

黄土高原南部地区人工模拟暴雨条件下不同坡度 谷子坡耕地产流产沙过程

陈科兵¹, 吴发启², 姚冲¹

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

摘要:以谷子坡耕地为研究对象,通过人工模拟降雨试验,探究不同生育期谷子在不同坡度下对坡耕地坡面侵蚀过程的影响,揭示黄土高原地区坡耕地侵蚀过程特征和机理。根据试验区现行退耕还林(草)政策、降雨特点及谷子生长特性,在 80 mm/h 降雨强度和 4 个坡度(3°, 5°, 10°, 15°)条件下分别对 4 个生育期(幼苗期、拔节期、抽穗期、灌浆期)的谷子种植坡面进行人工模拟降雨。结果表明:种植谷子对坡耕地坡面侵蚀过程有明显影响,随着谷子的生长,坡面初始产流时间不断延长,坡面产流曲线更快趋于平稳,坡面平均产流产沙强度逐渐降低,谷子的减流效应和减沙效益逐渐提高。3°与 15°坡面初始产流时间由裸地 5.25, 1.40 min 分别延长至灌浆期 12.70, 7.63 min; 3°与 15°坡面平均产流强度在灌浆期分别降低至 0.52, 0.78 L/(m² · min), 平均产沙强度在灌浆期分别降低至 0.83, 2.07 g/(m² · min); 与裸地相比, 谷子由幼苗期生长至灌浆期, 坡面径流量减少 12.27%~48.24%, 产沙量减少 19.90%~84.00%。研究结果为揭示黄土高原谷子坡耕地侵蚀机理提供参考,并为区域高质量发展供科学依据。

关键词: 谷子; 土壤侵蚀; 坡度; 模拟降雨

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)03-0090-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.03.013

Runoff and Sediment Yield Processes in Millet Cultivated Land with Different Slopes Under Artificial Simulated Rainstorm in the Southern Loess Plateau

CHEN Keping¹, WU Faqi², YAO Chong¹

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

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

Abstract: Taking millet sloping farmland in the Loess Plateau as the research object, through artificial simulated rainfall test, the influence of millet at different growth stages on the erosion process of sloping farmland with different slope gradients was explored, and the characteristics and mechanism of the erosion process of sloping farmland in the Loess Plateau were revealed. According to the current policy of returning cultivated land to forest (grass), rainfall characteristics and millet growth characteristics in the experimental area, artificial rainfall simulation was conducted on millet planting slopes at four growth stages (seedling stage, jointing stage, heading stage and grout stage) under the conditions of 80 mm/h rainfall intensity and four slopes (3°, 5°, 10° and 15°). The results showed that millet had a significant impact on the erosion process of sloping farmland. With the growth of millet, the initial runoff yield time increased, the runoff yield curve tended to be stable in shorter time, and the average runoff and sediment yield intensity decreased, and the runoff and sediment reduction benefit of millet increased gradually. On the 3° and 15° slopes, the initial runoff yield time increased from 5.25 and 1.40 min on bare ground to 12.70 and 7.63 min at the grouting stage, respectively. On the 3° and 15° slopes, the average runoff yield strength decreased to 0.52 and 0.78 L/(m² · min) during the grouting period, and the average sediment yield strength decreased to 0.83 and 2.07 g/(m² · min) during the grouting period. Compared with bare field, runoff and sediment yield decreased by 12.27% ~ 48.24% and 19.90% ~ 84.00%, respectively, from seedling stage to grouting stage. The results

收稿日期: 2020-11-23

资助项目: 国家自然科学基金项目(41977065)

第一作者: 陈科兵(1997—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 2506333253@qq.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

could provide a reference for revealing the erosion mechanism of millet sloping farmland in the Loess Plateau and provide a scientific basis for regional high-quality development.

Keywords: millet; soil erosion; slope; simulated rainfall

黄土高原地区严重的水土流失问题是制约该地区社会经济发展和生态环境建设的重要因素,坡耕地作为黄土高原水土流失的主要发生地,开展坡耕地侵蚀规律研究对改善区域生态环境具有重大意义^[1-2]。植被防蚀机理的研究一直以来都是土壤侵蚀研究领域中的热点问题。植被的减流、减沙作用是其地上部分冠层截留、地面枯落物蓄水消能和地下根系固结土壤综合作用的结果^[3-4]。作为植被的重要组成部分,农作物的蓄水保土功能不容忽视^[5],然而,在黄土高原地区,研究更多的是林地和草地的防蚀机理,并取得了显著成果。已有研究^[6-8]表明,林草植被的林分郁闭度和草本、枯落物生物量是影响坡面产流产沙的主要因素。林地土壤侵蚀量随着林分郁闭度的增加而减少,当植被覆盖度达到 25%~30%时,林地土壤侵蚀量显著减少;当植被覆盖度达 60%时,植被的防蚀作用最佳。王栋栋等^[9]采用人工模拟降雨的方法发现,草被盖度的增大会减小草地的径流含沙量,当草被盖度由 30%增加至 70%,各草地径流含沙量分别降低 5, 10 kg/m³。植被的枯落物也是影响坡面径流泥沙的重要因素,刘京晶等^[10]通过室内土槽研究得出,森林枯落物的存在能够延长坡面初始产流时间 2.3~5.5 倍,与裸土坡面相比,枯落物可减小 47.9%~62.3%的坡面径流流速,减小 75%以上的径流泥沙。由此可见,林地和草地均具有良好的防蚀能力。

耕地不同于林地和草地,受作物结构种类单一、作物生长周期短、人为管理水平差异等因素影响,其抵抗土壤侵蚀的能力与林地和草地存在较大差异^[11]。李森等^[12]研究表明,耕地的侵蚀产沙量是林地的 2~4 倍,与林地相比,耕地的抗侵蚀能力较差。但与裸地相比,耕地作物调节径流泥沙的能力不能忽视^[13]。Singh 等^[14]通过种植大豆和花生研究发现,作物可降低坡耕地 29.6%的径流量和 27.7%的泥沙量;成婧等^[15]研究表明,通过玉米苜蓿间作能够达到 87%蓄水效益和 98%保土效应;孙从建等^[16]基于黄土区典型农作物的产流产沙特性研究发现,红薯是防治坡耕地水土流失的优良农作物;朱燕琴等^[17]通过连续 3 年观测,发现不同植被类型的年均土壤流失量特征为小麦地土壤流失量大于沙棘林、冰草地等地;徐宁等^[18]研究表明,大豆能显著调节坡面径流和泥沙,且减沙效益更为显著。综上所述,作物能有效调节坡耕地的径流和泥沙,且不同种类作物的防蚀能力差异明显。谷子作为黄土高原地区的特色农作物,广

泛种植于区内大部分地区的坡耕地上,其中晋南和关中地区可种植夏谷。目前,谷子在坡耕地防蚀方面发挥着重要作用^[19],但暴雨情况下谷子减流减沙作用对坡度变化的响应尚未明确。基于此,本试验以种植谷子的坡耕地为研究对象,采用人工模拟降雨的方式,研究不同生育期谷子在不同坡度下对坡耕地径流和侵蚀泥沙的调节效果,深化对谷子防蚀作用的认识,完善农作物防蚀机理方面的研究,为黄土坡耕地作物的选择提供参考和依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于陕西省杨凌农业高新技术产业示范区,地处黄土高原南部,东经 107°59′—108°08′,北纬 34°14′—34°20′,海拔高度为 468 m。试验区四季分明,属半湿润大陆性季风气候,年平均气温 12.9℃,年均降水量 635~646 mm,60%~70%的降雨出现在 7—9 月,且主要是降雨强度为 1~3 mm/min 的短时暴雨,年均蒸发量 993.2 mm,湿润指数 0.64。黄土高原地形以丘陵沟壑为主,其坡度大多在 24.9%~53.2%。试验区土地利用类型以农业用地为主,其中耕地利用率最高,达到 35.14%,现有耕地面积 5 724.03 hm²,试验区内主要作物为小麦、玉米、谷子、豆类等^[20-21],试验区土壤为关中平原主要农业土壤壤土,壤土是由森林褐土经人为长期耕作并施加土肥转化形成的一种特殊耕作土壤。

1.2 研究方法

本试验于 2019 年 7—8 月在西北农林科技大学水土保持荒漠化防治工程实验室径流小区上进行,采用人工模拟降雨的方法观测谷子坡耕地的坡面侵蚀过程。

试验土壤为杨凌壤土,取自当地农田表层 0—20 cm 的耕层土,试验作物谷子所用品种为“晋谷 29”,以 10 cm×20 cm 的株行距种植于长 4 m、宽 1 m 的径流小区上,播种前按 2 500 kg/hm² 的水平施加有机肥(腐熟羊粪)1 次和 400 kg/hm² 的水平施加磷酸二铵 1 次并进行人工翻耕整地,试验期间采用喷洒除草剂方式消除杂草影响,并设置裸坡 CK 作为对照。依据试验区现行的退耕还林(草)政策^[22]和杨凌地区降雨特强度点^[19,21],试验坡耕地共设置 3°,5°,10°,15°4 个坡度,降雨强度设置为 80 mm/h 代表暴雨情况。依据作物覆盖度差异情况,本试验在同一径流小区上分别于谷子的 4 个生育期(幼苗期 S1、拔节期

S2、抽穗期 S3 和灌浆期 S4) 进行人工模拟降雨试验, 模拟降雨历时共 60 min, 记录并观测不同生育期的谷子坡耕地侵蚀过程。

试验所采用的降雨设备为中国科学院水利部水土保持研究所研制的侧喷式降雨机, 整个降雨机由供水装置和 2 个独立的降雨支架组成。降雨支架主要包括供水压力控制装置、喷头支架和侧式喷头, 该降雨机的降雨高度为 7.5 m, 有效降雨面积为 $7\text{ m} \times 5\text{ m}$, 降雨均匀度 $>80\%$, 降雨强度的调控范围在 $30 \sim 140\text{ mm/h}$, 可采用调节水压力控制阀和更换喷头垫片的方式来调节雨强。降雨前先率定雨强, 满足要求后方可进行降雨试验。

1.3 指标测定与方法

降雨试验开始计时后, 观察并记录各小区的产流时间, 产流开始时用塑料小桶收集径流和泥沙样品 1 min, 往后每间隔 2 min 再收集径流和泥沙样品 1 min, 直至试验结束。降雨试验结束后, 称取每份径流和泥沙样品总重, 待样品静置 24 h 后倒掉上清液, 将沉淀的泥沙样品冲入铝盒, 放入 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中烘干至恒重, 称重。

1.4 数据分析

采用 Excel 2016 软件对试验数据进行统计和分析, 并用 Origin 2017 软件制作图表。为方便分析, 将试验过程中任意时刻下单位面积单位时间内产生的径流量定义为产流强度 ($\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$); 将单位面积单位时间内产生的泥沙量定义为产沙强度 ($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$), 并选择生长期 (幼苗期和灌浆期) 和坡度 (3° 和 15°) 的产流产沙过程进行对比分析。

2 结果与分析

2.1 谷子坡耕地初始产流时间的变化

坡度的变化对坡面初始产流时间有明显影响。由图 1 可知, 在 80 mm/h 雨强条件下, 随着坡度的增加, 各裸坡的初始产流时间依次为 5.25, 4.86, 2.75, 1.40 min, 15° 裸坡与 3° 裸坡相比, 初始产流时间提前了 3.85 min; 在谷子幼苗期时, 各坡耕地初始产流时间依次为 6.8, 6.21, 4.43, 3.40 min, 15° 耕地与 3° 耕地相比, 初始产流时间提前了 3.40 min; 在谷子灌浆期时, 各坡耕地初始产流时间依次为 12.7, 9.77, 8.03, 7.63 min, 15° 耕地与 3° 耕地相比, 初始产流时间提前了 5.07 min。由以上结果可以看出, 在雨强和谷子生育期相同的条件下, 坡度的增加会导致谷子坡耕地初始产流时间不断提前, 各坡度初始产流时间整体表现为 $3^{\circ} > 5^{\circ} > 10^{\circ} > 15^{\circ}$ 。

值得注意的是, 相同坡度条件下, 随着谷子的生长, 坡耕地初始产流时间也有明显差异, 这说明谷子

的生长也是影响坡耕地初始产流时间的重要因素。在 80 mm/h 雨强条件下, 随着谷子的生长, 3° 坡耕地的初始产流时间依次为 6.80, 8.22, 11.70, 12.70 min, 与裸坡相比, 3° 坡耕地的初始产流时间延长了 1.55 ~ 7.45 min; 15° 坡耕地的初始产流时间依次为 3.40, 5.22, 7.18, 7.63 min, 与裸坡相比, 15° 坡耕地的初始产流时间延长了 2.00 ~ 6.23 min。以上变化表明, 谷子具有明显推延坡面初始产流的作用, 在相同坡度条件下, 各生育期初始产流表现为 $S4 > S3 > S2 > S1 > \text{CK}$ 。这一变化主要与谷子的降雨截留和径流拦蓄作用有关, 雨滴到达坡面前部分降雨被谷子冠层截留并存储, 同时雨滴打击谷子叶片后再到达坡面, 该过程大大削减了雨滴动能; 坡耕地上谷子的存在降低了径流的流速, 使得径流在坡面上停留的时间增长, 从而导致坡耕地初始产流时间延长。

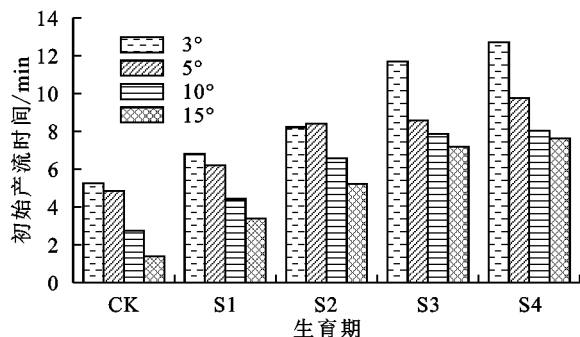


图 1 坡度变化和谷子生长对坡耕地初始产流时间的影响

2.2 谷子生长对坡耕地产流产沙过程的影响

由图 2 可知, 种植谷子对坡面的产流和产沙过程均有重要影响。在同一坡度条件下, 不同生育期谷子坡耕地的产流强度从产流开始后均表现为快速增长和稳定波动 2 个阶段。随着谷子的生长, 当坡度为 3° 时, 各坡耕地从产流开始到产流稳定波动依次用时 24, 18, 18, 15 min, 与幼苗期相比, 灌浆期谷子坡耕地的用时减少了 9 min; 当坡度为 15° 时, 各坡耕地从产流开始到产流稳定波动依次用时 21, 21, 18, 15 min, 与幼苗期相比, 灌浆期谷子坡耕地的用时减少了 6 min。这一结果表明, 谷子的生长使得坡面产流过程更快趋于稳定。除此之外, 各坡面的平均产流强度之间也存在明显差异。当坡面产流强度处于稳定波动阶段时, 3° 坡面条件下, 各生育期谷子坡耕地的平均产流强度依次为 0.78, 0.75, 0.63, 0.52 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$, 与幼苗期坡耕地相比, 灌浆期坡耕地平均产流强度降低了 33.3%; 15° 坡面条件下, 各生育期谷子坡耕地的平均产流强度依次为 1.08, 1.06, 0.85, 0.77 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$, 与幼苗期坡耕地相比, 灌浆期坡耕地平均产流强度降低了 28.7%。以上结果表明, 不同生育期谷子之间的拦蓄径流作用存在差异, 谷子的生长不仅使得坡耕地产流强度更快达到稳定波动的状态, 而且有效削减了坡耕

地的产流强度,总体来看,这一效果在灌浆期最为明显。这些变化是由于谷子幼苗期冠层稀疏,作物覆盖度低,对坡面径流抑制作用较弱。但当谷子生长至灌浆期时,作物覆盖度的大幅增加降低了近地面的实际雨强,谷子茎基部的拦挡减速作用增大了坡面入渗量,从而导致坡面产流强度明显减小,促进产流过程更快趋于平稳。

由图2可知,各生育期谷子坡耕地的产沙过程曲线差异较大。相同坡度条件下,幼苗期坡耕地的产沙过程曲线表现为快速增长,但随着谷子的生长,灌浆期坡耕地的产沙过程曲线表现缓慢的增长。当坡度为3°时,幼苗期谷子坡耕地的平均产沙强度为3.86 g/(m²·min),灌浆期谷子坡耕地的平均产沙强度为

0.83 g/(m²·min),后者与前者相比平均产沙强度减少了78.5%;当坡度为15°时,幼苗期谷子坡耕地的平均产沙强度为8.27 g/(m²·min),灌浆期谷子坡耕地的平均产沙强度为2.07 g/(m²·min),后者与前者相比平均产沙强度减少了75.0%。以上结果表明,谷子的生长对坡面产沙过程有着明显影响。谷子不仅抑制了坡耕地产沙强度的增长速率,而且有效削减了坡耕地的平均产沙强度,整体来看,谷子的拦蓄泥沙效果于灌浆期达到最佳。这是因为谷子幼苗期茎基部和根系细弱,谷子拦蓄泥沙和固结土壤的能力较差。但当谷子生长至灌浆期时,谷子茎基部阻挡泥沙搬运和根系固水保土的能力大大增强,削弱了径流搬运泥沙的能力,从而导致坡面产沙强度明显减小。

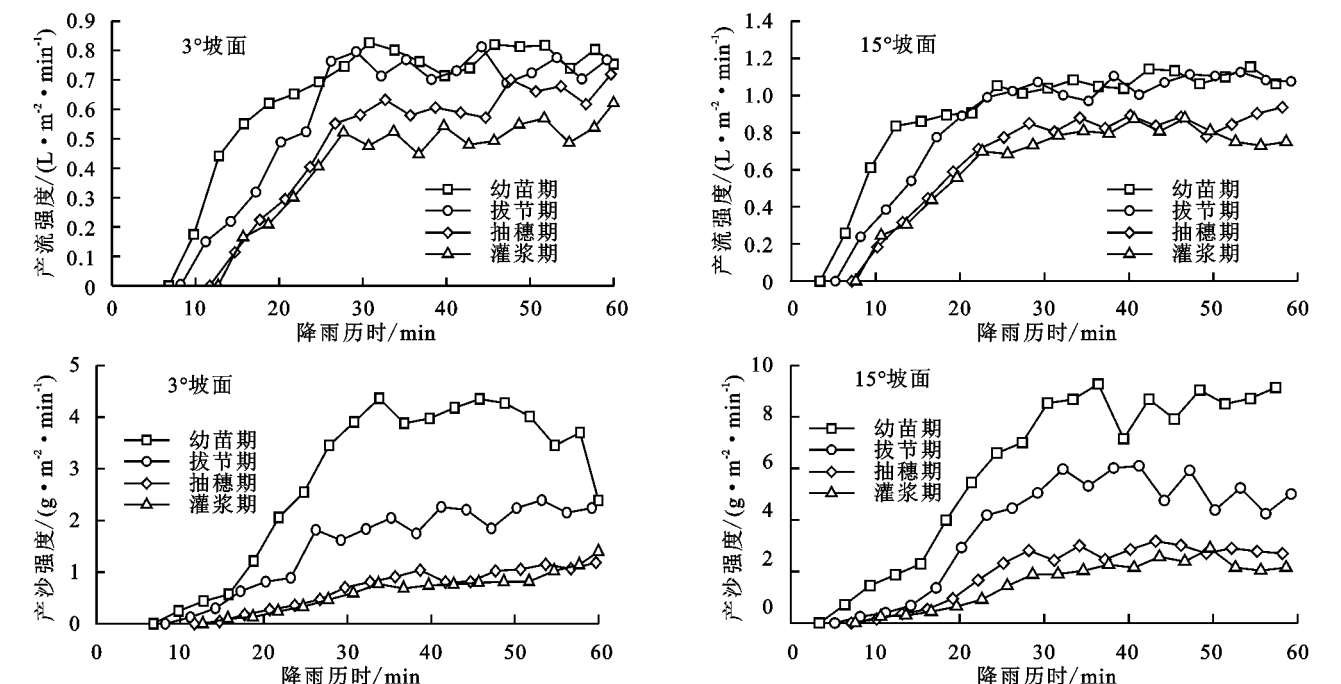


图2 谷子生长对坡耕地产流产沙过程的影响

2.3 坡度对坡耕地产流产沙过程的影响

由图3可知,坡耕地的产流和产沙过程均随着坡度增加具有明显变化。对于产流过程,在同一谷子生育期条件下,不同坡度坡耕地的产流过程曲线均表现为先快速上升后稳定波动,但随着坡度的增加,稳定波动区间的产流强度明显增加。当坡耕地的产流强度均处于稳定波动阶段时,随着坡度增大,幼苗期坡耕地的平均产流强度依次为0.78,0.79,1.06,1.08 L/(m²·min),15°坡耕地较3°坡耕地平均产流强度提高了38.5%;灌浆期坡耕地的平均产流强度依次为0.52,0.58,0.72,0.78 L/(m²·min),15°坡耕地较3°坡耕地平均产流强度提高了48.1%。这说明坡度的增加对坡耕地产流强度增加有明显促进作用。同时,不同坡度坡耕地的平均产沙强度也大不相同。对于产沙过程,随着坡度不断增加,幼苗期坡耕地的平均产沙强度依次为3.86,4.11,6.16,8.27 g/(m²·min),与3°坡

耕地相比,15°坡耕地平均产沙强度提高了114.2%;灌浆期坡耕地的平均产沙强度依次为0.83,1.02,1.70,2.07 g/(m²·min),与3°坡耕地相比,15°坡耕地平均产沙强度提高了149.4%。由此可见,坡度变化有效地影响了坡面产流产沙过程,与产流过程相比,坡度的变化对产沙过程的影响更为突出。

2.4 谷子坡耕地的减流效益和减沙效益

由表1可知,在相同生育期条件下,不同坡度谷子坡耕地的减流效益和减沙效益存在明显差异,均表现为减流效益和减沙效益随着坡度的增加而降低。当坡度由3°增大到15°,幼苗期谷子的减流效益由12.27%降低4.16%,减沙效益由19.90%降低至17.35%;拔节期谷子的减流效益由23.97%降低至11.88%,减沙效益由58.94%降低至51.21%;抽穗期谷子的减流效益由39.24%降低至32.16%,减沙效益由81.93%降低至74.16%;灌浆期谷子的减流效益由48.24%降低至

38.06%，减沙效益由 84.00%降低至 80.14%。整体来看，坡度的增加削减了谷子减流效益和减沙效益，且对减流效益的影响更大。值得注意的是，相同坡度条件下，不同生育期谷子坡耕地的减流效益和减沙效益也存在差异。随着谷子的不断生长，谷子的减流效应和减沙效益均不断增长。当坡度为 3°时，谷子坡耕地的减流效益和减沙效益分别由幼苗期的 12.27%和 19.90%增加到灌浆

期的 48.24%和 84.00%；当坡度为 15°时，谷子坡耕地的减流效应和减沙效益分别由幼苗期的 4.16%和 17.35%增加到灌浆期的 38.06%和 80.14%，各坡耕地减沙效益和减流效益均随着谷子的生长在灌浆期达到最佳效果，且每个生育期的减沙效益均大于减流效益，因此谷子具有良好的减流效益和减沙效益，而且其拦截泥沙的能力要优于拦蓄径流的能力。

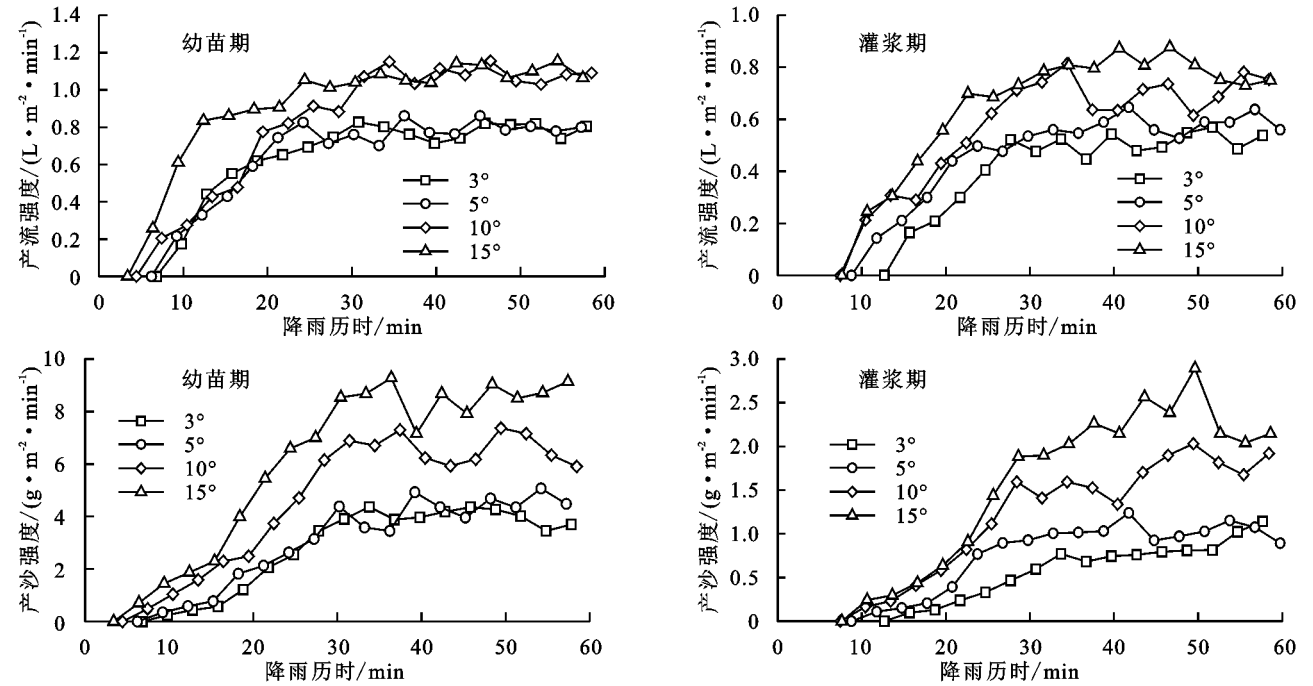


图 3 坡度变化对坡耕地产流产沙过程的影响

表 1 不同生育期各坡度谷子坡耕地的径流量和泥沙量

生育期	坡度/ (°)	径流量/ (L·m ⁻²)	减流量/ (L·m ⁻²)	减流 效益/%	泥沙量/ (g·m ⁻²)	减沙量/ (g·m ⁻²)	减沙 效益/%
裸地	3	42.97			200.33		
	5	43.38			220.67		
	10	53.55			352.33		
	15	58.25			449.00		
幼苗期	3	37.70	5.27	12.27	160.47	39.86	19.90
	5	38.11	5.26	12.14	177.52	43.15	19.55
	10	49.53	4.02	7.50	285.38	66.95	19.00
	15	55.82	2.42	4.16	371.09	77.91	17.35
拔节期	3	32.67	10.30	23.97	82.26	118.07	58.94
	5	35.11	8.27	19.07	95.45	125.22	56.74
	10	45.15	8.39	15.67	153.24	199.10	56.51
	15	51.33	6.92	11.88	219.08	229.92	51.21
抽穗期	3	26.11	16.86	39.24	36.21	164.13	81.93
	5	26.09	17.29	39.87	42.76	177.91	80.62
	10	36.04	17.51	32.69	84.91	267.42	75.90
	15	39.51	18.74	32.16	116.01	332.99	74.16
灌浆期	3	22.24	20.73	48.24	32.05	168.29	84.00
	5	25.90	17.48	40.29	42.10	178.57	80.92
	10	32.76	20.78	38.81	69.45	282.89	80.29
	15	36.08	22.17	38.06	89.18	359.82	80.14

3 讨论

植被的防蚀作用是其地上部分截留拦蓄和地下根系固结土壤共同作用的结果^[4],在降雨到达坡面之前,谷子冠层截留并存储部分雨滴,减少了到达坡面的雨滴数量,降低了近地面的实际雨强,这与马波等^[23]采用人工喷雾法的观测结果相似;雨滴打击谷子叶片后再到达坡面,导致雨滴动能大幅削减,压实坡面就需要更多的雨滴,最终促使坡面初始产流时间延长,这与刘战东等^[24]的试验结论基本一致;谷子根茎拦挡径流,减缓流速,使得径流在坡面上停留的时间增长,至使径流下渗增多,与裸地相比,谷子坡耕地的初始入渗率、稳定入渗率、累计入渗量均有所提高,进而影响了坡面初始产流时间和坡面径流总量^[25];徐宁等^[18]研究表明,大豆的减沙效应相比于减流效应更为显著,本试验中谷子的减沙效益也是优于减流效应;作物的防蚀功能是随着作物生长而不断增大的,但其防蚀能力是有限的,作物生长到一定阶段后,其拦沙蓄水的能力会趋于稳定^[16];将谷子坡耕地的减流减沙效益与玉米、大豆^[18,26]坡耕地相比发现,谷子的减流减沙效益稍低于大豆,但优于玉米,因此谷子是优良的坡耕地防蚀作物。坡度作为影响坡面侵蚀的重要因素,坡面的平均产流强度和产沙强度均与坡度呈正相关关系,这与苏远逸等^[27]的研究结论相同。

坡耕地的侵蚀规律不仅受作物生育期和坡度的影响,还与降雨强度密切相关。降雨作为坡面侵蚀的动力来源,是影响坡面侵蚀的重要因素^[28]。本试验在探究谷子坡耕地侵蚀规律时,仅设计了代表暴雨情况的降雨强度,未能全面反映谷子坡耕地的侵蚀状况。因此在以后的研究中需要增设不同的降雨梯度,以便更加系统地分析和探究坡耕地作物的防蚀作用。

4 结论

(1)谷子的生长和坡度的变化均是影响谷子坡耕地初始产流时间的重要因素。在雨强和谷子生育期相同的条件下,坡度由 3°增大到 15°,坡耕地的初始产流时间不断提前;与此相反,在雨强和坡度相同的条件下,谷子由幼苗期生长至灌浆期,坡耕地初始产流时间不断延长,并于谷子灌浆期时达到最大。与坡度变化的影响相比,谷子生长对于坡面初始产流时间的影响更为明显。

(2)谷子的生长有效地影响了坡面产流产沙过程,随着谷子生育期的延伸,坡面产流过程更快趋于平稳,平均产流强度和平均产沙强度逐渐降低,谷子削减径流泥沙的效果于灌浆期达到最佳。

(3)坡面平均产流强度和产沙强度对坡度变化表现出不同响应,15°坡耕地平均产流强度较 3°坡耕地

提高了 38.5%~48.1%;15°坡耕地平均产沙强度较 3°坡耕地提高了 114.3%~149.4%,因此,坡度变化是影响坡面侵蚀过程的重要因素,且对产沙过程的影响更为突出。

(4)在暴雨条件下,谷子具有明显的减流和减沙效益,且减沙效应更为突出。同时,谷子的减流和减沙效应均与坡度呈负相关关系,各坡度谷子坡耕地的减流减沙效益表现为 3°>5°>10°>15°。

参考文献:

[1] 唐克丽.中国土壤侵蚀与水土保持学的特点及展望[J].水土保持研究,1999,6(2):3-5.

[2] 唐克丽.退耕还林还牧与保障食物安全的协调发展问题[J].中国水土保持,2000(8):37-39.

[3] 汪有科,吴钦孝,韩冰,等.森林植被水土保持功能评价[J].水土保持研究,1994,1(3):24-30.

[4] 杨晓芬,吴发启,马波,等.黄土坡耕地玉米作物的防蚀作用研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2012,40(10):97-102.

[5] 李小辉,贾本有,范子武,等.典型作物对水土流失影响的小区试验研究[J].水利水电技术,2019,50(2):95-100.

[6] 余新晓,张晓明,武思宏,等.黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J].山地学报,2006,24(1):19-26.

[7] Evans R. Water erosion in British Farmers fields: Some causes, impacts, predictions [J].Progress in Physical Geography,1990,14(2):199-219.

[8] 侯喜禄,白岗桢,曹清玉.黄土丘陵区森林保持水土效益及其机理的研究[J].水土保持研究,1996,3(2):98-103.

[9] 王栋栋,王占礼,张庆玮,等.草地植被覆盖度坡度及雨强对坡面径流含沙量影响试验研究[J].农业工程学报,2017,33(15):119-125.

[10] 刘京晶,马岚,薛孟君,等.不同处理下油松枯落物减流减沙效应试验研究[J].水土保持学报,2019,33(4):126-132.

[11] 吴佳.黄土高原旱坡地秋作入渗蓄水与防蚀作用特征研究[D].西安:西安理工大学,2016.

[12] 李森,宋孝玉,沈冰,等.黄土沟壑区不同植被对产流产沙的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2006,34(1):117-120.

[13] Udayakumara E P N, Shrestha R P, Samarakoon L, et al. People's perception and socioeconomic determinants of soil erosion: A case study of Samanalawewa watershed, Sri Lanka [J].International Journal of Sediment Research, 2010,25(4):323-339.

[14] Singh R K, Panda R K, Satapathy K K, et al. Simulation of runoff and sediment yield from a hilly watershed in the eastern Himalaya, India using the WEPP model [J].Journal of Hydrology,2011,405(3/4):261-276.

(下转第 103 页)

持情况公报[J].中国水土保持,2013(10):2-3.

[11] Abedini M, Said M A M, Ahmad F. Effectiveness of check dam to control soil erosion in a tropical catchment (The Ulu Kinta Basin) [J]. Catena, 2012, 97: 63-70.

[12] Wang Y F, Fu B J, Chen L D, et al. Check dam in the Loess Plateau of China: Engineering for environmental services and food security [J]. Environmental Science and Technology, 2011, 45: 10298-10299.

[13] 张喜旺,秦奋.砒砂岩地区降雨与植被耦合关系对侵蚀产沙的影响[J].地理研究,2016,35(3):513-524.

[14] 陈赛赛,杨艳丽,孙艳玲,等.1984—2013 年于桥水库流域土地利用变化对植被覆盖度的影响[J].天津师范大学学报(自然科学版),2016,36(2):39-46.

[15] 李耀军,魏霞,李勋贵,等.淤地坝坝控流域土地利用类型空间优化配置研究[J].兰州大学学报,2016,52(3):307-312.

[16] 黄志霖,陈利顶,傅伯杰,等.半干旱黄土丘陵沟壑区不同植被类型减蚀效应及其时间变化[J].中国水利,2004(20):38-40.

[17] 付艳玲,张晓萍,陈凤娟,等.黄土区退耕背景下土地利用/覆被格局现状调查研究:以安塞县马家沟流域为例[J].水土保持研究,2010,17(6):81-85.

[18] 党小虎,刘国彬,孟文文,等.基于虚拟水的小流域综合治理水资源响应[J].人民黄河,2013,35(3):55-57.

[19] 吴艳,张晓萍,陈凤娟,等.陕北典型流域退耕后土壤侵蚀及空间分布初步调查研究[J].水土保持研究,2010,17(4):29-33.

[20] 范利杰.皇甫川坝控小流域侵蚀产沙强度与泥沙来源研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2013.

[21] 中华人民共和国水利部.SL 190—2007 土壤侵蚀分类分级标准[S].北京:中国水利水电出版社,2008.

[22] 魏霞,李占斌,李鹏,等.黄土高原典型淤地坝淤积机理研究[J].水土保持通报,2006,26(6):10-13.

[23] Zhao G J, Mu X M, Han M W, et al. Sediment yield and sources in dam-controlled watersheds on the northern Loess Plateau [J]. Catena, 2017, 149: 110-119.

[24] Wei Y H, He Z, Jiao J Y, et al. Variation in the sediment deposition behind check-dams under different soil erosion conditions on the Loess Plateau, China [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2018, 43: 1899-1912.

[25] Zhao G J, Klik A, Mu X M, et al. Sediment yield estimation in a small watershed on the northern Loess Plateau, China [J]. Geomorphology, 2015, 241: 343-352.

[26] 张信宝,焦菊英,贺秀斌,等.允许土壤流失量与合理土壤流失量[J].中国水土保持科学,2007,5(2):114-116.

(上接第 95 页)

[15] 成婧,吴发启,路培,等.玉米苜蓿间作的蓄水保土效益试验研究[J].水土保持研究,2012,19(3):54-57.

[16] 孙从建,侯慧新,陈伟,等.黄土丘陵沟壑区典型农作物产流产沙效应研究[J].水土保持研究,2020,27(2):99-103,111.

[17] 朱燕琴,赵志斌,齐广平.黄土丘陵区植被类型和降雨对坡面侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2019,33(2):9-16.

[18] 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.

[19] 马波,马璠,李占斌,等.模拟降雨条件下作物植株对降雨再分配过程的影响[J].农业工程学报,2014,30(16):136-146.

[20] 于海影,韦安胜,陈竹君.杨凌示范区土地利用现状分析与评价[J].水土保持研究,2015,22(5):158-162.

[21] 杨陵区地方志编撰委员会.杨陵区志[M].西安:西安地图出版社,2004.

[22] 李方越,曹明明.陕西省 15°以上坡耕地利用与退耕还林技术对策[J].水土保持通报,2001,21(5):49-52.

[23] 马波,耿晓晨,马璠,等.模拟降雨条件下谷子和冬小麦植株对降雨再分配过程的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(6):207-214.

[24] 刘战东,高阳,段爱旺,等.麦田降雨产流过程的影响因素[J].水土保持学报,2012,26(2):38-44.

[25] 吴佳,王林华,李占斌,等.中小雨强下谷子坡地的降雨入渗特征模拟[J].西北农林科技大学学报,2015,43(6):228-234.

[26] 王计磊,吴发启.种植玉米对黄土坡面径流侵蚀特征及养分流失量的影响[J].泥沙研究,2016(6):44-50.

[27] 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.

[28] 姚冲,查瑞波,黄少燕,等.模拟降雨条件下第四纪红黏土坡面侵蚀过程[J].水土保持学报,2018,32(3):10-15.