

DOI: 10.11766/trxb201606130213

玉米秸秆汁土壤改良剂对黄绵土抗侵蚀能力的影响*

覃超¹ 郑粉莉^{1, 2†} 刘沛峰³ 徐锡蒙¹ 吴红艳¹ 汪怡珂³

(1 西北农林科技大学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 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

(3 西北农林科技大学创新实验学院, 陕西杨凌 712100)

摘要 改良土壤物理性质是提高土壤抗侵蚀能力的主要途径之一。通过人工模拟降雨试验、风蚀试验和野外原位观测试验, 研究了不同玉米秸秆汁土壤改良剂喷施方式下黄绵土抗侵蚀能力的改良效果, 探讨了玉米秸秆汁防治土壤侵蚀的机理。结果表明, 玉米秸秆汁能有效防治黄绵土的水蚀和风蚀。在模拟降雨条件下, 喷施玉米秸秆汁的试验处理, 黄绵土溅蚀量较对照处理降低 24.7%~78.3%, 黄土坡面的径流量和片蚀量分别降低 40.0%~43.3% 和 20.9%~34.5%; 在天然降雨条件下, 无论是短历时低强度或长历时低强度的降雨类型, 还是短历时高强度的降雨类型, 喷施玉米秸秆汁的试验处理, 黄土坡面的径流量和片蚀量较对照处理明显减少, 二者的减少幅度分别介于 26.3%~62.1% 和 58.3%~72.0% 之间; 在不同风速下, 玉米秸秆汁可使黄绵土的风蚀量降低 24.5%~64.6%。此外, 喷施玉米秸秆汁后的静置时间及翻耕与否对不同类型的侵蚀也有重要影响。喷施玉米秸秆汁可有效提高黄绵土的抗剪强度、硬度及大团聚体的百分含量, 从而降低土壤侵蚀量。施用玉米秸秆汁后, 黄绵土静水崩解量降低了 97.4%~98.5%、土壤抗剪强度增加了 97.9%~140.0%、土壤硬度增加了 11.4%~127.5%; < 0.25 mm 团聚体降低了 46.9%~51.6%; > 2 mm 团聚体增加了 88.1%~129.7%。玉米秸秆汁是一种良好的防治坡面水蚀和风蚀的土壤改良剂, 在施用玉米秸秆汁时, 应尽量一次喷施完毕并避免人为土壤扰动。

关键词 溅蚀; 片蚀; 风蚀; 原位观测; 玉米秸秆; 土壤改良剂

中图分类号 S157 **文献标识码** A

黄土高原是我国水土流失最严重的地区, 该地区的主要土壤—黄绵土, 其质地较轻, 疏松软绵, 保水和保肥能力差, 易形成严重的水蚀和风蚀^[1]。因此, 开展黄土高原土壤侵蚀剧烈地区的土壤修复研究具有重要意义。

土壤改良剂作为修复侵蚀退化土壤、防治水土流失的重要手段, 不仅能有效改善土壤理化性状和养分状况, 还能对土壤微生物产生积极影响, 从而提高退化土地的生产力^[2-5]。土壤改良剂的研究始

于 19 世纪末, 研究较多的土壤改良剂包括沸石、粉煤灰、污泥、绿肥和聚丙烯酰胺等单一改良剂和部分复合改良剂^[6]。土壤改良剂防治土壤侵蚀的作用机理, 主要包括以下两类: 一类是通过促进土壤膨胀, 降低土壤密度, 提高总孔隙度, 防止地表板结, 增加土壤入渗而降低土壤侵蚀量; 另一类主要通过多价阳离子对土壤颗粒的吸附促进土壤团粒结构形成, 增强土壤的抗蚀性和抗冲性, 从而降低坡面土壤侵蚀速率^[7]。然而, 这些土壤改良剂在制

* 国家自然科学基金项目 (41271299) 西北农林科技大学国家级大学生创新实验项目 (20140712004) 和黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室项目 (A31402143-C2) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41271299), the Northwest A&F University National Foundation of College Students Innovation Project (No. 20140712004) and Special-Funds of Scientific Research Programs of State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau (A314021403-C2)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 覃超 (1989—), 男, 广西桂林人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。E-mail: glqincho@nwsuaf.edu.cn

收稿日期: 2016-06-13; 收到修改稿日期: 2016-10-08; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2016-11-14

备过程中或多或少存在原材料价格昂贵,配合施用方法复杂,改良效果不全面等问题,且大多数土壤改良剂不以减少坡面水蚀,防治土壤风蚀为主要施用目的。因此,开发一种原材料价格低廉,制作工艺简单,能有效提高土壤抗侵蚀能力,降低坡面水蚀和土壤风蚀的土壤改良剂具有重要的理论价值和现实意义。

玉米是我国主要的栽培作物之一,玉米秸秆资源极其丰富^[8]。然而,现阶段我国的玉米秸秆资源多未被有效利用,处理方式包括直接翻入土中还田(30.8%)、作食草家畜的饲料(26.2%)、作燃料(24.6%)和就地燃烧(12.8%)^[9]。直接焚烧玉米秸秆会造成严重的空气污染并引发雾霾天气,少数产业将秸秆作为纤维原料使用,其中间产物——秸秆汁被作为废液直接倾倒,造成了资源浪费及水体污染^[10]。近期,美国农业部国家土壤侵蚀研究实验室(USDA-National Soil Erosion Research Laboratory)的相关学者探究了玉米秸秆汁在不同降雨强度条件下对坡面侵蚀过程的影响,对玉米秸秆汁防治坡面水蚀的效果进行了研究^[11-12],发现玉米秸秆汁能有效降低坡面土壤水蚀速率,其结果为本研究的开展提供了很好的借鉴。然而,已有研究多侧重玉米秸秆汁对室内模拟降雨条件下土壤片蚀的防治效果及其机理,对自然条件下的不同雨型,以及片蚀的起始阶段——溅蚀,以及风蚀的防治效果暂未涉及。

因此,本研究通过向黄绵土表面喷施玉米秸秆汁土壤改良剂,探究其对黄绵土溅蚀、片蚀和风蚀的影响,并通过测定不同处理下黄绵土的物理性质,阐明玉米秸秆汁防治黄绵土侵蚀的机理,旨在为黄土坡面土壤侵蚀的防治提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与材料

室内试验的供试土壤为黄土高原丘陵沟壑区安塞县的黄绵土(36° 45'N, 109° 11'E),其中有机质含量为5.9 g kg⁻¹,黏粒、粉粒与砂粒含量分别为13.6%、58.1%和28.3%,试验前将土壤风干、备用。野外原位观测的试验场地位于陕西省富县,其土壤机械组成与安塞县相近,黏粒、粉粒与砂粒含量分别为16.5%、59.7%和23.8%。黄绵土是黄土高原的主要土壤类型,在中国土壤分类系统中属于发

育微弱的初育土,在美国土壤分类标准中属于石灰性始成土(Calcic Cambisol),在该区域有较好的代表性,因此本试验的研究成果可为防治黄绵土分布区的土壤水蚀和风蚀提供借鉴。供试玉米秸秆为陕西杨凌或富县收获12 h内的新鲜玉米秸秆,其中杨凌的玉米秸秆取自河南省农业科学院粮食作物研究所选育的“郑丹958号”玉米,富县的玉米秸秆取自甘肃五谷种业股份有限公司生产的“五谷702号”玉米。

玉米秸秆汁土壤改良剂的制作。首先将收获12 h内的玉米秸秆进行榨汁处理;向制备的玉米秸秆汁中添加一定量的苯甲酸钠,搅拌均匀,即得到玉米秸秆汁土壤改良剂,其中玉米秸秆汁的质量百分比为95%~97%,苯甲酸钠质量百分比为3%~5%。本研究所用玉米秸秆是收获后的新鲜玉米秸秆,属农业生产过程中产生的废弃物,平均出汁率约为5.6%,即18 kg刚收获的新鲜秸秆大约能生产1L玉米秸秆汁。

1.2 室内模拟试验装置和设计

模拟降雨试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨大厅进行,模拟降雨设备采用中国科学院水利部水土保持研究所研制的侧喷式单喷头的降雨装置,降雨方式为两个降雨器对喷,供水压力由压力表控制,降雨强度主要通过孔板的孔径来调节,孔径为5~12 mm,降雨强度调节范围为30~165 mm h⁻¹,降雨均匀度大于85%。溅蚀试验采用标准Morgan溅蚀盘,该盘直径10 cm,高2.5 cm,用于承接土粒的外盘直径30 cm,高10 cm,盘底按照1 cm的距离开有直径为1.5 mm的小孔,可使土壤水自由下渗。片蚀试验采用规格为50 cm × 50 cm × 50 cm的土槽,其底部按照10 cm的距离开有直径为2.0 mm的小孔,可使土壤水自由下渗。

模拟风蚀试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室风蚀实验区进行。风洞整体长、宽、高分别为19.8 m、1.0 m、1.2 m,主要由五部分组成,分别是风机(3.55 m、提供风蚀试验所需风力)、调风段(1.50 m、调整试验风速)、整流段(10.0 m、使气流趋于稳定)、试验段(1.28 m、样品放置区域)以及集沙段(3.02 m、风蚀产物收集区)。风洞的风速可在0~14 m s⁻¹内任意调节。试验所用装土容器为直径30 cm的圆形饭盒。

根据前人的研究结果^[11]及本试验目的, 室内试验共设计6个处理, 每个处理进行3次重复试验, 包括2种喷施方式处理(分别为喷施玉米秸秆汁, 和喷施相同体积自来水—对照处理)、2个喷施玉米秸秆汁后的静置时间处理(7和14 d)和2种地面条件处理(翻耕和不翻耕), 设计2种地面翻耕处理的目的是为了模拟野外坡耕地可能进行的翻耕活动。根据试验区黄土坡面耕层厚度的实地调查, 设计模拟翻耕深度为10 cm, 翻耕所用工具为铁耙(耙齿长度10 cm), 设计方案见表1。

根据黄土高原侵蚀性降雨标准^[13], 设计室内模拟溅蚀试验的降雨强度为75 mm h⁻¹, 片蚀试验的降雨强度为50 mm h⁻¹。由于黄土高原裸露坡耕地的坡度多介于15°~25°之间, 因此设计模拟片蚀试验的坡度为20°。根据黄土高原丘陵沟壑区裸露坡耕地耕层土壤容重的实地测定, 设计室内模拟试验的填土容重为1.15 g cm⁻³, 填土厚度为

15 cm。根据有关黄土高原临界起沙风速的研究结果^[14], 设计模拟风蚀试验的风速梯度为6、8和14 m s⁻¹。

为进一步阐明玉米秸秆汁土壤改良剂防治坡面土壤侵蚀的机理, 本研究还对不同试验处理下与土壤侵蚀关系密切的土壤物理性质进行了测定, 其中, 土壤静水崩解速率采用HP30数显式推拉力计测定, 土壤抗剪强度采用M251468现场剪力测试仪测定, 土壤硬度采用TYD-1型土壤硬度计测定, 土壤团粒结构采用干筛法测定。

1.3 野外原位片蚀观测装置和设计

在陕西富县玉米坡耕地上建造微型径流小区6个, 模拟野外坡耕地雨季施用玉米秸秆汁土壤改良剂后防治坡面土壤片蚀的效果。微型径流小区面积1 m × 2 m, 坡度15°~17°, 每两个小区之间有1.5 m × 2 m的缓冲带(图1), 试验坡耕地表层土壤(0~10 cm)容重为1.18 g cm⁻³。

表1 室内模拟试验的处理

Table 1 Designing of the treatments of the indoor simulation experiments

试验处理Experimental treatments	描述Description
对照组 Control treatments	A1 加入自来水至田间持水量并静置7 d, 然后进行模拟试验和土壤物理性质的测定 Spray tap water till the soil reaches field water holding capacity, let the field stand for 7 d, and then conduct the simulation experiments in the field and determine soil physical properties
	B1 加入自来水至田间持水量并静置14 d, 然后进行模拟试验和土壤物理性质的测定 Spray tap water till the soil reaches field water holding capacity, let the field stand for 14 d, and then conduct the simulation experiments in the field and determine soil physical properties
	C1 加入A1或B1处理自来水量的50%并静置7 d, 进行模拟翻耕, 再加入余下50%自来水并静置7 d, 然后进行模拟试验和土壤物理性质的测定 Spray tap water at a rate 50% that in Treatment A1/B1 and let the field stand for 7 d, plough the field, spray the other 50% of the tap water, let the field stand for another 7 d, and then conduct the simulation experiments and determine soil physical properties
改良组 Improved treatments	A2 加入玉米秸秆汁至田间持水量并静置7 d, 然后进行模拟试验和土壤物理性质的测定 Spray corn stalk sap till the soil reaches field water holding capacity, let the field stand for 7 d, and then conduct the simulation experiments in the field and determine soil physical properties
	B2 加入玉米秸秆汁至田间持水量并静置14 d, 然后进行模拟试验和土壤物理性质的测定 Spray corn stalk sap till the soil reaches field water holding capacity, let the field stand for 14 d, and then conduct the simulation experiments in the field and determine soil physical properties
	C2 加入A2或B2处理玉米秸秆汁量的50%并静置7 d, 进行模拟翻耕, 再加入余下50%玉米秸秆汁并静置7 d, 然后进行模拟试验和土壤物理性质的测定 Spray corn stalk sap at a rate 50% that in treatment A2/B2 and let the field stand for 7 d, plough the field, spray the other 50% of corn stalk sap, let the field stand for another 7 d, and then conduct the simulation experiments and determine soil physical properties



图1 野外原位观测试验的微型径流小区

Fig. 1 Micro runoff plots for in-situ observation in the field

每年6~8月是黄土高原地区的雨季,本试验通过小型气象站收集降雨特征资料,连续观测研究区内能使地表产生径流的侵蚀性降雨事件,通过安放在小区出口处的集流装置收集次降雨条件下径流小区的径流泥沙资料。野外原位观测共设计两个处理,分别为改良处理(喷施玉米秸秆汁土壤改良剂至田间持水量)和对照处理(喷施相同体积的自来水),每个处理进行两次重复试验。

1.4 分析方法

对于室内模拟试验,首先计算玉米秸秆汁和自来水的用量,并控制喷施后坡面表层10 cm的土壤含水量达到田间持水量,将玉米秸秆汁与自来水充分混合,然后进行喷施。具体步骤为:先测定待喷施坡面面积 A ,再测定待喷施坡面表层 h m土层的土壤前期含水量 W ,土壤容重 ρ 和土壤田间持水量 θ ,并将其代入式(1)和式(2),分别估算稀释玉米秸秆汁所需的水量 T 和玉米秸秆汁的施用量 G ,公式如下

$$T = A \times h \times \rho \times (\theta - W) \quad (1)$$

式中, T 为喷施用水总量,kg; A 为喷施坡面面积, m^2 ; h 为玉米秸秆汁浸润的土层深度,m(本试验中 h 为0.1 m); ρ 为喷施坡面土壤容重, $kg\ m^{-3}$; θ 为喷施坡面田间持水量,%; W 为喷施坡面土壤前期含水量,%。

$$G = 1/3 \times A \times h \times \rho \times \theta \quad (2)$$

式中, G 为所需玉米秸秆汁的总量,kg; A 为喷施坡面面积, m^2 ; h 为玉米秸秆汁浸润的土层深度,m(本试验中 h 为0.1 m); ρ 为喷施坡面土壤容重, $kg\ m^{-3}$; θ 为喷施坡面田间持水量,%。

按照试验设计方案,对需要进行翻耕的土壤进行二次翻耕和喷施,静置所需天数后进行模拟试验和土壤物理性质的测定。

溅蚀试验历时20 min,正式降雨开始前,需对降雨强度进行率定,当率定值与目标降雨强度($75\ mm\ h^{-1}$)的差值小于5%时方可进行正式降雨试验;降雨结束后,将溅蚀盘静置12 h,去除承接土粒外盘内积水的上层清液,然后放入 $105\ ^\circ C$ 烘箱,烘干后将溅蚀土壤转移至称量纸上称量其质量,计算溅蚀量。

片蚀试验历时30 min,正式降雨开始前需率定降雨强度,正式降雨开始后记录坡面产流时间,按照2 min的时间步长接取全部径流泥沙样;降雨结束后将泥沙样进行烘干称重,计算径流量和片蚀量。

风蚀试验历时2 min,试验开始前和结束后分别称量土壤重,计算风蚀量。

对于野外原位片蚀观测试验,首先测定待喷施坡面的土壤前期含水量,并控制喷洒玉米秸秆汁土壤改良剂和自来水后坡面表层10 cm的土壤含水量达到田间持水量,计算玉米秸秆汁和自来水用量,然后进行喷施;喷施过程中为保证玉米秸秆汁能自由入渗,喷施时以少喷多次为原则并控制土壤表面无明显积水;在每次侵蚀性降雨过后,收集集流桶内的径流泥沙样,烘干称重并计算次降雨的径流量和片蚀量。

本研究运用Excel2007进行数据整理以及初步分析,在SPSS18.0中采用最小显著差异法(LSD)进行方差分析,显著性检验的 p 值取0.05,用Origin8.0进行绘图。

2 结 果

2.1 玉米秸秆汁土壤改良剂对土壤溅蚀的影响

溅蚀是土壤侵蚀过程的前期阶段和重要环节,在雨滴大小、能量等其他外界条件一定的情况下,溅蚀速率主要取决于土壤的抗侵蚀能力。喷施自来水和玉米秸秆汁土壤改良剂后,土壤抗蚀性发生变化,进而导致土壤溅蚀量不同。试验结果表明(表2),施用玉米秸秆汁的改良组与未施用玉米秸秆汁的对照组的土壤溅蚀量表现出显著性差异,在其他试验条件相同的前提下,改良组土壤的溅蚀量较对照组降低24.7%~78.3%。这与聚丙烯酰胺

表2 模拟降雨条件下的黄绵土溅蚀量

Table 2 Splash erosion of loessial soil under simulated rainfall

试验处理 Experimental treatment		溅蚀量 Splash erosion amount (g)				
		1	2	3	平均值 Mean	标准差 Standard deviation
对照组 Control treatment	A1	0.22	0.31	0.16	0.23ab	0.06
	B1	0.29	0.31	0.20	0.27a	0.05
	C1	0.25	0.32	0.24	0.28a	0.03
改良组 Improved treatment	A2	0.01	0.04	0.10	0.05c	0.04
	B2	0.13	0.18	0.23	0.18b	0.04
	C2	0.16	0.25	0.19	0.20b	0.04

注: 表中同列不同字母表示处理间差异达到 $p=5\%$ 显著水平。下同 Note: Different letters in the same column mean significantly difference at $p = 0.05$. The same below

(PAM)对土壤溅蚀过程的影响不同,胡霞等^[15]的研究结果表明,PAM虽能在一定程度上降低土壤侵蚀量,但却会在很大程度上提高土壤的溅蚀速率。此外,静置时间的增加可使土壤溅蚀量增加,但不同的处理组别增加幅度不同。具体而言,对照组组内不同试验处理下的土壤溅蚀量无显著性差异,说明静置天数和人工翻耕对喷施自来水处理土壤的溅蚀量无显著影响。但对于改良组,静置处理7d的土壤溅蚀量明显低于静置处理14d的土壤溅蚀量;此外,人工翻耕也可增加土壤溅蚀量。

2.2 玉米秸秆汁土壤改良剂对坡面土壤片蚀的影响

增加土壤入渗,控制坡面产流以减少侵蚀是降低坡面产沙量的主要措施之一。表3表明,在其他试验条件相同的前提下,改良组的径流量和片蚀量分别较对照组降低40.0%~43.3%和20.9%~34.5%,与魏霞等^[11-12]的研究结果相比,本试验处理下的片蚀量减少率较低,原因可能与玉米秸秆汁浓度、供试土壤种类、机械组成、容重、降雨强度和坡度不同有关。静置时间与人工翻耕对不同处理下的坡面径流量和片蚀量的影响与对溅蚀量的影响不同。具体而言,静置时间增加7d,对照组的径流量降低2.7%,而改良组径流量的变化不大;对照组的片蚀量明显降低22.6%,而改良组片蚀量的降低幅度未达显著水平;人工翻耕能使对照组和改良组的片蚀量分别增加17.7%和18.6%,对径流量的影响不显著。

为进一步验证玉米秸秆汁土壤改良剂防治坡面土壤侵蚀的效果,本研究选取了发生在野外径流

小区的3场典型侵蚀性降雨事件,通过记录每场侵蚀性降雨的降雨量、降雨历时和降雨强度等基本指标,计算入渗量、径流量和片蚀量,分析玉米秸秆汁减少坡面片蚀量的效果。在喷施玉米秸秆汁15、35和50 d后,分别记录3场侵蚀性降雨事件,结果表明(表4),改良组较对照组的径流量和片蚀量分别降低39.9%和66.1%。对于不同的降雨类型^[16],玉米秸秆汁对坡面径流量和片蚀量的影响不同。具体而言,施用玉米秸秆汁的试验处理对短历时低强度降雨类型下的(场次1)坡面径流量和片蚀量的减少效果最好,其径流量和片蚀量分别较对照处理降低62.1%和72.0%;其对短历时高强度降雨类型(场次3)的减水减沙效果也比较明显,其径流量和片蚀量分别较对照处理降低26.3%和58.3%;而对长历时低强度的降雨类型(场次2),其减水减沙效果分别为41.0%和69.6%。上述结果表明,施用玉米秸秆汁减少坡面片蚀量的效果与前人有关PAM防治黄土坡面侵蚀的效果相似^[17],但是玉米秸秆汁主要通过物理过程从秸秆中直接提取,成本低,具有纯天然、无人工化学成分等优点,因此在防治坡面土壤侵蚀方面有一定的应用前景。

2.3 玉米秸秆汁土壤改良剂对土壤风蚀的影响

在三个试验风速条件下,改良组的风蚀量均显著低于对照组的风蚀量(图2)。总体而言,在风速为6、8和14 m s^{-1} 的风蚀过程中,不同试验处理下,改良组的土壤风蚀量较对照组的土壤风蚀量分别降低25.0%~64.6%、31.0%~52.9%和

表3 模拟降雨条件下黄绵土坡面的径流量和片蚀量

Table 3 Runoff amount and sheet erosion amount of loessial hillslope under simulated rainfall

试验处理 Experimental treatment		径流量 Runoff amount (mm)					片蚀量 Sheet erosion amount (kg)				
		1	2	3	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	1	2	3	平均值 Mean	标准差 Standard deviation
对照组 Control treatment	A1	21.9	21.0	21.0	21.3a	0.42	0.50	0.66	0.52	0.56a	0.07
	B1	20.4	20.8	21.1	20.7b	0.28	0.38	0.49	0.43	0.43bc	0.04
	C1	20.6	20.4	20.7	20.6b	0.14	0.45	0.59	0.49	0.51ab	0.06
改良组 Improved treatment	A2	12.6	11.7	11.9	12.1c	0.38	0.31	0.45	0.34	0.37cd	0.06
	B2	12.3	12.0	13.1	12.5c	0.47	0.30	0.39	0.33	0.34d	0.04
	C2	12.2	12.0	12.8	12.3c	0.35	0.34	0.49	0.38	0.40cd	0.06

表4 天然降雨条件下黄绵土坡面的径流量和片蚀量

Table 4 Runoff amount and sheet erosion amount of loessial hillslope under natural rainfall

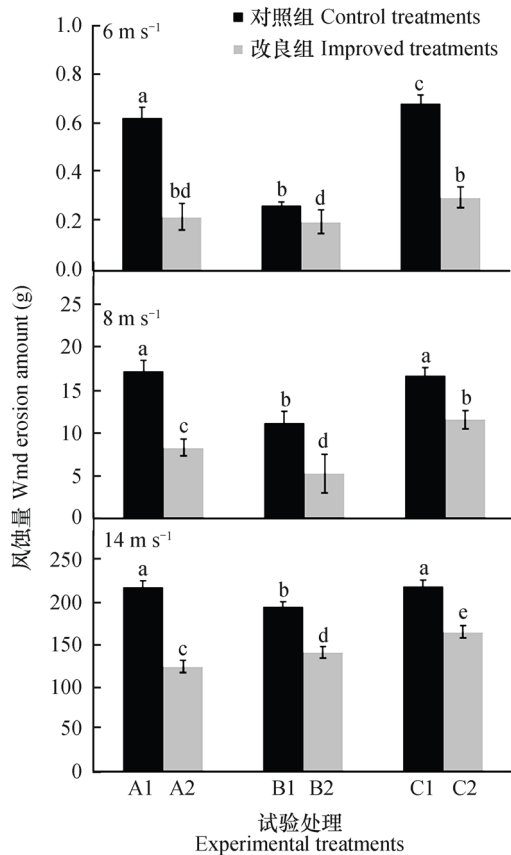
试验处理 Experimental treatment	降雨场次 Rain event	降雨量 Precipitation (mm)	降雨历时 Rainfall duration (min)	降雨强度 Rainfall intensity (mm min ⁻¹)	平均入渗量 Mean infiltration (mm)	径流量 Runoff amount (mm)			片蚀量 Sheet erosion amount (kg)				
						1	2	平均值 Mean	减少百分数 Reduction rate (%)	1	2	平均值 Mean	减少百分数 Reduction rate (%)
对照组 Control treatment	1	10.8	18	0.6	10.3	0.4	0.6	0.5		3.7	6.4	5.0	
	2	30.2	45	0.7	28.7	1.5	1.5	1.5		22.9	29.5	26.2	
	3	19.2	15	1.3	18.2	0.9	0.9	1.0		11.5	19.2	15.4	
	小计 Total	60.2	78	0.8	57.2	2.8	3.2	3.0		38.1	55.0	46.6	
改良组 Improved treatment	1	10.8	18	0.6	10.6	0.2	0.2	0.2	62.1	1.4	1.4	1.4	72.0
	2	30.2	45	0.7	29.3	0.8	1.0	0.9	41.0	8.2	7.7	8.0	69.6
	3	19.2	15	1.3	18.5	0.7	0.7	0.7	26.3	6.5	6.3	6.4	58.3
	小计 Total	60.2	78	0.8	58.4	1.8	1.9	1.8	39.9	16.2	15.4	15.8	66.1

24.5% ~ 43.2%，且随着风速的增加，风蚀量降低的程度减少，说明在较小风速时，玉米秸秆汁土壤改良剂防治土壤风蚀的效果较好。就不同的静置天数而言，与对照处理相比，静置7和14 d并施用玉米秸秆汁的土壤风蚀量分别降低25.0% ~ 64.6%和31.0% ~ 52.9%，说明静置天数的长短对降低土壤风蚀量的效果差别不大。就人工翻耕而言，在6、8和14 m s⁻¹的风速条件下，施用玉米秸秆汁土壤的风蚀量较对照组分别降低43.2%、27.4%和24.5%，降低程度明显小于未进行翻耕处理的土

壤，说明人为扰动土壤会削弱玉米秸秆汁防治土壤风蚀的效果。

3 讨论

在外部条件相同的前提下，土壤侵蚀强度大小主要由土壤本身的性质决定。土壤崩解与土壤侵蚀过程密切相关，土壤静水崩解速率作为评价土壤抗侵蚀能力强弱的指标已经在全国，特别是在黄土高原地区得到了广泛的应用，该指标能在



注：图中同一风速下标注字母不同，表示处理间差异达到 $p = 5\%$ 显著水平 Note: Different letters in the same wind speed sub-plot mean significantly difference at $p = 0.05$.

图2 模拟风洞不同风速条件下（6、8和14 m s^{-1} ）黄绵土的风蚀量

Fig. 2 Wind erosion amount of loessial soil under simulated wind with different wind speeds (6, 8 and 14 m s^{-1})

一定程度上反映土壤溅蚀的强弱^[18]。试验结果表明（表5），玉米秸秆汁土壤改良剂能显著提高黄绵土的抗侵蚀能力，对照组黄绵土15min的静水崩解量大于96.5%，而改良后的黄绵土静水崩解量小于2.5%，较对照组降低了97.4%~98.5%。就喷施玉米秸秆汁后的静置时间（7和14 d）和地面条件（翻耕和不翻耕）而言，组内的静水崩解量差异均不显著，说明玉米秸秆汁处理对土壤静水崩解速率起决定性作用，其他因素诸如静置时间和地面条件对土壤静水崩解速率的影响也不明显。在溅蚀过程初期，土壤微团聚体的干土溅散是溅蚀量的主要来源，随着降雨过程的进行，土壤逐渐湿润，大团聚体的破碎、崩解为土壤溅蚀提供了另一物质来源。随着静置天数的增加，玉米秸秆汁处理的土壤静水崩解量增加，由大团聚体破碎形成的微团聚体的量也在增加，使土壤溅蚀量呈增加趋势。人工翻耕同样破坏了土壤团粒结构（图3），增加了土壤静水崩解速率，进而增加了土壤溅蚀量。

良好的土壤团粒结构能增大土壤的通气透水能力，防止板结、龟裂，提高土壤的抗蚀性和抗冲性，进而达到防治土壤水蚀和风蚀的目的^[19]。由图3可知，未经任何处理的黄绵土（CK） < 0.25 mm的微团聚体含量大于60%，大团聚体含量甚少。试验结果表明，玉米秸秆汁土壤改良剂能显著减少微团聚体并促进大团聚体的形成。与CK相比，添加玉米秸秆汁并处理7、14 d后的黄绵土， < 0.25 mm的微团聚体分别减少了56.3%、58.2%，

表5 不同试验处理下的土壤静水崩解量

Table 5 Soil disintegration relative to treatment in the experiment

试验处理 Experimental treatment		15 min 静水崩解量 Disintegration percentage after 15 min (%)				
		1	2	3	平均值Mean	标准差 Standard deviation
对照组 Control treatment	A1	96.0	98.0	97.2	97.1a	0.82
	B1	97.8	96.2	97.0	97.0a	0.65
	C1	96.4	96.7	96.3	96.5a	0.17
改良组 Improved treatment	A2	0.8	2.0	1.7	1.5b	0.51
	B2	2.2	2.5	2.0	2.2b	0.21
	C2	2.5	2.2	2.9	2.5b	0.29

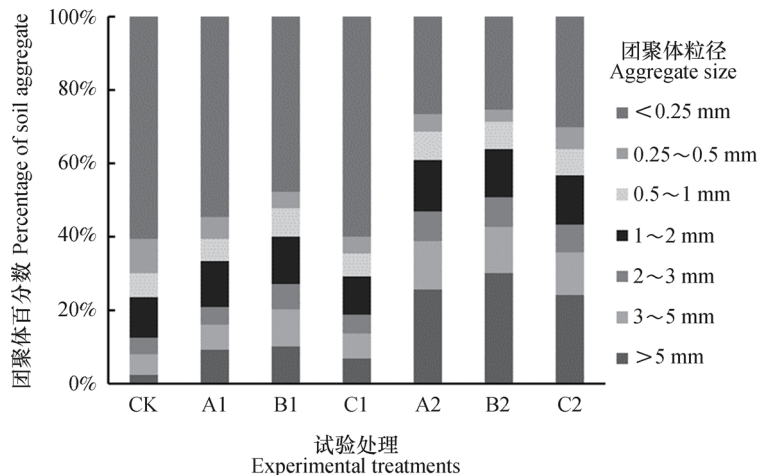


图3 不同试验处理下土壤样品的团粒结构

Fig. 3 Composition of soil aggregates relative to treatment

> 2 mm的大团聚体分别增加了2.7倍和3.1倍；与喷洒自来水的黄绵土相比，添加玉米秸秆汁并处理7、14 d后的黄绵土，< 0.25 mm的微团聚体分别减少了51.6%、47.0%，> 2 mm的大团聚体分别增加了1.2倍、0.9倍。这可能与玉米秸秆汁中含有大量有机物有关，有关学者对玉米秸秆汁/茎干汁的主要成分（糖、矿物质元素、氨基酸）进行了分析^[12, 20]，他们指出成熟期玉米秸秆汁中果糖和蔗糖含量分别可达11.7和2.0 mg ml⁻¹，而糖类物质是良好的胶结剂，可以有效促进微团聚体形成大团聚体。

不同风速条件下土壤风蚀量的大小与土壤团粒结构密切相关，当风速为起沙风速时（6 m s⁻¹），< 0.5 mm团聚体是风蚀搬运的主要物质来源，该粒级团聚体的含量与风蚀量的大小有正相关关系。随着风速的增大，被吹蚀团聚体的粒级也逐渐增大，大团聚体逐渐成为风蚀物质的主要来源。但试验结果表明，> 5 mm的大团聚体含量与14 m s⁻¹风速下的土壤风蚀量呈负相关关系，说明该粒级团聚体极不易被吹蚀，被吹蚀的主要是< 5 mm的团聚体，因而增大该粒级团聚含量能有效降低较大风速条件下土壤的风蚀量。

另一方面，大团聚体含量的增加和微团聚体含量的降低也有助于降低土壤片蚀量。具体而言，静置时间增加7 d，添加玉米秸秆汁土壤改良剂处理的黄土坡面> 2 mm大团聚体含量增加8.8%，片蚀量也随之降低7.3%；人工翻耕同样会促进大团聚体的破碎，微团聚体的形成，从而使片蚀量大于

未进行人工翻耕的坡面。因此，在施用玉米秸秆汁时，应尽量确保一次性足量施用，避免施用后坡面的人为扰动。

从土壤物理性质角度分析，水蚀是雨滴对土粒的击溅剪切作用和径流对土体的冲刷剪切作用的综合过程，其破坏形式大多数为剪切破坏，所以土壤抗剪强度是水土流失评价中反映土壤物理特性的重要指标之一^[21]，它与土壤类型、水稳性团聚体、黏粒含量和有机质含量等有关^[22]。由表6可知，玉米秸秆汁土壤改良剂能显著增加土壤的抗剪强度，且随着静置天数的增加，对照组和改良组的土壤抗剪强度均随之增加。具体而言，与对照组相比，施用玉米秸秆汁并静置7和14 d的土壤其抗剪强度分别增加了140.0%和97.9%，与之对应，坡面土壤片蚀量降低了34.5%和21.5%；人工翻耕对土壤抗剪强度的影响也不容小视，人工翻耕处理分别使对照组和改良组的土壤抗剪强度降低了63.1%和49.5%，与之对应，坡面土壤片蚀量分别增加了17.7%和18.6%。

土壤硬度是土壤的重要物理性质之一，是土壤物理及化学组成的综合表现，对土壤通气透水性、坡面土壤抗风蚀能力、抗雨滴打击能力和抗径流冲刷能力等均具有重要影响。试验结果表明（表6），施用玉米秸秆汁土壤改良剂坡面的土壤硬度大于施用自来水坡面的土壤硬度，且随着静置天数由7 d增加至14 d，玉米秸秆汁对土壤硬度的影响逐渐增大，与对照处理相比，施用玉米秸秆汁并静置7和14 d的土壤硬度分别提高了11.4%和127.5%。

表6 不同试验处理下的土壤抗剪强度和土壤硬度

试验处理 Experimental treatment	抗剪强度 Soil shear strength (kPa)						土壤硬度 Soil hardness (kg cm ⁻²)				
	1	2	3	平均值 Mean	标准差 Standard deviation		1	2	3	平均值 Mean	标准差 Standard deviation
对照组 Control treatment	A1	12.0	9.5	11.0	10.8a	1.0	1.0	1.6	1.5	1.4a	0.2
	B1	15.0	16.0	17.0	16.0b	0.8	2.1	2.5	2.0	2.2b	0.2
	C1	5.5	6.0	6.2	5.9c	0.3	0.8	0.7	0.8	0.8c	0.1
改良组 Improved treatment	A2	26.0	28.0	24.0	26.0d	1.6	1.5	1.7	1.4	1.5a	0.1
	B2	36.0	30.0	29.0	31.7d	3.1	5.4	5.0	4.5	5.0d	0.4
	C2	16.0	18.0	14.0	16.0b	1.6	0.8	1.0	0.8	0.9c	0.1

有关研究指出^[23], 土壤硬度随土壤含水量的降低而增大, 这可以用来解释本研究中B1处理的土壤硬度较A1处理的大36.9% (A1和B1处理的土壤含水量分别为12.0%和9.7%); 然而, 与对照处理相比, A2和B2处理的土壤含水量分别为12.9%和12.8%, 均大于对照处理, 但土壤硬度却显著高于对照处理, 土壤硬度并未随土壤含水量的增大而增大, 所以本研究认为这是玉米秸秆汁中大量有机质本身胶结作用的结果, 这种胶结作用增加了土壤颗粒间的胶结力, 促进了土壤团粒结构的形成, 增加了土壤的紧实程度, 从而提高了土体的水稳结构和抗蚀强度。

4 结 论

喷施玉米秸秆汁土壤改良剂可以有效降低黄绵土的溅蚀、片蚀和风蚀量, 降低幅度分别介于24.7%~78.3%、20.9%~34.5%和24.5%~64.6%之间。天然降雨条件下, 施用玉米秸秆汁的试验处理对短历时低强度降雨类型下的坡面径流量和片蚀量的减少效果最好, 其值分别降低62.1%和72.0%。人工翻耕可降低玉米秸秆汁土壤改良剂防治黄绵土溅蚀、片蚀和风蚀的效果, 但静置天数的长短对玉米秸秆汁防治黄绵土侵蚀的影响不同。玉米秸秆汁土壤改良剂可使不同试验处理下的黄绵土静水崩解速率降低97.4%~98.5%、土壤抗剪强度增加97.9%~171.2%、土壤硬度增加11.4%~127.5%, <0.25 mm微团聚体降低46.9%~51.6%, >2 mm团聚体增加88.1%~129.7%。玉米秸秆汁土壤改良

剂通过增加黄绵土的土壤抗剪强度和硬度, 胶结土壤微团聚体, 提高土壤中大团聚体的百分含量来降低土壤静水崩解速率、溅蚀量、片蚀量和风蚀量, 是一种良好的防治坡面水蚀和风蚀的土壤改良剂, 在施用玉米秸秆汁时, 应尽量一次喷施完毕并避免人为土壤扰动。

参 考 文 献

- [1] 黄自立. 陕北地区黄绵土分类的研究. 土壤学报, 1987, 24(3): 266—271
Huang Z L. Discussion of classification of yellow cultivated loessial soils in Shaanxi (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1987, 24(3): 266—271
- [2] Kumar A, Saha A. Effect of polyacrylamide and gypsum on surface runoff, sediment yield and nutrient losses from steep slopes. Agricultural Water Management, 2011, 98(6): 999—1004
- [3] 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. 土壤学报, 2003, 40(2): 178—185
Tang Z J, Lei T W, Zhang Q W, et al. Effects of polyacrylamide application on infiltration and soil erosion under simulated rainfalls I. Infiltration (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(2): 178—185
- [4] 吴淑芳, 吴普特, 冯浩, 等. 高分子聚合物防治坡地土壤侵蚀模拟试验研究. 农业工程学报, 2004, 20(2): 19—22
Wu S F, Wu P T, Feng H, et al. Preventing sloping soil erosion with macromolecule polymers through simulated experiment (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,

- 2004, 20 (2): 19—22
- [5] Larney F J, Janzen H H, Olson B M, et al. Erosion-productivity-soil amendment relationships for wheat over 16 years. *Soil and Tillage Research*, 2009, 103 (1): 73—83
- [6] 罗文遂, 龚元石. 土壤结构改良剂的研究进展及其应用. *中国农业大学学报*, 1997, 2 (S1): 165—168
Luo W S, Gong Y S. Advances in soil conditional and its application (In Chinese). *Journal of China Agricultural University*, 1997, 2 (S1): 165—168
- [7] Brandsma R T, Fullen M A, Hocking T J. Soil conditioner effects on soil structure and erosion. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1999, 54 (2): 485—489
- [8] 高祥照, 马文奇, 马常宝, 等. 中国作物秸秆资源利用现状分析. *华中农业大学学报*, 2002, 21 (3): 242—247
Gao X Z, Ma W Q, Ma C B, et al. Analysis on the current status of utilization of crop straw in China (In Chinese). *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2002, 21 (3): 242—247
- [9] 王如芳, 张吉旺, 董树亭, 等. 我国玉米主产区秸秆资源利用现状及其效果. *应用生态学报*, 2011, 22 (6): 1504—1510
Wang R F, Zhang J W, Dong S T, et al. Present situation of maize straw resource utilization and its effect in main maize production regions of China (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22 (6): 1504—1510
- [10] Zeng X Y, Ma Y T, Ma L R. Utilization of straw in biomass energy in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, 11 (5): 976—987
- [11] 魏霞, 李勋贵, Huang C H. 玉米茎秆汁液防治坡面土壤侵蚀的室内模拟试验. *农业工程学报*, 2015, 31 (11): 173—178
Wei X, Li X G, Huang C H. Simulated experiment for preventing slope soil erosion using corn stalk juice as soil amendment (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31 (11): 173—178
- [12] 魏霞, 苏辉东, 李勋贵, 等. 玉米茎秆汁液对土壤的减水减沙效益及其机理. *农业工程学报*, 2015, 31 (21): 142—147
Wei X, Su H D, Li X G, et al. Runoff and sediment reduction benefits of soil and water conservation and its mechanism of corn stalk juice (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31 (21): 142—147
- [13] 周佩华, 王占礼. 黄土高原土壤侵蚀暴雨标准. *水土保持通报*, 1987, 7 (1): 38—44
Zhou P H, Wang Z L. Soil erosion storm rainfall standard in the Loess Plateau (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1987, 7 (1): 38—44
- [14] 朱好, 张宏升. 中国西北不同沙源地区起沙阈值的对比分析与研究. *气象学报*, 2010, 68 (6): 977—984
Zhu H, Zhang H S. An estimation of the threshold friction velocities over the three different dust storm source are as in Northwest China (In Chinese). *Acta Meteorologica Sinica*, 2010, 68 (6): 977—984
- [15] 胡霞, 李顺江, 蔡强国, 等. 聚丙烯酰胺 (PAM) 对黄土溅蚀的影响. *水土保持研究*, 2009, 16 (5): 51—54, 59
Hu X, Li S J, Cai Q G, et al. Impact of polyacrylamide on soil splash erosion (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16 (5): 51—54, 59
- [16] 温磊磊, 郑粉莉, 杨青森, 等. 雨型对东北黑土区坡耕地土壤侵蚀影响的试验研究. *水利学报*, 2012, 43 (9): 1084—1091
Wen L L, Zheng F L, Yang Q S, et al. Effects of rainfall patterns on hillslope farmland erosion in black soil region of Northeast China (In Chinese). *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43 (9): 1084—1091
- [17] 冯浩, 吴淑芳, 吴普特. 高分子聚合物对土壤物理及坡面产流产沙特征的影响. *中国水土保持科学*, 2006, 4 (1): 15—19
Feng H, Wu S F, Wu P T. Effect of macromolecule polymers on soil physical characteristics and runoff and sediment generation on slope land (In Chinese). *Science of Soil and Water Conservation*, 2006, 4 (1): 15—19
- [18] 王健, 马璠, 张鹏辉, 等. 干湿交替对黄土崩解速度的影响. *土壤学报*, 2015, 52 (5): 1273—1279
Wang J, Ma F, Zhang P H, et al. Effect of wet-dry alternation on loess disintegration rate (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (5): 1273—1279
- [19] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展. *土壤学报*, 2011, 48 (2): 412—418
Dou S, Li K, Guan S. A review on organic matter in soil aggregates (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 (2): 412—418
- [20] 范娟, 李建龙, 李鹤, 等. 玉米秸秆饮料营养成分与生产工艺流程研究. *江苏农业科学*, 2011 (1): 322—324
Fan J, Li J L, Li H, et al. Research on corn straw juice nutrition and manufacture technology (In Chinese). *Jiangsu Agriculture Science*, 2011 (1): 322—324

- [21] 张爱国, 李锐, 杨勤科. 中国水蚀土壤抗剪强度研究. 水土保持通报, 2001, 21 (3) : 5—9
Zhang A G, Li R, Yang Q K. Study on soil anti-shearing intensity of water erosion in China (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21 (3) : 5—9
- [22] 李云鹏, 王云琦, 王玉杰, 等. 重庆缙云山不同林地土壤剪切破坏特性及影响因素研究. 土壤通报, 2013, 44 (5) : 1074—1080
Li Y P, Wang Y Q, Wang Y J, et al. Characteristics of soil shear failure of different forests and it' s affecting factors in Jinyun Mountain, Chongqing City (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44 (5) : 1074—1080
- [23] 郑洪兵, 郑金玉, 罗洋, 等. 长期不同耕作方式下的土壤硬度变化特征. 农业工程学报, 2015, 31 (9) : 63—70
Zheng H B, Zheng J Y, Luo Y, et al. Change characteristic of soil compaction of long-term different tillage methods in cropland (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31 (9) : 63—70

Effect of A New Soil Amendment — Corn Stalk Sap on Loessial Soil Anti-erodibility

QIN Chao¹ ZHENG Fenli^{1, 2†} LIU Peifeng³ XU Ximeng¹ WU Hongyan¹ WANG Yike³

(1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loessial Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(3 Innovative Experimental College, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract 【Objective】 Modifying soil physical properties is an important approach to improving soil anti-erodibility. As by-product of some industries, corn stalk sap is often discharged as waste. Recent studies have demonstrated that spraying corn stalk sap in the field may control sheet erosion. However, little is available in literature regarding effects of corn stalk sap controlling splash erosion and wind erosion. 【Method】 In this study, a new soil amendment consisting 95% ~ 97% corn stalk sap and 3% ~ 5% preservative (sodium benzoate) was tested in a field subjected to artificial rainfalls, winds and in situ observation to explore its effects of controlling splash, sheet, and wind erosion of loessial soil and their mechanisms. The experiment was designed to have two treatments for ingredient of the spray (corn stalk sap and tap water, the same in spraying volume), two treatments for standing time after spraying (7 and 14 d) and two treatments for soil tillage condition (with and without manual plough). 【Result】 Results show that corn stalk sap was quite effective in controlling water and wind erosion of loessial soil. Under simulated rainfalls, it reduced splash erosion by 24.7% ~ 78.3%, runoff by 35.3% ~ 45.3% and sheet erosion by 20.9% ~ 34.5%. Under natural rainfalls, the effects varied with rainfall pattern. When the rain was short in duration and low in intensity its effects reached the highest, with runoff and sheet erosion reduced by 62.1% and 72.0%. But when the rain was long in duration and high in intensity, it reduced runoff and sheet erosion by 26.3% and 58.3% and when the rain was short in duration and high in intensity, it did by 41.0% and 69.6%, respectively. Under the same standing time and soil tillage condition, its effect of reducing sediment yield was higher than that of reducing runoff. Under the condition of 6, 8 and 14 m s⁻¹ in wind speed, it reduced wind erosion by 25.0% ~ 64.6%, 31.0% ~ 52.9% and 24.5% ~ 43.2%, respectively, as compared with those in the control treatments. Manual tillage significantly increased water and wind erosion. Besides the effects of spraying corn stalk sap on various types of erosion varied with standing time and tillage. By increasing soil shear strength and soil hardness, promoting formation of soil micro-aggregates, spraying corn

stalk sap reduced soil erosion of any types. After spraying corn stalk sap, soil disintegration decreased by 97.4% ~ 98.5%; soil shear strength and soil hardness increased by 98.1% ~ 171.2% and 11.4% ~ 127.5%, respectively; proportion of soil aggregates with diameter < 0.25 mm decreased by 46.9% ~ 51.6%; and proportion of soil macro-aggregates with diameter > 2 mm increased by 88.1% ~ 129.7%. **【Conclusion】** Corn stalk sap is proved to be a practical soil amendment for control of water and wind erosion of the soil. It is, therefore, suggested that spraying of corn stalk sap be finished without suspending, so as to avoid any further human disturbance of the soil sprayed with corn stalk sap.

Key words Splash erosion; Sheet erosion; Wind erosion; In situ observation; Corn stalk; Soil amendment

(责任编辑: 檀满枝)