

降雨强度对农业耕作措施水土保持作用的影响

方 乾¹,赵龙山¹,吴发启²

(1. 贵州大学林学院,贵州 贵阳 550025;2. 西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100)

摘 要:利用人工模拟降雨试验,研究不同降雨强度下,不同农业耕作措施坡地水土流失特征。试验设计的坡地坡度分别为 5°和 15°,降雨强度分别为 60、90、120 mm·h⁻¹;耕作措施分别为等高耕作、人工掏挖和人工锄耕,以相同坡度的平整坡地作为对照。结果表明:(1)随着降雨强度的增大,各耕作措施坡地产流量显著增大1.51倍以上,最大增加幅度为等高耕作坡地的 2.28 倍。而坡地产沙量在降雨强度较小时增加不显著,当降雨强度增大到 120 mm·h⁻¹时,坡地产沙量显著增大;(2)与平整坡地相比,等高耕作在 3 个降雨强度下都具有明显的减流效益,减流量均大于 15%,而人工锄耕和人工掏挖却不明显;(3)在 5°坡地上,等高耕作和人工掏挖在 3 个降雨强度的减沙效益均大于 25%,而人工锄耕减沙效益不明显;在坡度为 15°、降雨强度为 60 mm·h⁻¹和 90 mm·h⁻¹时,人工锄耕和人工掏挖减沙效益与降雨强度关系无明显规律,在降雨强度为 120 mm·h⁻¹时,3 个耕作措施都不能有效降低坡地产沙量。可见,水土保持农业耕作措施具有降低坡地产流量的作用,而对于坡地产沙的作用存在明显差异,在大坡度和大降雨强度下,不仅不能降低坡地产沙,反而加剧坡地土壤流失。

关键词:耕作措施;水土保持;降雨强度;坡度;减流效益;减沙效益

中图分类号:S157.1 **文献标志码:**A

Effect of rainfall intensity on soil and water conservation of tillage practices

FANG Qian¹, ZHAO Long-shan¹, WU Fa-qi²

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China;

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

Abstract: Tillage practices are one of the key measures for soil and water conservation in the agricultural lands. The objective of this study was to determine the effect of rainfall intensity on soil and water loss in agricultural lands under different tillage practices and simulated rainfall. Rainfall intensity was at 60, 90 mm·h⁻¹ and 120 mm·h⁻¹ and two slopes of surface were 5° and 15°. Tillage practices included contour ploughing, deep hoeing, and shallow hoeing. Results showed that: (1) With increasing rainfall intensities, the runoff of agricultural land increased significantly by 1.51 times or more, and the maximum increase was 2.28 times with contour ploughing. However, the increase of the sediment yield was not significant when the rainfall intensity was low. When the rainfall intensity was increased to 120 mm·h⁻¹, the sediment yield from slope field increased significantly; (2) Compared with the smooth surface, contour ploughing have the greatest effect on reducing runoff loss under three rainfall intensities at more than 15%, however, there was no significant change in that with deep hoeing and shallow hoeing; (3) With 5° of slope, contour ploughing and deep hoeing had more than 25% of sediment reduction under all three rainfall intensities, but no obvious sediment reduction was observed in the surfaces under shallow hoeing. On the surfaces with 15° of slope, sediment reduction benefits of deep hoeing and shallow hoeing was not significant under rainfall intensity of 60 to 90 mm·h⁻¹. Three tillage practices was unable to significantly reduce sediment yield under 120 mm·h⁻¹ rainfall intensity. It was shown that soil and water conservation tillage measures effectively reduced the runoff on sloped land, but the effectiveness on reducing the sediment yield varied significantly. Under

收稿日期:2017-12-22 修回日期:2018-12-05

基金项目:国家自然科学基金项目(41601293,41867014);贵州省科技计划项目(黔科合基础[2016]1027;黔科合[2016]支撑 2835 号)

作者简介:方乾(1994-),男,贵州贞丰人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail:fangqian1221@163.com

通信作者:赵龙山(1985-),男,甘肃古浪人,教授,主要从事土壤侵蚀与水土保持方面研究。E-mail:longshanzh@163.com

the condition of steep slope and heavy rainfall, the tillage was not able to reduce the sediment yield but aggravated the soil loss of sloped land.

Keywords: tillage practice; soil and water conservation; rainfall intensity; slope; sediment reduction benefits; runoff reduction benefits

坡耕地是人类从事农业生产的主要场所,因其受人为活动影响较大,已是水土流失的主要策源地^[1]。在坡耕地上,严重的水土流失造成耕作层土壤和养分流失,降低了土地生产力,对区域农业生产与经济发展产生不利影响^[2-6]。长期以来,为防治坡耕地水土流失,改善土地生产力,形成了以耕作措施为基础的水土保持耕作技术^[7]。通过耕作措施,可以改变地表微地形,增大地表糙度,使耕地自身蓄水保水能力增强^[8],起到水土保持作用。吴发启等^[9-10]的研究表明,地表糙度的增加,将增大地表填注量,延缓产流,强化降雨入渗。

其次,坡耕地实施水土保持耕作措施后,受地表微地形影响,地表产汇流过程发生变化,改变了径流对泥沙的侵蚀、搬运和沉积机制,地表径流拦蓄量和泥沙沉积量增加,潜在流失量降低,从而达到降低坡面总径流量和总产沙量的作用^[11]。但是,由于耕作形成的地表微地形具有明显的空间异质性,在不同的外界条件下,其水土保持作用具有一定差异,甚至有可能加剧土壤侵蚀发生^[12-13]。

降雨是诱发土壤侵蚀的主要因素,李桂芳等^[14]通过室内人工模拟降雨试验研究了降雨强度对黑土坡面土壤侵蚀的影响,研究表明,随着降雨强度的增大,土壤流失量随之增大;田凤霞等^[15]的结果表明降雨强度对黄土坡面土壤侵蚀的影响呈幂函数变化;霍云梅等^[16]的研究指出降雨强度与黏土坡面土壤侵蚀存在极显著的正相关关系;张会茹等^[17]的研究结果也与此相一致。但是,这些研究均以平整坡面为研究对象,而对耕作坡地地表条件缺乏考虑。因此,对农业耕作坡耕地上降雨强度与土壤侵蚀的关系还有待进一步研究。

鉴于此,本研究选择人工掏挖、人工锄耕和等高耕作作为研究对象,以平整坡面为对照,通过人工模拟降雨试验对不同降雨强度下农业耕作措施水土保持作用进行研究,以期为坡耕地水流失防治和治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省杨陵区,地处黄土高原南缘,关中腹地,其地理坐标为北纬 34° 17', 东经

108° 04', 总土地面积 135 km², 地势北高南低, 西高东低, 气候为温带半湿润大陆性季风气候, 年平均气温 13℃, 年均降雨量约 640 mm, 夏季高温多雨, 冬季严寒干燥。

土样取自杨陵区坡耕地 0~20 cm 的表层土。土壤类型为塿土, 灰棕色, 土体较疏松, 有粒状或团块结构, 平均土壤容重约 1.30 g·kg⁻¹。土壤取回后, 在实验室自然风干, 土壤含水量控制在 10% 左右, 然后过 5 mm 孔径筛, 以去除大颗粒土壤和植物残渣。土壤颗粒粒径 < 0.01 mm 的占 470 g·kg⁻¹, 粒径在 0.01~0.05 mm 的占 440 g·kg⁻¹, 粒径 > 0.05 mm 的占 90 g·kg⁻¹。耕作层土壤有机碳为 7.3 g·kg⁻¹, 全氮 0.91 g·kg⁻¹, 有机质含量约为 5~15 g·kg⁻¹。

1.2 研究方法

采用人工模拟降雨方法进行试验, 试验地点在西北农林科技大学水土保持工程实验室。降雨机采用中科院水土保持研究所研发的侧喷式降雨机。试验土槽规格长、宽和深度分别为 2、1、0.5 m; 试验降雨强度分别为 60、90、120 mm·h⁻¹; 坡度分别为 5° 和 15°; 降雨历时 90 min, 以使坡地产流侵蚀过程达到稳定状态。

试验土槽填装土壤时, 采用分层填装法, 将土槽分为 8 层, 每层填土 5 cm, 填土容重控制在 1.3 g·cm⁻³, 接近自然水平。装土完成后, 将地表整平, 并将土壤坡度调整到试验坡度, 然后在试验土槽中布设人工掏挖、人工锄耕和等高耕作措施, 以模拟不同的耕作地表条件。耕作措施布设后, 立刻采用 10 mm·h⁻¹ 降雨对地表进行预降雨, 降雨历时 30 min, 以恢复土壤结构。预降雨结束后, 将试验土槽在室内静置 24 h 后再开始正式降雨试验。本研究中, 对于每个耕作措施, 均采用具有相同坡度的平整坡地作为对照措施。

正式降雨试验开始后, 当试验土槽底部集流口有径流产生时记录产流开始时间。此后, 每间隔 2 min 连续采集全部径流泥沙样。降雨试验结束后, 采用称重法测量产流量, 采用烘干法 (105℃、12 h) 测定产沙量。

1.3 数据分析

本研究包括 3 个降雨强度和 2 个试验坡度, 各农业耕作措施包括 6 组降雨试验, 径流泥沙数据采

用如下公式计算:

(1) 不同降雨强度下各农业耕作措施平均产流量:

$$\overline{RY} = \frac{1}{N} \sum RY \tag{1}$$

式中, $\overline{RY}$ 为平均产流量($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$); RY 为瞬时产流量($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$); N 为采样数。

(2) 不同降雨强度下各农业耕作措施平均产沙量:

$$\overline{SY} = \frac{1}{N} \sum SY \tag{2}$$

式中, $\overline{SY}$ 为平均产沙量($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$); SY 为瞬时产沙量($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$); N 为采样数。

(3) 不同降雨强度下各农业耕作措施减流效益:

$$ER = \frac{RY_0 - RY_i}{RY_0} \times 100\% \tag{3}$$

式中, ER 为减流效益(%); RY_0 为平整坡地总产流量(kg); RY_i 为耕作坡地的总产流量(kg)。

(4) 不同降雨强度下各农业耕作措施减沙效益:

$$ES = \frac{SY_0 - SY_i}{SY_0} \times 100\% \tag{4}$$

式中, ES 为减沙效益(%); SY_0 为平整坡地总产沙量(g); SY_i 为耕作坡地的总产沙量(g)。

采用 Excel 2007 对数据进行整理并绘制图表,采用 SPSS 20.0 对不同降雨强度之间的产流量和产沙量进行方差分析,判断降雨强度对产流量和产沙量影响的差异性($P=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 降雨强度对耕作坡地平均产流量和平均产沙量的影响

不同降雨强度下,各耕作坡地平均产流量变化见图 1。由图 1 可知,当降雨强度由 $60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 增加到 $90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,人工掏挖、人工锄耕和等高耕作坡地平均产流量分别增加了 1.51、1.51 倍和 2.28 倍;当降雨强度由 $90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 增加到 $120 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,人工掏挖、人工锄耕和等高耕作坡地平均产流量分别增加了 1.82、1.67 倍和 1.99 倍。可见,随着降雨强度的增大,人工掏挖、人工锄耕和等高耕作坡地平均产流量呈增大趋势,增加幅度依次为等高耕作>人工掏挖>人工锄耕。降雨强度与平均产流量之间的关系与前人对平整坡面下产流量与降雨强度关系的研究结果一致^[18-19]。与平整坡地相比,

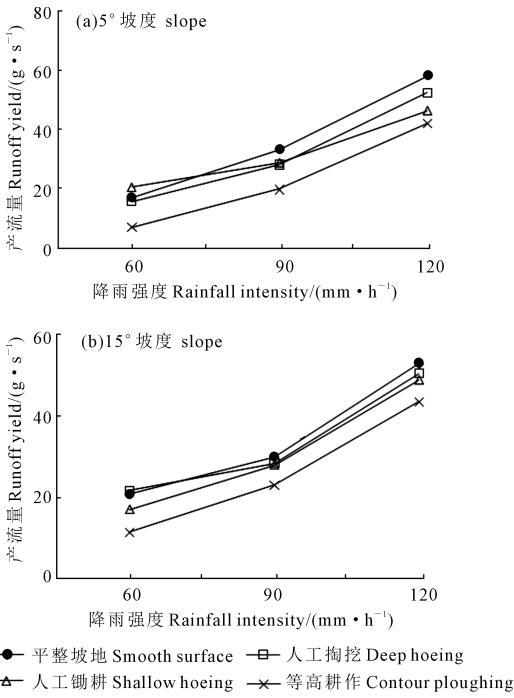


图 1 不同农业耕作措施下产流量随降雨强度的变化
Fig.1 Variation of runoff yield in agricultural lands under different rainfall intensities and tillage practices

人工锄耕、人工掏挖和等高耕作坡地平均产流量降低,说明等高耕作、人工掏挖和人工锄耕措施具有降低坡地产流的作用。方差分析表明,同一措施不同降雨强度之间的坡地产流量存在极显著差异($P<0.01$)。

对坡地产沙量分析可知,与平均产流量随降雨强度的变化相似,耕作坡地平均产沙量随降雨强度增大也呈增加趋势,但是在不同降雨强度下,平均产沙量增幅略有不同。从图 2(a)可以看出,就人工锄耕坡地而言,在 3 个降雨强度下的产沙量变化均很明显,当降雨强度由 $60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 增大到 $90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 并继续增大到 $120 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,其平均产沙量分别增加了 1.75 倍和 1.81 倍。其余措施产沙量变化此处不再赘述。从图 2(b)可以看出,在降雨强度从 $60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 增加到 $90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,各耕作坡地平均产沙量变化不大;但是当降雨强度从 $90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 增加到 $120 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,各耕作坡地下的平均产沙量增加极为明显,人工掏挖、人工锄耕和等高耕作坡地在 $120 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的产沙量相较 $90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的产沙量分别增加了 9.61、8.58 倍和 17.05 倍。此外,在坡度较大的情况下,降雨强度为 $120 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,耕作坡地的平均产沙量显著大于平整坡地。由方差分析可知,在坡度为 5° 时,人工锄耕在 3 个降雨强度下的产沙量存在极显著差异($P<0.01$);等高耕作和人工掏挖在 $60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时的产沙量差异不显著($P>0.05$),其余降雨强度下的产沙量之间差异极显著($P<0.01$);在坡度 15° 时,各耕作措施

坡地在 $60\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $90\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时的产沙量差异不显著($P>0.05$),其余降雨强度之间的坡地产沙量存在极显著差异($P<0.01$)。

2.2 降雨强度对农业耕作措施坡面减流减沙效益的影响

从图 3 可知,在 3 个降雨强度下,相较平整坡地,等高耕作均具有较高的减流效益且随降雨强度的增大呈降低趋势,但减流量均在 15%以上;人工掏

挖和人工锄耕减流效益随降雨强度的变化呈现出不同的特征,在降雨强度 $90\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $120\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,均具有明显的减流效益,而在降雨强度 $60\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,减流效益无明显规律。总体来看,等高耕作在 3 个降雨强度下的减流效益最高。

不同降雨强度下的减沙效益见图 4。由图 4 可知,在坡度为 5° 时,相较平整坡地,人工掏挖和等高耕作坡地在 3 个降雨强度下均具有明显的减沙效益,且两个耕作措施的减沙效益均在 25% 以上,但随降雨强度的增大呈现出不同特征,人工掏挖坡地减沙量随降雨强度的增大呈增大趋势,等高耕作坡地减沙效益受降雨强度影响不大;而人工锄耕坡地在 3 个降雨强度下的减沙效益不明显且无明显变化规律;在坡度 15° 时,当降雨强度为 $60\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $90\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,相较平整坡地,等高耕作具有明显的减沙效益,人工锄耕和人工掏挖减沙效益无明确规律;当降雨强度为 $120\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,3 个耕作措施都不能有效降低坡面产沙量,反而使其增大。

以上分析表明,人工掏挖、人工锄耕和等高耕作坡地平均产流量和平均产沙量随着降雨强度的增大呈增大趋势,但不同耕作措施的平均产流量和平均产沙量对降雨强度的响应特征不尽相同。林超文等^[20]、郑江坤等^[21] 和王鹏飞等^[22] 采用人工模拟降雨和径流小区观测得出的结果也与此相一致。梁心蓝等^[23] 的研究表明不同耕作措施产生的地表

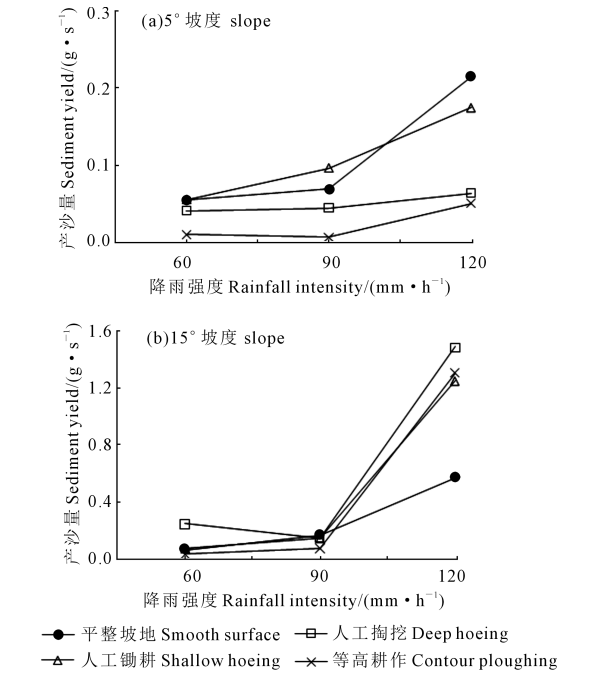


图 2 不同农业耕作措施下产沙量随降雨强度的变化
Fig.2 Variation of sediment yield in agricultural lands under different rainfall intensities and tillage practices

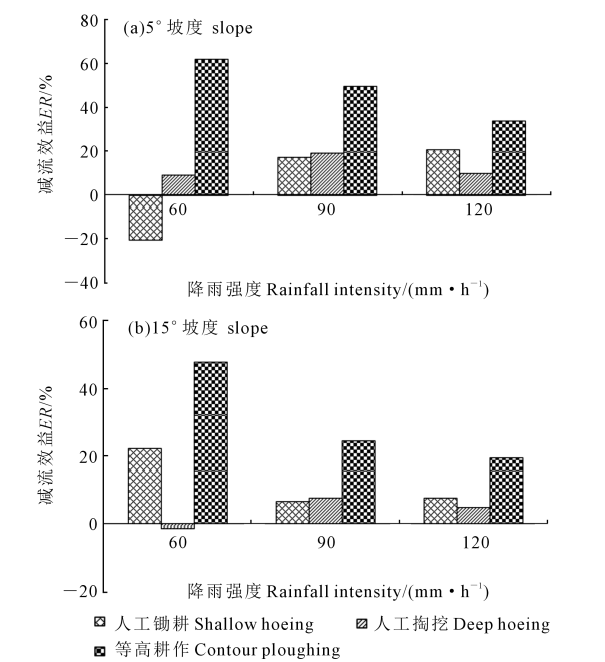


图 3 不同降雨强度下农业耕作措施的减流效益
Fig.3 Runoff reduction benefits of tillage practice in agricultural lands under different rainfall intensities

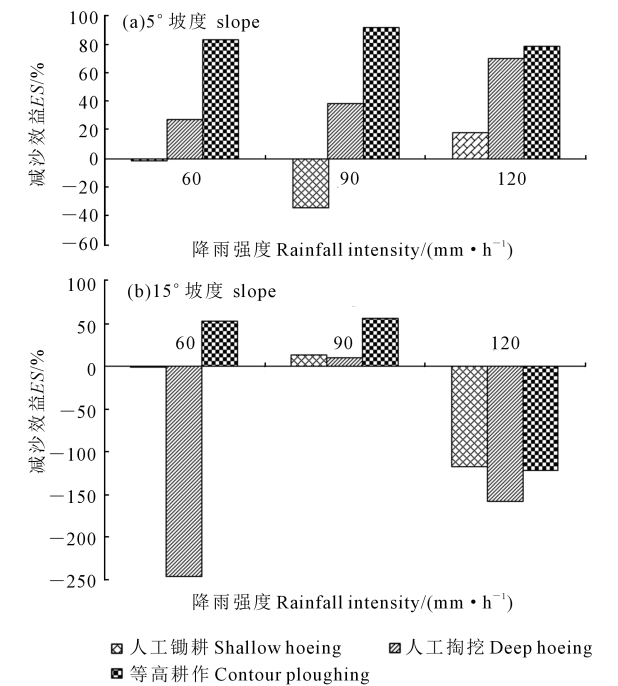


图 4 不同降雨强度下农业耕作措施的减沙效益
Fig.4 Sediment reduction benefits of tillage practice in agricultural lands under different rainfall intensities

糙度不同且地表糙度越大坡面产流产沙量越低。郑子成等^[24]的研究也表明地表糙度的增加可以降低地表径流量。可见,不同耕作措施对地表微地形的影响不同,导致地表拦蓄降水和泥沙沉积的作用存在差异。

农业耕作措施在降雨强度和坡度较小时具有保水保土的作用,但在坡度和降雨强度较大时不具有水土保持作用。赵龙山等^[25]对裸露陡坡地的研究表明,耕作措施在降雨强度较小时具有延缓产流的作用,在大降雨强度时反而增大坡面产沙。而王治国等^[26]的研究表明实施耕作措施的坡面将加剧细沟侵蚀,产沙量将明显增大。实施农业耕作措施将改变地表形态,在坡面形成洼地,在降雨强度较小时,洼地具有拦蓄降水增加土壤入渗的作用,而随着降雨强度的增大,耕作措施拦蓄降水和沉积泥沙的作用不断减小^[27],且在大降雨强度下,单位面积土壤承雨量变大,雨滴击打和径流冲刷力逐步增加^[28-29],尤其是在大坡度条件下,坡度强化了径流冲刷力和降低了土壤的稳定性,地表微地形逐渐垮塌,使耕作措施形成的地表坑洼与细沟侵蚀发育前期的跌坎相类似而不断连通,形成断续细沟,在地表产生细沟侵蚀,导致耕作坡地产沙量增加^[30-31]。因此,耕作措施坡面减沙效益随降雨强度的变化呈现出不同特征。

3 结 论

1)降雨强度对农业耕作措施水土保持作用的影响较大,人工锄耕、人工掏挖和等高耕作坡地平均产流量和平均产沙量随降雨强度的增大而增大,平均产流量增加幅度依次为等高耕作>人工掏挖>人工锄耕;产沙量在 $60\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $90\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时变化不明显,在 $90\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $120\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时平均产沙量明显增大。

2)降雨强度对不同农业耕作措施减流效益的影响存在差异。等高耕作具有较高的减流效益且随降雨强度的增大呈现减小趋势;人工锄耕和人工掏挖在 $90\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $120\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时具有较高的减流效益,而在 $60\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时减流效益无明显特征。

3)农业耕作措施减沙效益在不同降雨强度下表现出不同特征。在坡度 5° 时,人工掏挖和等高耕作在 3 个降雨强度下均具有较高的减沙效益,均在 25% 以上;人工锄耕并无明显变化规律;在坡度 15°

时,除等高耕作在 $60\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $90\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 具有明显降低坡面产沙的作用外,人工锄耕和人工掏挖措施都无明显降低坡面产沙的作用;在降雨强度 $120\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,耕作措施反而使坡地产沙量明显增大。

参 考 文 献:

[1] 高海东,李占斌,李鹏,等.基于土壤侵蚀控制度的黄土高原水土流失治理潜力研究[J].地理学报,2015,70(9):1503-1515.

[2] 孟庆香,刘国彬,杨勤科.黄土高原土壤侵蚀时空动态分析[J].水土保持研究,2008,15(3):20-22.

[3] Zhao L S, Liang X L, Wu F Q. Soil surface roughness change and its effect on runoff and erosion on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Arid Land,2014,6(4):400-409.

[4] Chen H S, Shao M A, Li Y Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China[J]. Geoderma,2008,143(1-2):91-100.

[5] Shi H, Shao M A. Soil and water loss from the Loess Plateau in China[J]. Journal of Arid Environments,2000,45(1):9-20.

[6] Zhou Z C, Shangguan Z P. Effect of ryegrasses on soil runoff and sediment control[J]. Pedosphere,2008,18(1):131-136.

[7] 吴发启.水土保持农业技术措施分类初探[J].中国水土保持科学,2012,10(3):111-114.

[8] 赵龙山,张青峰,宋向阳,等.基于微尺度下 DEM 的黄土坡耕地地表坑洼特征研究[J].土壤学报,2012,49(1):179-183.

[9] 郭建华,吴发启,梁心兰,等.坡耕地地表糙度对降水分配的实验研究[J].水土保持研究,2008,15(3):11-14,19.

[10] 吴发启,赵西宁,崔卫芳.坡耕地耕作管理措施对降雨入渗的影响[J].水土保持学报,2003,17(3):115-117.

[11] 赵龙山,侯瑞,吴发启,等.不同农业耕作措施下坡耕地填洼量特征与变化[J].农业工程学报,2017,33(12):249-254.

[12] Zhang J H, Frielinghaus M, Tian G, et al. Ridge and contour tillage effects on soil erosion from steep hillslope in the Sichuan Basin, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2004,59(6):277-284.

[13] Zhao L S, Hou R, Wu F Q. Effect of tillage on soil erosion before and after rill development[J]. Land Degradation & Development, 2018,29(8):2506-2513.

[14] 李桂芳,郑粉莉,卢嘉,等.降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响[J].农业机械学报,2015,46(4):147-154,182.

[15] 田风霞,王占礼,牛振华,等.黄土坡面土壤侵蚀过程试验研究[J].干旱地区农业研究,2005,23(6):141-146.

[16] 霍云梅,毕华兴,朱永杰,等.模拟降雨条件下南方典型粘土坡面土壤侵蚀过程及其影响因素[J].水土保持学报,2015,29(4):23-26,84.

[17] 张会茹,郑粉莉.不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2011,25(3):40-43.

[18] 吴发启,赵晓光,刘秉正.缓坡耕地降雨、入渗对产流的影响分析[J].水土保持研究,2000,7(1):12-17,37.

[19] 姜义亮,郑粉莉,温磊磊,等.降雨和汇流对黑土区坡面土壤侵蚀影响的试验研究[J].生态学报,2017,37(24):8207-8215.