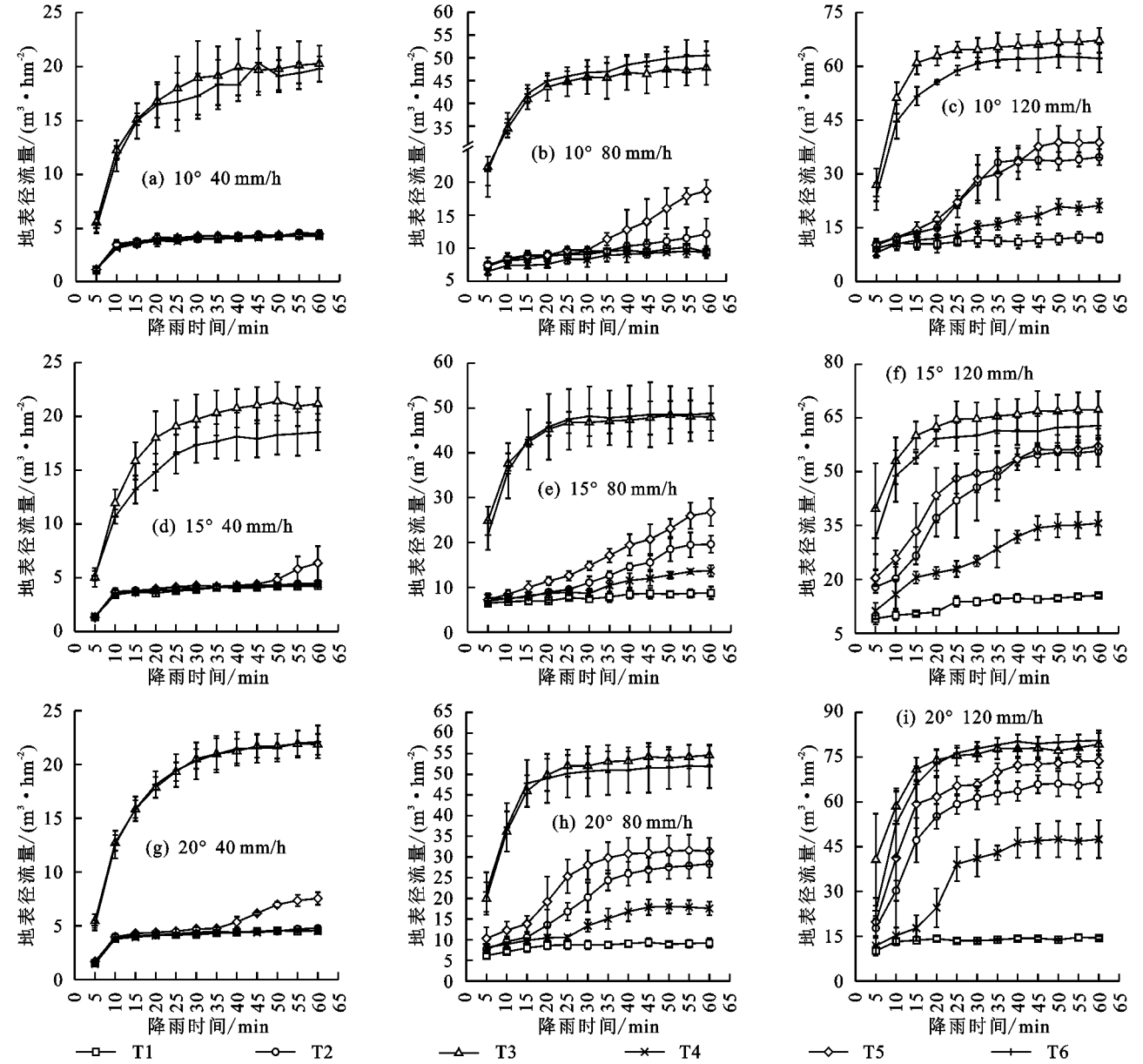


图 1 不同处理下地表径流动态变化

由于起垄播种处理的作物种子都处于垄上,而雨水主要集中在垄沟中下渗,故作物在播种后容易出现缺水,林立金等^[23]研究也证明此观点。开沟播种处

理的种子位于沟底,雨水集中在沟底下渗能有效防止前期缺水的情况,Vejchar 等^[24]研究也表明,沟底的水分含量显著高于垄上,研究区播种主要集中在 4—

7月,该时期降雨主要为中低强度降雨,少有短时高强度与极高强度降雨,开沟播种能有效缓解播种至苗期干旱,并减少短时高强度与极高强度降雨情况下侵蚀细沟的产生。开沟播种较起垄播种还具有节省人力的优势,农用机械因交通和地形因素难以在坡耕地工作,故播种方式还应考虑到人力成本。随着坡度的增大,开沟播种和起垄播种中出现破垄和越沟现象的概率越大,而增大开沟深度和增大垄高垄宽都能有效

减少破垄和越沟现象的发生,所以在在大田农业生产中应结合坡耕地的坡度,合理安排播种时起垄高度或开沟深度,在减少人力的同时获得较好的水土保持效果。塘播的水土保持效果最差,与无处理直接播种在大多数情况下差异不显著,在较陡坡度或较大雨强下容易形成严重的细沟,从而使得水土流失增大,故在坡耕地播种时应尽量避免塘播,而开深沟播种的水土保持效果最好,适宜在坡耕地进行推广。

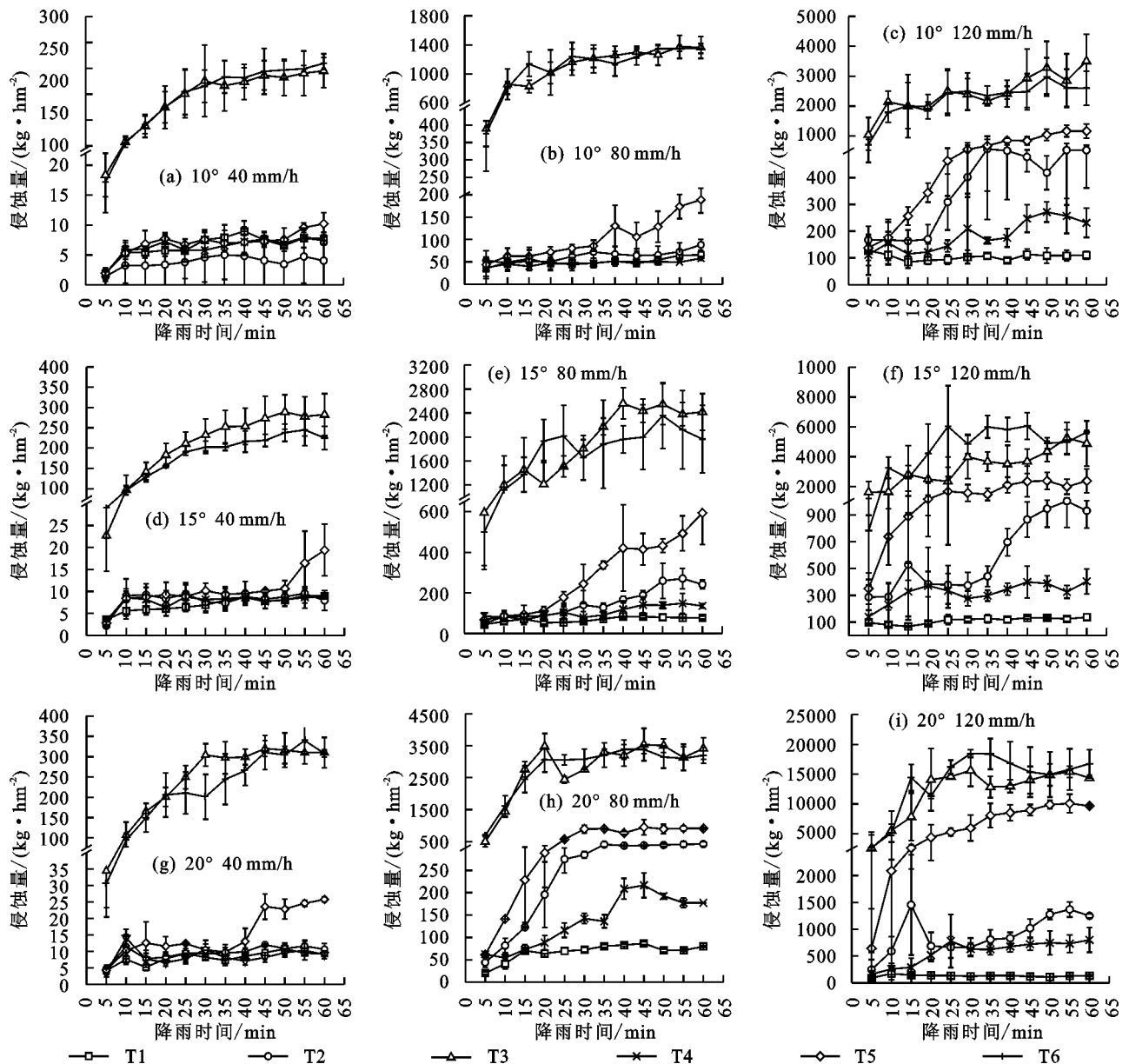


图2 不同处理下地表侵蚀量动态变化

4 结论

(1)本试验的各处理中,水土保持效果表现为 $T1 > T4 > T2 > T5 > T3$ 和 $T6$,开沟和起垄播种都能有效地减少水土流失。

(2)随着雨强和坡度的增大,开深沟播种始终都能保持较小的地表径流量和土壤侵蚀量,并且增大开沟播种深度能有效地将雨水积累在沟中,大幅降低积

水越沟泻出的概率,从而增加入渗和减少地表径流对坡耕地的冲刷作用。

(3)开沟播种水土保持效果稳定,起垄播种较开沟播种更容易发生积水破垄,故在水土流失严重的坡耕地宜采用开深沟播种。

参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部.第一次全国水利普查公报[J].

- 水利信息化,2013(2):64.
- [2] 李海燕.土壤侵蚀危害及其防治措施研究现状[J].宁夏农林科技,2011,52(1):71-72.
- [3] 孙鸿烈.我国水土流失问题与防治对策[J].中国水利,2011(6):16.
- [4] 梁其春,冯伟.搞好坡耕地水土流失综合治理试点改善山丘区群众生产生活条件[J].中国水利,2011(12):65-66.
- [5] 陈磊.薄土坡耕地水土流失防治工程措施效应研究[D].陕西 杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2014.
- [6] 彭珂珊.中国土壤侵蚀影响因素及其危害分析[J].水利水电科技进展,2000,20(4):88-94.
- [7] 吴小扁.坡耕地水土流失治理方案研究[J].陕西水利,2022,(3):136-138.
- [8] 赵桂茹,安瞳昕,欧阳铨人,等.青贮玉米氮投入对坡耕地土壤侵蚀及水稳性团聚体的影响[J].水土保持学报,2021,35(5):72-79.
- [9] 王鹏飞,郑子成,张锡洲,等.玉米季横垄坡面细沟侵蚀特征及其影响因素[J].土壤学报,2016,53(4):869-880.
- [10] Auerswald K, Fiener P, Dikau R. Rates of sheet and rill erosion in Germany-A meta-analysis[J]. Geomorphology,2009,111(3/4):182-193.
- [11] 张贺,段喜明,刘志明.马铃薯对坡耕地水土流失的影响[J].山西农业科学,2018,46(5):780-784.
- [12] Kateb H E, Zhang H F, Zhang P C, et al. Soil erosion and surface runoff on different vegetation covers and slope gradients: A field experiment in southern Shaanxi Province, China[J]. Catena,2013,105:1-10.
- [13] Klaassen W, Bosveld F, Water E D. Water storage and evaporation as constituents of rainfall interception[J]. Journal of Hydrology,1998,212(1):36-50.
- [14] Vázquez M R, Ventura R E, Oleschko K, et al. Soil erosion and runoff in different vegetation patches from semiarid central Mexico[J]. Catena,2010,80(3):162-169.
- [15] Zhou P, Luukkanen O, Tokola T, et al. Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed[J]. Catena,2008,75(3):319-325.
- [16] Lacombe S, Bradley R L, Hamel C, et al. Do tree-based intercropping systems increase the diversity and stability of soil microbial communities[J]. Agriculture Ecosystems and Environment,2009,131(1/2):25-31.
- [17] 张晶玲,周丽丽,马仁明,等.天然降雨条件下横垄与顺垄坡面产流产沙过程[J].水土保持学报,2017,31(5):114-119.
- [18] 桑琦明,王磊,郑粉莉,等.东北黑土区坡耕地斜坡垄作与顺坡垄作土壤侵蚀对比分析[J].水土保持学报,2020,34(3):74-78.
- [19] 齐智娟,张忠学,杨爱峥.黑土坡耕地几种水土保持措施的蓄水保土效应研究[J].水土保持研究,2011,18(5):72-75.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 GB/T 17296—2009 中国土壤分类与代码[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [21] Liu Q J, Zhang H Y, An J, et al. Soil erosion processes on row sideslopes within contour ridging systems[J]. Catena,2014,115:11-18.
- [22] Liu Q J, An J, Wang L Z, et al. Influence of ridge height, row grade, and field slope on soil erosion in contour ridging systems under seepage conditions[J]. Soil and Tillage Research,2015,147:50-59.
- [23] 林立金,朱雪梅,邵继荣,等.紫色土坡耕地横坡垄作的水土流失特征及作物产量效应[J].水土保持研究,2007,14(3):254-258.
- [24] Vejchar D, Stehlik M, Mayer V. Influence of tied ridging technology on the rate of surface runoff and erosion in potato cultivation[J]. Agronomy Research,2017,15(5):2207-2216.