

喷施 Jag C162 对黄土坡面水流切应力影响研究

陆绍娟^{1,3}, 王占礼^{1,2}, 王栋栋²

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为研究连续两场降雨过程中喷施不同剂量 Jag C162 对黄土坡面水流切应力的调控效应, 在 20° 坡度, 2.0 mm/min 雨强条件下对裸坡和喷施 Jag C162 剂量为 1, 3, 5 g/m² 的坡面进行连续两场模拟降雨试验, 主要结论有: (1) 在连续两场降雨过程中, 裸坡和喷施不同剂量 Jag C162 的坡面水流切应力随降雨历时的变化皆呈先增加后趋于稳定的状态, 都可用对数方程描述, 且喷施不同剂量 Jag C162 的坡面水流切应力皆比裸土坡面水流切应力小, 喷施不同剂量 Jag C162 的坡面产流时间也均晚于裸土坡面产流时间; (2) 在连续两场降雨过程中, Jag C162 具有减小坡面水流切应力的作用, 且随 Jag C162 剂量增大, 其对坡面水流切应力影响的持效性增强; (3) 综合考虑 Jag C162 对坡面水流切应力调控作用的稳定性及持效性, 建议在连续两场降雨中采用剂量 5 g/m² 的 Jag C162 调控坡面水流切应力, 以期达到控制土壤侵蚀的目的。

关键词: Jag C162; 黄土坡面; 水流切应力; 调控

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)02-0031-05

Effects of Spraying Jag C162 on Flow Shear Stress on Loess Slope

LU Shaojuan^{1,3}, WANG Zhanli^{1,2}, WANG Dongdong¹

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water

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

University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To study the regulation of Jag C162 on flow shear stress on the loess slope, the chemical regulation of surface water and sediment process were monitored under two continuous simulated rainfall experiments with the rainfall intensities of 2.0 mm/min, slopes of 20°, Jag C162 dosage of 1, 3, 5 g/m² in way of spraying. The main results are as follows. (1) On two simulated rainfall experiments, the flow shear stress of bare slope and slope with spraying different doses of Jag C162 first increase, and then presented the stability, and the processes could be described by the logarithmic equation. The variation values of flow shear stress of bare slope are greater than those of flow shear stress of slope with spraying different doses of Jag C162, the runoff yields on the slope with spraying different doses of Jag C162 were later than those on the bare slope, and the initial of stable trend on the slope with spraying different doses of Jag C162 was also later than the bare slope. (2) In the process of continuous rainfall, Jag C162 could reduce the flow shear stress on slope surface, and significantly narrow the difference of shear stress between two rainfall events; with Jag C162 doses increasing, the effects of Jag C162 on the slope surface shear stress enhanced. (3) Considering the influence of Jag C162 on reducing flow shear stress on slope surface, Jag C162 dose of 5 g/m² was recommended to research regulation of Jag C162 on the slope surface flow hydraulic parameters, and control the soil erosion on loess slope.

Keywords: Jag C162; loess slope; flow shear stress; regulation

黄土高原地处我国半干旱、干旱区, 年降雨量在 200~700 mm^[1]。该区降水变率大, 往往以暴雨形式

出现, 加之地形陡峭, 土质疏松, 极易产生超渗产流, 造成严重的土壤侵蚀。因此, 加强黄土高原土壤侵蚀

治理措施的研究十分重要。化学调控技术措施作为一项新兴的水土保持技术措施,主要是通过高分子聚合物增加土壤团聚体含量^[2],降低土壤容重,增大土壤孔隙度^[3],增加土壤入渗,降低土壤侵蚀^[4-6]。经高分子聚合物 PAM 处理的坡面,土壤入渗量增加,土壤流失量减少,随 PAM 的覆盖率增大,土壤的降水入渗率增加,土壤流失量减少^[7-8]。

从物理学角度来看,土壤侵蚀实际上就是地表土壤在力的作用下发生土体空间位移的过程,地表径流冲刷是坡面土壤侵蚀的主要动力。只有当坡面水流剪切应力大于土壤临界剪切力时,土壤颗粒才能被剥蚀^[9],且土壤剥蚀率随水流剪切力的增大而增加^[10-11]。在坡面进行调控措施处理后,坡面水流临界应力发生改变,水流需要更大的切应力才能分离土壤颗粒^[12]。刘纪根在坡面施加 PAM 后发现,坡面临界坡长、临界水深及土壤临界剪切力均提高^[13],土壤的可蚀性显著降低,径流临界剪切力增加^[14]。

显然,施用高分子聚合物后,通过改善土壤结构、增加入渗,坡面径流发生变化,间接影响了坡面径流切应力,最终对坡面土壤侵蚀产生影响。然而,高分

子聚合物对坡面径流切应力的具体影响如何仍然并不清楚,这阻碍了高分子聚合物对土壤侵蚀影响的机理阐释。为此,本文根据黄土高原坡面坡度及降雨特征,采用模拟降雨试验方法,在大坡度大雨强条件下,研究连续两场降雨过程中施放不同剂量 Jag C162 对黄土坡面水流切应力的调控作用及持续效应,以深入解析 Jag C162 在连续两场降雨过程中对黄土坡面片蚀过程的调控机理,为通过化学材料调控遏制黄土坡面土壤侵蚀提供科学依据。

1 材料与方法

本试验在中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀和旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨大厅进行。降雨方式为侧喷式模拟降雨,降雨高度 16 m,可满足所有降雨雨滴达到终点速度。试验装置为钢质变坡小区,小区规格为:120 cm×40 cm×25 cm。试验设计坡度为 20°,降雨强度为 2.0 mm/min。

试验土壤取自黄土高原陕西省绥德县,土壤类型为黄绵土,土壤颗粒组成见表 1。试验前期土壤容重均为 1.2 g/cm³,前期含水量均为 14%。

表 1 试验土壤机械组成

粒级	细黏粒	粗黏粒	细粉粒	中粉粒	粗粉粒	细砂粒
粒径/mm	<0.001	0.001~0.002	0.002~0.005	0.005~0.01	0.01~0.05	0.05~0.25
比例/%	7.15	2.75	3.29	4.80	53.42	28.60

试验前将土壤自然风干并过 10 mm 粗筛,除去杂草和大石块。试验小区装土之前,在底部铺 5 cm 的天然细沙,再铺上透水纱布,以保持土层的透水状况接近天然坡面。为保证装土的均匀性,试验小区采用分层填装的方法,即按设计容重每 5 cm 一层装填,边填充边压实。为减小边壁对入渗和产流产沙过程及坡面侵蚀微形态发育等的影响,使下垫面土壤条件的变异性达到最小,装土时在所有边界 0.5 cm 范围里加以夯实。填土后,用刮板将表面刮平整。

试验所用化学材料 Jag C162 是一种从豆胚中提取的天然高分子多肽衍生物,呈黄白色粉末,极易溶于水形成胶体状。试验开始前将设计剂量的 Jag C162 溶于 2 L 水中,搅拌 30 min 左右,使其形成稳定胶体,采用喷施方式均匀喷洒于试验小区土表。为使 Jag C162 和土壤充分作用,喷施 Jag C162 后放置 15 h 再进行降雨试验。

土壤表面处理:裸土和喷施 Jag C162 的剂量为 1,3,5 g/m²。进行连续两场降雨试验,重复 1 次,共进行 16 场降雨试验。试验开始后,一旦产流,立即在小区出口接样。产流后的前 3 min 内,分别间隔 1 min,2 min 观测 1 次,以后每隔 3 min 观测 1 次,降雨总历时为 30

min。降雨结束后,量取接样浑水体积,并通过烘干称重法计算得到接样泥沙体积,进而计算清水径流量。用染色示踪法测定坡面流速,然后将实测表面流速乘以修正系数 0.67 作为水流断面平均流速^[15]。通过流量与流速计算得到水深后,根据水流切应力公式^[16](1)计算得出不同时刻的坡面水流切应力:

$$\tau = \gamma R J \quad (1)$$

式中: τ 表示水流切应力(Pa)或(N/m²); γ 表示水流容重(N/m³); R 表示水力半径(m),对于本研究的薄层水流,近似用水深 h 代替; J 表示水力坡度, $J = \sin\theta$, θ 为床面坡度。

2 结果与分析

2.1 喷施 Jag C162 对坡面水流切应力随第一场降雨过程变化的影响

对比分析图 1,喷施不同剂量 Jag C162 的坡面水流切应力随第一场降雨过程变化与裸土坡面水流切应力随第一场降雨过程变化基本相似,整体皆随第一场降雨历时延长先增大后趋于相对稳定。不同在于,裸土坡面水流切应力整体大于喷施不同剂量 Jag C162 的坡面水流切应力。裸土坡面水流切应力在产

流后 1~9 min 随降雨时间先快速上升,之后缓慢增加,最后趋于相对稳定在 0.309 Pa 左右。相比之下,喷施 Jag C162 剂量为 1,3,5 g/m² 的坡面水流切应力在产流后的 1~24 min 内随第一场降雨历时的变化快速上升,随后分别稳定在 0.267,0.260,0.282 Pa。在产流后的 12~21 min 喷施剂量 3,5 g/m² 下的坡面水流切应力随降雨历时的变化十分接近,而从产流后 24 min 到降雨结束,喷施 Jag C162 剂量为 1,3 g/m² 坡面水流切应力随降雨过程变化较接近。喷施 Jag C162 的坡面产流时间皆晚于裸土坡面产流时间,且随 Jag C162 剂量增加,坡面产流时间往后延迟。

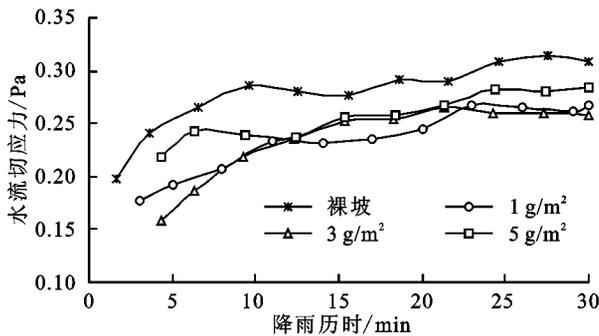


图 1 坡面水流切应力随第一场降雨过程变化

从水流切应力随降雨历时变化的增幅来看,喷施剂量为 5 g/m² 的坡面水流切应力随降雨过程的变幅小于裸坡与剂量为 1,3 g/m² 的坡面水流切应力的变幅。可能是因为喷施 Jag C162 剂量为 5 g/m² 的坡面形成的“保护膜”比剂量 1,3 g/m² 下的坡面更加致密,使坡面初始入渗率低于裸坡和剂量 1,3 g/m² 下的坡面,坡面平均水深高于裸坡和剂量 1,3 g/m² 下的坡面,坡面水流切应力的初始值 0.219 Pa 高于裸土坡面水流切应力的初始值 0.198 Pa 和剂量为 1,3 g/m² 的坡面水流切应力初始值 0.178,0.158 Pa^[17-19]。

对不同土壤处理下的坡面水流切应力随第一场降雨过程变化的试验数据进行函数拟合分析,将裸坡与喷施不同剂量 Jag C162 的坡面水流切应力随第一场降雨过程变化的经验方程列于表 2。将裸坡和喷施 Jag C162 剂量为 1,3,5 g/m² 的降雨历时带入表 2 的经验方程中,可计算出裸坡和喷施 Jag C162 剂量为 1,3,5 g/m² 的坡面水流切应力随降雨过程变化的初始预测值分别为 0.206,0.173,0.168, Pa,而其趋于稳定的预测值分别为 0.302,0.255,0.260,0.270 Pa。对比图 1,裸坡和喷施不同剂量 Jag C162 的坡面水流切应力随降雨历时变化的预测值接近于实测值。从表 2 中的相关系数来看,裸坡和喷施不同剂量 Jag C162 的坡面水流切应力与降雨历时显著相关。说明裸坡和喷施不同剂量 Jag C162 的坡面水流切应力随第一场降雨过程变化规律基本上可用对数方程很好地描述。

表 2 喷施不同剂量 Jag C162 的坡面水流切应力随第一场降雨过程变化的经验方程

喷施 Jag C162 的剂量/(g·m ⁻²)	回归方程	决定系数 R ²	显著性水平
裸坡	$\tau=0.035\ln(t)+0.190$	0.940	0.01
1	$\tau=0.040\ln(t)+0.129$	0.960	0.01
3	$\tau=0.053\ln(t)+0.091$	0.916	0.01
5	$\tau=0.031\ln(t)+0.171$	0.881	0.01

注: τ 为水流切应力(Pa 或 N/m²); t 为产流后的降雨时间(min),下同。

2.2 喷施 Jag C162 对坡面水流切应力随第二场降雨过程变化的影响

喷施不同剂量 Jag C162 的坡面水流切应力随第二场降雨过程变化与裸土坡面水流切应力随第二场降雨过程变化基本相似,总体呈随第二场降雨过程先增大后趋于相对稳定的状态,不同在于,裸土坡面水流切应力整体上要比喷施不同剂量 Jag C162 的坡面水流切应力大(见图 2)。裸土坡面水流切应力随第二场降雨历时的变化,在产流后 1~4 min 快速增加,产流后 4~24 min 呈波动缓慢上升,从产流后 24 min 到降雨结束趋于相对稳定。与裸土坡面水流切应力变化趋势基本相似,喷施 Jag C162 剂量为 1,3 g/m² 的坡面水流切应力随第二场降雨过程在产流后 1~4 min 快速增加,产流后 4~27 min 呈波动缓慢上升,从产流后 27 min 到降雨结束趋于相对稳定,而剂量为 5 g/m² 的坡面水流切应力在产流初期随降雨过程变化快速增加,在产流后 15 min 到降雨结束趋于稳定。整体而言,在第二场降雨过程中喷施不同剂量的坡面水流切应力之间差别不大,但还是呈现出喷施 Jag C162 剂量越大,坡面水流切应力越小的特点。说明在连续两场降雨后,Jag C162 剂量越大,其减小水流切应力的持效性越好。喷施不同剂量 Jag C162 的坡面产流时间稍晚于裸土坡面产流时间(除剂量为 1 g/m² 的坡面产流时间与裸土坡面产流时间一致外)。

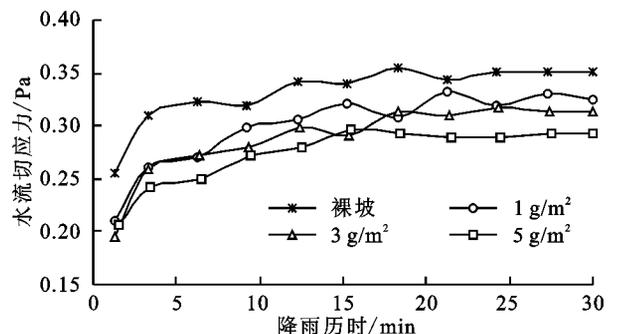


图 2 坡面水流切应力随第二场降雨过程变化

对不同土壤处理下的坡面水流切应力随第二场降雨过程变化的试验数据进行函数拟合分析,得到裸坡与喷施不同剂量 Jag C162 的坡面水流切应力随第二场降雨过程变化的经验方程(表 3)。将降雨历时

带入裸坡和喷施 Jag C162 剂量为 1, 3, 5 g/m² 的坡面水流切应力随第二场降雨过程变化的经验方程中, 计算得到裸坡和喷施 Jag C162 剂量为 1, 3, 5 g/m² 的坡面水流切应力随第二场降雨历时变化的初始预测值分别为 0.270, 0.218, 0.211, 0.213 Pa, 其趋于稳定的预测值分别为 0.352, 0.331, 0.315, 0.281 Pa。而裸坡和喷施 Jag C162 剂量为 1, 3, 5 g/m² 的坡面水流切应力随第二场降雨历时变化的初始实测值分别为 0.256, 0.210, 0.196, 0.207 Pa, 趋于稳定的实测值分别为 0.351, 0.331, 0.313, 0.297 Pa。对比发现, 裸坡和喷施 Jag C162 剂量为 1, 3, 5 g/m² 的坡面水流切应力随降雨过程变化的预测值与的实测值很接近。裸坡和喷施不同剂量 Jag C162 的坡面水流切应力与降雨历时相关性显著(表 3)。说明裸坡和喷施不同剂量 Jag C162 的坡面水流切应力随第二场降雨过程的变化可用对数方程可很好地描述。

表 3 喷施不同剂量 Jag C162 的坡面水流切应力
随第二场降雨过程变化的经验方程

喷施 Jag C162 的 剂量/(g·m ⁻²)	回归方程	决定系数 R ²	显著性 水平
裸坡	$\tau=0.028\ln(t)+0.263$	0.913	0.01
1	$\tau=0.037\ln(t)+0.209$	0.952	0.01
3	$\tau=0.035\ln(t)+0.200$	0.934	0.01
5	$\tau=0.029\ln(t)+0.202$	0.932	0.01

对比图 1 和图 2 可看出, 裸坡和喷施不同剂量 Jag C162 的坡面水流切应力随连续两场降雨过程的变化皆呈先增加后趋于相对稳定的状态, 裸土坡面水流切应力整体的变化过程均大于喷施 Jag C162 的坡面水流切应力变化过程。不同在于, 在第一场降雨过程中, 坡面水流切应力随降雨历时的变化整体表现为剂量越大, 水流切应力越大; 而坡面水流切应力随第二场降雨历时的变化整体表现为剂量越大, 水流切应力越小。

根据公式(1)可知, 坡面水流切应力的变化是水力半径与水力坡度变化的综合表现, 其中在薄层水流中水力半径的变化取决于水深的变化。本试验是在同坡度定雨强条件下进行的, 坡面水流的水力坡度是定值, 因此坡面水流切应力的变化主要受坡面水深变化的影响。在降雨初期, 由于表层土壤含水量低, 土壤的入渗能力高, 降雨基本全部入渗, 地表不能形成径流, 随着降雨继续, 雨水入渗使土壤含水量增大, 表层土壤含水量逐渐达到饱和, 加之雨滴打击地表产生的溅蚀颗粒阻塞土壤孔隙, 土壤入渗率减弱, 当坡面入渗率小于降雨强度时, 坡面产生径流。产流开始后, 随着降雨历时的延长, 坡面土壤入渗逐渐减弱, 导致坡面径流率增加, 坡面水深在径流初始阶段也增加。之后土壤含水

量逐渐增加, 土壤孔隙变少, 土壤入渗逐渐趋于稳定, 坡面径流率趋于相对稳定^[17-19], 坡面水深也趋于稳定。裸坡和喷施 Jag C162 的坡面径流水深随降雨历时延长呈现先上升后趋于稳定的变化态势, 进一步影响坡面水流切应力的变化, 因此, 裸坡和喷施不同剂量的 Jag C162 坡面水流切应力随两场降雨过程的变化皆表现为先增大后趋于稳定的状态。

相比于裸坡, 喷施 Jag C162 的坡面 > 0.25 mm 土壤水稳性团聚体含量提高^[18-19], 一方面土壤孔隙增大, 土壤入渗能力增强, 坡面径流减少, 坡面水深降低, 另一方面土壤抗击溅能力增强, 从而抑制结皮的形成, 使土壤孔隙不易被堵塞, 坡面入渗增强。因此在连续两场降雨过程中喷施不同剂量 Jag C162 的坡面水流切应力整体上要小于裸坡水流切应力小。此外, 喷施不同剂量 Jag C162 的坡面入渗能力增强, 使坡面开始产流时间推迟, 水流切应力随降雨变化趋于稳定的时间也推迟。

2.3 Jag C162 对连续两次降雨过程平均切应力的影响

将第一场降雨和第二场降雨的试验数据分析计算后列于表 4。从表 4 可见, 在第一场降雨过程中, 喷施不同剂量 Jag C162 的坡面平均切应力均小于裸土坡面平均切应力, 而随 Jag C162 剂量增加, 坡面平均切应力增加。相比裸坡, 喷施 Jag C162 剂量为 1, 3, 5 g/m² 的坡面平均水流切应力分别减少 15.49%, 15.47%, 7.76%。说明在第一场降雨中, 喷施 Jag C162 能够降低水流切应力, 且剂量为 1, 3 g/m² 的 Jag C162 减小坡面水流切应力的效果最好。

在第二场降雨过程中, 喷施不同剂量 Jag C162 的坡面平均切应力均小于裸土坡面平均切应力, 且随 Jag C162 剂量增加, 坡面平均切应力减小。相比裸坡, 喷施 Jag C162 剂量为 1, 3, 5 g/m² 的坡面平均水流切应力分别减少 9.85%, 13.13% 和 17.46%。说明在第二降雨过程中, Jag C162 剂量越大, 其减小坡面平均水流切应力的效应越好。

比较第一场降雨和第二场降雨下喷施不同剂量 Jag C162 的坡面和裸坡平均水流切应力发现, 对于同一剂量, 第二场降雨下的坡面平均水流切应力均大于第一场降雨下的坡面平均水流切应力, 且第二场降雨下的平均切应力与第一场降雨下的平均切应力差值大小为: 1 g/m² > 裸坡 > 3 g/m² > 5 g/m²。将喷施 Jag C162 在同一剂量下, 连续两场降雨间的平均切应力之差与裸坡两场降雨间之差相比, 得到两场降雨间喷施 Jag C162 剂量为 1, 3, 5 g/m² 的坡面平均水流切应力相比裸坡分别减少 -19.81%, 0.84%, 68.42%。说明在连续两场降雨过程中,

Jag C162 能明显缩小两场次降雨间坡面水流切应力的差异,且随着 Jag C162 剂量增大,其对坡面切应力影响的持效性越好。

在对第一场降雨和第一场降雨过程中的坡面水流切应力进行 LSD 多重比较中发现,在第一场降雨中,裸坡水流切应力与喷施 Jag C162 三个剂量的坡面水流切应力存在显著性差异,而喷施 Jag C162 的三个剂量之间没有显著性差异;在第二场降雨中,裸坡水流切应力与喷施 Jag C162 三个剂量的坡面水流切应力存在显著性,而喷施 Jag C162 的三个

剂量之间没有显著性差异。对第二场降雨中不同土壤处理的坡面水流切应力与第一场降雨中不同土壤处理的坡面水流切应力的差值进行 LSD 多重比较,喷施 Jag C162 剂量 5 g/m² 的坡面水流切应力与裸坡、喷施 Jag C162 剂量 1 g/m² 和剂量 3 g/m² 的坡面平均水流切应力存在显著性差异。因此,综合考虑 Jag C162 对坡面水流切应力调控作用的稳定性及持效性,建议在连续两场次降雨中采用剂量 5 g/m² 的 Jag C162 调控坡面水流切应力,以期达到控制土壤侵蚀的目的。。

表 4 两场降雨过程中喷施不同剂量 Jag C162 与裸土坡面平均切应力的百分比

降雨 场次	平均切应力/Pa				百分比/%		
	裸坡	1 g/m ²	3 g/m ²	5 g/m ²	1 g/m ²	3 g/m ²	5 g/m ²
I	0.2780a	0.2350b	0.2350b	0.2565b	15.49	15.47	7.76
II	0.3309a	0.2983b	0.2875b	0.2732b	9.85	13.13	17.46
I * II	0.0529a	0.0634a	0.0524a	0.0167b	-19.81	0.84	68.42

备注:表中“ I ”和“ II ”分别表示第一场降雨和第一场降雨;“ I * II ”表示两场降雨平均切应力的变化;表中的字母表示在 0.05 置信水平上的显著性差异。

3 结论

(1) 在第一场降雨和第一场降雨过程中,裸坡和喷施不同剂量 Jag C162 的坡面水流切应力随降雨历时的变化基本相似,皆呈先增加后趋于稳定的状态,都可用对数方程描述。在连续两场降雨过程中,裸坡水流切应力皆比喷施不同剂量 Jag C162 的坡面水流切应力要大。在第一场降雨和第一场降雨过程中,喷施不同剂量 Jag C162 的坡面产流时间均晚于裸坡坡面产流时间。

(2) 在第一场降雨过程中,相比裸坡,喷施 Jag C162 剂量为 1,3,5 g/m² 的坡面平均水流切应力分别减少 15.49%,15.47%,7.76%。第二场降雨过程中喷施 Jag C162 剂量为 1,3,5 g/m² 的坡面平均水流切应力相比裸坡,分别减少 9.85%,13.13%,17.46%。而在两场降雨间,喷施 Jag C162 剂量为 1,3,5 g/m² 的坡面平均水流切应力相比裸坡分别减少 -19.81%,0.84%,68.42%。说明在连续降雨过程中,Jag C162 具有减小坡面水流切应力的作用,且随着 Jag C162 剂量增大,对坡面切应力影响的持效性增强。

(3) 综合考虑 Jag C162 对坡面水流切应力调控作用的稳定性及持效性,建议在连续两场次降雨中采用剂量 5 g/m² 的 Jag C162 调控坡面水流切应力,以期达到控制土壤侵蚀的目的。

参考文献:

[1] 穆兴民,陈国良,徐学选.黄土高原降水量与地理因素关系分析[J].西北水土保持研究所集刊,1992,16:80-86.

- [2] 曹丽花,赵世伟,梁向锋,等. PAM 对黄土高原主要土壤类型水稳性团聚体的改良效果及机理研究[J]. 农业工程学报,2008,24(1):45-49.
- [3] 员学锋,汪有科,吴普特,等. PAM 对土壤物理性状影响的试验研究及机理分析[J]. 水土保持学报,2005,19(2):37-40.
- [4] Ben-Hur M, Keren R. Polymer effects on water infiltration and soil aggregation[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1997,61:565-570.
- [5] Sirjacobs D, Shainberg I, Rapp I. Polyacrylamide, sediments, and interrupted flow effects on rill erosion and intake rate[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000,64:1487-1495.
- [6] Bob S, Rick L. Polyacrylamide for furrow-irrigation erosion control [J]. Irrigation Journal, 1996,46(1):8-11.
- [7] 唐泽军,雷廷武,张晴雯,等. 聚丙烯酰胺增加土壤降雨入渗减少侵蚀的模拟试验研究. I:入渗[J]. 土壤学报,2003,40(2):178-185.
- [8] 雷廷武,唐泽军,张晴雯,等. 聚丙烯酰胺增加土壤降雨入渗减少侵蚀的模拟试验研究. II:侵蚀[J]. 土壤学报,2003,40(3):401-406.
- [9] Foster G R, Meyer L D. Transport of soil particles by shallow flow[J]. Trans of the ASAE, 1972,15(1):99-102.
- [10] 王瑄,李占斌,尚佰晓,等. 坡面土壤剥蚀率与水蚀因子关系室内模拟试验[J]. 农业工程学报,2008,24(9):22-26.
- [11] 王瑄,李占斌,郑良勇,土壤剥蚀率与水流剪切力关系室内模拟试验[J]. 沈阳农业大学学报,2007,38(4):577-580.

效养分的吸收利用^[16-19]。综合以上结果,生物有机肥能促进蓝莓根区土壤养分的吸收和循环,有助于土壤酶活性的提高,改善了土壤微生物量和微生物活性,可为蓝莓生产的科学施肥提供理论依据和参考而长期施用有机肥及其综合累积效应仍有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 苑兆和. 世界蓝莓生产历史与发展趋势[J]. 落叶果树, 2003,35(1):49-52.
- [2] 陈介甫,李亚东,徐哲. 蓝莓的主要化学成分及生物活性[J]. 药学学报,2010(4):422-429.
- [3] 李亚东,刘海广,张志东,等. 我国蓝莓产业现状和发展趋势[J]. 中国果树,2008,6(2):67-71.
- [4] 王辉,王鹏云,王蜀,等. 我国蓝莓的发展现状及前景[J]. 农业现代化研究,2008,29(2):250-253.
- [5] 徐云,徐建,王婷婷,等. 功能性保健食品蓝莓的研究进展[J]. 食品研究与开发,2013,34(6):132-134.
- [6] 李亚东,姜惠铁,张志东,等. 中国蓝莓产业化发展的前景[J]. 沈阳农业大学学报,2001,3(1):39-42.
- [7] 陈介甫,李亚东,徐哲. 蓝莓的主要化学成分及生物活性[J]. 药学学报,2010(4):422-429.
- [8] 胡中华,陈静芝. 化肥过度使用所导致的农业面源污染立法思考[J]. 安全与环境工程,2012,19(4):31-34.
- [9] Wu H, Yang X, Fan J, et al. Suppression of Fusarium wilt of watermelon by a bio-organic fertilizer containing combinations of antagonistic microorganisms[J]. Bio-Control, 2009,54(2):287-300.
- [10] Qiu M, Zhang R, Xue C, et al. Application of bio-organic fertilizer can control Fusarium wilt of cucumber plants by regulating microbial community of rhizosphere soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2012,48(7):807-816.
- [11] Huang X, Chen L, Ran W, et al. Trichoderma harzianum strain SQR-T37 and its bio-organic fertilizer could control Rhizoctonia solani damping-off disease in cucumber seedlings mainly by the mycoparasitism[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2011,91(3):741-755.
- [12] Yuan J, Ruan Y, Wang B, et al. Plant growth-promoting rhizobacteria strain Bacillus amyloliquefaciens NJN-6-enriched bio-organic fertilizer suppressed Fusarium wilt and promoted the growth of banana plants[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013,61(16):3774-3780.
- [13] 林启美,吴玉龙,刘焕龙. 熏蒸法测定土壤微生物量碳的改进[J]. 生态学杂志,1999,18(2):63-66.
- [14] 曹慧,孙辉,杨浩,等. 土壤酶活性及其对土壤质量的指示研究进展[J]. 应用与环境生物学报,2003,9(1):105-109.
- [15] 庞欣,张福锁,王敬国. 不同供氮水平对根际微生物量氮及微生物活度的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2000,6(4):476-480.
- [16] 罗兴录,岑忠用,谢和霞,等. 生物有机肥对土壤理化、生物性状和木薯生长的影响[J]. 西北农业学报,2008,17(1):167-173.
- [17] 胡可,李华兴,卢维盛,等. 生物有机肥对土壤微生物活性的影响[J]. 中国生态农业学报,2010,18(2):303-306.
- [18] 胡诚,曹志平,罗艳蕊,等. 长期施用生物有机肥对土壤肥力及微生物生物量碳的影响[J]. 中国生态农业学报,2007,12(3):15-21.
- [19] 周莉华,李维炯,倪永珍. 长期施用 EM 生物有机肥对冬小麦生产的影响[J]. 农业工程学报,2005(S):221-224.
- [20] 刘国顺,彭华伟. 生物有机肥对烤烟土壤肥力及生长发育的影响[J]. 耕作与栽培,2004(3):29-31.
- [21] 肖相政,刘可星,张志红,等. 生物有机肥对烤烟生长及相关防御性酶活性的影响[J]. 华北农学报,2010,25(1):175-179.
- [22] 张连忠,路克国,王宏伟,等. 重金属和生物有机肥对苹果根区土壤微生物的影响[J]. 水土保持学报,2005,19(2):92-95.

(上接第35页)

- [12] 吴淑芳,吴普特,宋维秀,等. 黄土坡面径流剥离土壤的水动力过程研究[J]. 土壤学报,2010,47(2):223-228.
- [13] 刘纪根,雷廷武. 坡耕地施加 PAM 对土壤抗冲抗蚀能力影响试验研究[J]. 农业工程学报,2002,18(6):59-62.
- [14] 刘纪根,张平仓,陈展鹏. 聚丙烯酰胺对扰动红壤可蚀性及临界剪切力的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(7):45-49.
- [15] Horton R E, leach H R, Van V R. Laminar sheet flow[J]. Transactions of the American Geophysical union, 1934,15(2):393-404.
- [16] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics. II. Shear stress relationships[J]. Transactions of the ASAE, 1984,27(3):797-804.
- [17] 焦念,王占礼,刘俊娥. Jag C162 对黄土坡面降雨入渗的调控效应研究[J]. 水土保持通报,2014,34(1):25-30.
- [18] 刘俊娥. Jag S 及 Jag C162 对黄土坡面片蚀动力学过程的调控[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2014.
- [19] Liu J E, Wang Z L, Yang X M, et al. The impact of natural polymer derivatives on sheet erosion on experimental loess hillslope[J]. Soil & Tillage Research, 2014,139(2):23-27.