

华北玉米秸秆覆盖对砂土、壤土水土保持效应的影响

张翼夫¹ 王庆杰¹ 胡红¹ 陈婉芝¹ 王宪良¹ Rabi G Rasaily²

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 联合国粮农组织, 古邦 5371040)

摘要: 通过野外径流场模拟降雨试验,研究玉米秸秆覆盖对砂土和壤土产流产沙过程的影响,探索不同土壤质地下水土保持的临界秸秆覆盖条件。处理分为2种土壤质地类型和5个水平的秸秆覆盖度:0%、10%、20%、30%和40%。结果表明:壤土抗侵蚀能力优于砂土,但透水性弱于砂土;不同土壤质地条件下秸秆覆盖效益存在差异,相同的秸秆覆盖时,砂土条件下的土壤侵蚀防治效果优于壤土;2种土壤质地条件秸秆覆盖度30%时可显著提高土壤入渗总量(25.7%~33.9%),减少产沙总量(22.2%~46.4%),对水土流失具有良好的防治效果。考虑到过大的秸秆覆盖度(大于80%)会造成播种机堵塞,在华北保护性耕作研究实践中,建议砂土和壤土质地下的农田地表保持1600~3000 kg/hm²(30%~60%)的玉米秸秆覆盖,以达到较好的水土保持效果和播种质量。

关键词: 模拟降雨; 秸秆覆盖; 土壤类型; 保护性耕作; 水土保持效应

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)05-0138-08

Effect of Maize Straw Mulching on Water and Soil Conservation in Sandy Soil and Loam Soil of North China

Zhang Yifu¹ Wang Qingjie¹ Hu Hong¹ Chen Wanzhi¹ Wang Xianliang¹ Rabi G Rasaily²

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Food and Agriculture Organization, United Nations, Kupang 5371040, Indonesia)

Abstract: Straw mulching of farmland is a main method to reduce soil erosion and to improve water retention. However, overmuch straw mulching may lower the anti-blocking capacity of no-till planter, which is important to production efficiency and seeding quality. This research aims at discussing the influence of maize straw mulching on infiltration and sediment yield process under different soil texture conditions, and concluding an appropriate straw mulching rate for the optimization of no-till planter performance as well as the conservation of water and soil in the conservation agriculture research areas of north China. A rainfall simulation experiment was carried out from October to November in 2014, and the experimental field was located at Experimental Station of China Agricultural University, in Zhuozhou City, Hebei Province, North China. The runoff monitoring site was designed as a V-shaped symmetrical distribution, composed of six experimental plots. A UGT runoff measuring device made in German was installed to monitor the runoff and sediment yield process, and maize straw was collected cut off (less than 100 mm) after maize harvesting (early October). Two kind of soil type (sandy soil and loam soil) and five kind of straw mulching rate (0, 10%, 20%, 30%, 40%) were considered as two independent variables in experimental design (three repeated). Each simulated rainfall lasted 1 h. The impacts of maize straw mulching on infiltration and sediment yield were analyzed. The results indicated that straw mulching delayed runoff time, enhanced infiltration, and reduced soil loss. Specifically, 30% straw mulching treatment significantly enhanced accumulative infiltration by 25.7%~33.9%, reduced soil

收稿日期: 2015-11-02 修回日期: 2015-12-30

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503136)和教育部创新团队发展计划项目(IRT13039)

作者简介: 张翼夫(1990—),男,博士生,主要从事保护性耕作研究,E-mail: zyfu@cau.edu.cn

通信作者: 王庆杰(1979—),男,副教授,博士生导师,主要从事保护性耕作研究,E-mail: wangqingjie@cau.edu.cn

loss by 22.2% ~ 46.4% , compared with no mulching treatment. The experimental results also showed that the erosion-resistance of soil under different texture was different; under a 1 h simulated rainfall with 80 mm/h rainfall intensity, the steady infiltration rate and accumulative infiltration in loam soil were 0.02 mm/min and 5.9 mm less than that in sandy soil condition, and the corresponding total sediment yield was less by 1 364 g compared with sandy soil. Although 10% mulching treatment under sandy soil condition reduced soil loss significantly, the total sediment yield was much greater than that of loam soil in 10% mulching treatment. So least straw mulching rate of 30% was recommended on farmland surface in sandy soil and loam soil of north China, comparing the water and soil conservation effect of straw mulching under different soil texture conditions. However, in conservation tillage fields, over mulching (>80%) may lower the anti-blocking capacity of no-till planter, and thus affected seeding quality and grain production in north China. In conclusion, in conservation tillage system of sandy soil and loam soil planting area, 30% ~ 60% maize straw mulching (1 600 ~ 3 000 kg/hm²) is recommended to achieve high performance of planting and high efficient soil and water conservation, which provides the valuable information for suitable straw mulching rate of maize in north China during the application of conservation tillage practice.

Key words: rainfall simulation; straw mulching; soil type; conservation tillage; water and soil conservation effect

引言

中国北方约有 3.3×10^7 hm² 旱作农地存在干旱少雨、土地贫瘠、水土流失严重等问题^[1-2]。秸秆覆盖是减少土壤侵蚀、蓄水保墒的有效措施之一^[3-4]。自从 1930 年首次开展残茬(秸秆)覆盖研究^[5]以来,秸秆覆盖在改善土壤物理条件、蓄水保墒方面,已被大量研究和生产实践所证明^[6-7]。WISCHMEIER^[8]分析发现覆盖小区的径流和土壤流失量显著低于无覆盖小区。王晓燕等^[9]、张亚丽等^[10]研究表明,秸秆覆盖率越高,径流开始的时间和土壤含水率达到饱和的时间越晚。同时,秸秆覆盖能够改善土壤物理性质^[11],提高土壤肥力^[12],具有蓄水保墒、调节地温、减缓温度波动^[13]和提高土壤生物活性^[14]的作用,对农田保护具有重要意义。然而不同质地下的土壤特性存在差异:砂粒间孔隙粗,透水性强;粉粒表面吸附水分子的力较强,毛管水上升或向其他方向运动缓慢,透水性较差,土表易形成结皮(但不坚实);粘粒间的孔隙孔径极细微,粘粒吸附的水膜会充满或堵塞细微的孔隙,同时经湿润后的粘粒容易出现较厚的结皮和板结^[15],因此不同质地下的土壤抗侵蚀能力会有所不同。王辉等^[16]对比了降雨条件下,壤土和砂黄土的产流产沙过程,分析发现壤土入渗能力低于砂黄土,土壤流失较砂黄土少,但并未对不同土壤质地下的水土保持方法进行报道。华北是我国粮食主产区,对于华北农田区域秸秆覆盖减少土壤侵蚀、蓄水保墒的研究已有相关报

道^[17-18],但是结合不同土壤质地的覆盖效应研究较少。本文以砂土、壤土为研究对象,借助田间径流自动监测系统,通过野外模拟降雨试验,观测在不同土壤质地条件下玉米秸秆覆盖对产流、产沙过程的影响,并分析不同土壤质地下水土保持的临界秸秆覆盖条件,旨在为华北保护性耕作秸秆还田技术提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验设置在中国农业大学农业部河北北部耕地保育科学观测实验站,于 2014 年 10—11 月进行。实验站位于河北省保定市涿州东城坊镇(东经 115°56′,北纬 39°28′),全年平均日照 2 560 h,平均气温为 11.6℃,总积温为 4 198℃,无霜期为 178 d。试验区田间持水量 20.3%,土壤容重 1.34 g/cm³,pH 值 7.8,有机质质量比为 10 ~ 19 g/kg。

试验区隶属保定平原区,处于华北平原中部,是华北粮食主产区之一^[19]。砂土和壤土是该区域主要土壤质地类型^[19-20],以砂土和壤土为研究对象,在整个华北农田区域中具有其典型性和代表性,研究结果可以为华北农田区域水土保持研究和秸秆还田技术提供依据。

1.2 试验小区及材料

1.2.1 径流小区设计

田间径流场(图 1a)主要由 6 个径流小区组成^[17],采用“V”字形对称布置,中间为工作通道以进行试验操作,通道上方设置顶棚,以方便雨天或模拟降雨时进行试验。

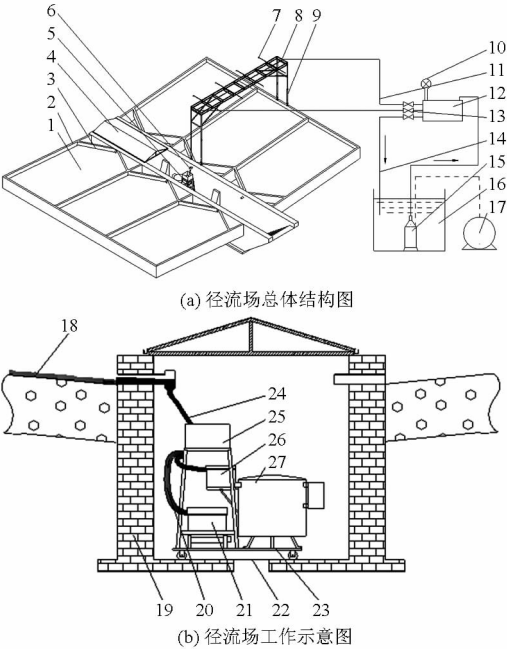


图 1 径流场结构与工作过程示意图

Fig. 1 Structure of runoff monitoring site and working process
1. 降雨区域 2. 小区边墙 3. 集流槽 4. 顶棚 5. UGT 径流测量装置 6. 导水管 7. 喷淋系统 8. 降雨座架 9. 可调支腿 10. 压力表 11. 供水管 12. 分水器 13. 球阀 14. 分流支管 15. 潜水泵 16. 蓄电池 17. 发电机 18. 径流 19. 小区边墙 20. 分流管 21. 3L 翻斗式流量仪 22. 排水沟 23. 移动小车 24. 导水管 25. 分流箱 26. 1L 翻斗式流量仪 27. 取样装置和控制系统

根据农艺要求,农田地表需要进行平整以便达到较好的播种和灌溉效果,因此地表坡度较小。参照 SL277—2002《水土保持监测技术规程》和 SL342—2006《水土保持监测设施通用技术条件》的要求,本文径流小区设计坡度均为 5°,每个小区长 8.0 m、宽 4.6 m。小区内装有耕层土,土壤质地分布及颗粒组成见表 1。

表 1 径流小区土壤类型分布及颗粒组成				
Tab. 1 Soil properties of runoff monitoring site %				
小区 编号	质地 类型	砂粒比例 (粒径 0.05 ~ 2 mm)	粉粒比例 (粒径 0.002 ~ 0.05 mm)	粘粒比例 (粒径 0 ~ 0.002 mm)
1, 3, 5	砂土	71.4	15.5	13.1
2, 4, 6	壤土	24.1	58.6	17.3

1.2.2 径流测量装置

径流场配备德国 UGT 径流测量装置(图 1b),其主要由分流箱、翻斗式流量仪、取样装置和控制系统等组成。该装置采用导流分散装置,可在径流产生过程中收集径流样品,同时自动记录径流发生的时间,从而实现坡面产流产沙变化过程的动态监测。

1.2.3 降雨装置及工作过程

模拟降雨装置(图 1a)采用多喷头、下喷式降雨

方案,主要由 3 部分组成^[21],包括喷淋系统:产生所要求的模拟降雨;降雨座架:固定、支撑整个喷淋系统,且使降雨高度可调;供水系统:供给喷淋系统所需要的压力水。

根据行业标准,该降雨装置特性如表 2 所示,参数与其他学者的设计结果接近^[22],满足模拟降雨试验要求。降雨装置详细设计过程参照文献[17]。

表 2 降雨装置的主要特性参数
Tab. 2 Main features of rainfall simulator

参数	数值	备注
降雨高度/m	2.5	最高可达 4 m
有效降雨面积/(m × m)	4.6 × 8.0	与径流小区面积一致
降雨强度/(mm · h ⁻¹)	20 ~ 120	
雨滴中数直径/mm	1.77 ~ 2.89	
雨滴终点速度/(m · s ⁻¹)	2.0 ~ 2.9	
均匀性系数/%	≥ 80	
供水压力/MPa	0.10 ~ 0.35	

田间径流场的工作过程如图 1b 所示:在模拟降雨时,由潜水泵通过供水管道将水流输送至喷淋系统,喷淋系统产生所需要的模拟降雨;在喷淋系统下方的径流小区设置试验处理,并由集流槽、导水管将产沙地表径流导入径流测量装置,通过径流测量装置完成样品的自动取样和记录。

1.2.4 玉米秸秆

玉米是研究区主要作物之一^[23],采用玉米秸秆作覆盖物进行研究具有参考意义。试验区玉米采用当地种植的玉米品种郑单 958,该品种夏播生育期约 103 d,株高约 250 cm,穗位约 100 cm。

采集 10 月初玉米收获后的秸秆放置在阴凉处自然风干,并用铡刀切碎,保证切断后的秸秆长度不长于 10 cm^[24]。

1.3 试验设计

1.3.1 降雨强度

试验区内设有 THIES 型气象监测站用于监测气象变化。监测数据显示,试验区 2012—2014 年年降雨量约 450 mm,降雨强度峰值为 116 mm/h(历时 12 min),正常降雨强度范围为 0 ~ 82 mm/h,单次降雨最大降雨量为 125 mm。考虑到暴雨是造成水土流失的主要降雨类型,设定试验降雨强度为 80 mm/h。

1.3.2 秸秆覆盖

华北保护性耕作研究区对于秸秆覆盖蓄水保墒的研究已有报道,其中张翼夫等^[18]、王晓燕等^[25]研究表明 30% 秸秆覆盖具有良好的水土保持效果,所以对比不同土壤类型下秸秆覆盖的水土保持效果,设定 5 个水平的秸秆覆盖度:0、10%、20%、30%、

40%。总计 10 组(5 种覆盖水平、2 种土壤类型)降雨试验,每组试验重复 3 次。

在试验区,玉米秸秆覆盖地表比较均匀,所以参考刘柳松等^[26]的方法确定玉米秸秆覆盖度与覆盖量之间的定量关系为

$$y = (-1.89 \times 10^{-8} x^2 + 2.7 \times 10^{-4} x - 0.0492) \times 100\%$$

(1)

式中 y ——玉米秸秆覆盖度,%

x ——覆盖量,kg/hm²

当玉米秸秆覆盖度为 10%、20%、30%、40% 时,计算得出相应秸秆量分别为 500、1 100、1 600、2 000 kg/hm²。

1.3.3 入渗率

入渗率是单位时间内通过地表单位面积渗入到土壤中的水量,反映了土壤的入渗性能,受土壤质地、孔隙状况、供水强度等因素的影响。根据水量平衡原理,降雨量主要转化为入渗、径流、蒸发和玉米秸秆的吸收。由于试验时间较短,蒸发损失的水量可以忽略;在暴雨条件下玉米秸秆迅速吸水达到饱和,在整个降雨试验过程中可以忽略。所以径流量与入渗量之和近似等于降雨量,入渗率的计算公式^[27]为

$$i = I \cos \alpha - \frac{q}{S}$$

(2)

式中 i ——入渗率,mm/min

I ——降雨强度,mm/h

α ——坡度,(°)

q ——径流速率,L/min

S ——坡面面积,m²

1.4 试验过程

因试验区田间土表起伏不平,在大量的秸秆覆盖下地表糙度差异较大,为了减少土表起伏对地表整体糙度的影响,每次试验前对土表进行平整。按照试验设计的覆盖量将相应秸秆自然均匀地覆盖在土表。

试验前先进行降雨强度的标定,以确保降雨的强度和均匀度达到试验要求。模拟降雨试验开始后(图 2),开始计时并观察坡面情况,当形成径流时记录产流时间。模拟降雨试验历时 1 h,结束后关闭降雨装置,读取 UGT 径流测量装置数据。通过过滤分离集样瓶中的泥沙,用烘干法测定泥沙含量。

1.5 数据处理

为了减少试验误差,提高试验数据的准确性,试验数据采用 3 次重复试验的平均值,并进行方差分析及多重比较。数据处理与分析采用 Excel 2007 和 DPS 7.05。



图 2 模拟降雨试验及小区结构示意图
Fig.2 Diagram of rainfall simulation experiment and structure of runoff monitoring site

2 结果与分析

2.1 秸秆覆盖对产流过程的影响

2.1.1 秸秆覆盖对径流产生时间的影响

径流产生时间随秸秆覆盖的变化规律见表 3,总体上产流时间随秸秆覆盖的增加而延长。砂土条件下,秸秆覆盖度为 10%、20%、30%、40% 时较无覆盖分别推迟径流产生时间 0.7、1.8、3.0、3.4 min,其中秸秆覆盖度不小于 20% 时对产流时间影响显著。壤土条件下,秸秆覆盖度为 10%、20%、30%、40% 时较无覆盖分别推迟径流产生时间 0.1、0.7、0.9、1.4 min,其中秸秆覆盖度不小于 40% 时对产流时间影响显著。而在相同的秸秆覆盖处理中,壤土条件下的产流时间较砂土缩短了 2.8~4.9 min。

表 3 各秸秆覆盖度下的径流产生时间
Tab.3 Runoff time in each straw mulching rate under different soil types min

秸秆覆盖度/%	土壤质地	
	砂土	壤土
0	7.1 ± 0.82 ^a	4.3 ± 0.45 ^a
10	7.8 ± 0.95 ^{ab}	4.4 ± 0.70 ^a
20	8.9 ± 0.56 ^{bc}	5.0 ± 0.36 ^{ab}
30	10.1 ± 1.10 ^{cd}	5.2 ± 0.63 ^{ab}
40	10.5 ± 0.79 ^d	5.7 ± 0.36 ^b

注:表格数据为 3 次重复试验的平均值,同列数据后标有不同字母者表示差异显著($p < 0.05$),下同。

2.1.2 秸秆覆盖对入渗过程的影响

秸秆覆盖对入渗过程的影响见图 3,径流产生之前,入渗率等于降雨强度,图中入渗率曲线描述的是径流产生后入渗率的变化情况。随着降雨试验的进行,入渗率总体上呈现先减小后趋于稳定的规律。砂土条件下,径流产生初期入渗率先缓慢减小,再迅速减小,而后缓慢减小并趋于稳定。秸秆覆盖减缓了入渗率的减小速率,与无覆盖处理相比,秸秆覆盖度为 20%、30%、40% 时推迟入渗达到稳定入渗阶

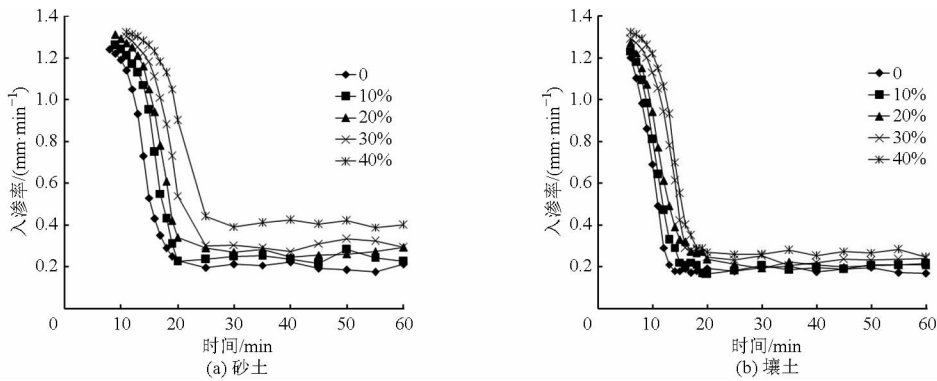


图 3 不同秸秆覆盖度对入渗率的影响

Fig. 3 Effect of mulching treatments on infiltration rate under different soil type conditions

段5~10 min。壤土条件下,径流产生初期入渗率的变化规律与砂土相似,而与无覆盖处理相比,秸秆覆盖度为20%、30%、40%时推迟入渗达到稳定入渗阶段2~6 min。

秸秆覆盖对入渗过程的影响还体现在对稳定入渗率的提高。砂土条件下,降雨试验进行20~30 min后达到稳定入渗阶段,稳定入渗率集中在0.20~0.41 mm/min之间,其中秸秆覆盖度为20%、30%、40%时较无覆盖处理稳定入渗率分别提高0.07、0.10、0.21 mm/min。壤土条件下,降雨试验进行14~20 min后达到稳定入渗阶段,稳定入渗率集中在0.18~0.26 mm/min,其中秸秆覆盖度为20%、30%、40%时较无覆盖处理稳定入渗率分别提高

0.03、0.05、0.08 mm/min。结果显示,秸秆覆盖能够延缓降雨试验达到稳定入渗阶段的时间,并增大坡面稳定入渗率。

而相同秸秆覆盖处理下,2种土壤类型的入渗过程存在差异。壤土条件下,径流达到稳定入渗阶段的时间较砂土缩短了5~10 min,同时稳定入渗率较砂土减小了0.02~0.15 mm/min,表明砂土入渗性能高于壤土。

2.2 秸秆覆盖对产沙过程的影响

坡面径流沿着坡面流动对坡面土壤产生侵蚀作用,是影响水土流失的主导因素之一^[28]。不同秸秆覆盖度对产沙过程的影响见图4,图中数据为3次重复试验的平均值,竖线表示LSD值($p < 0.05$)。

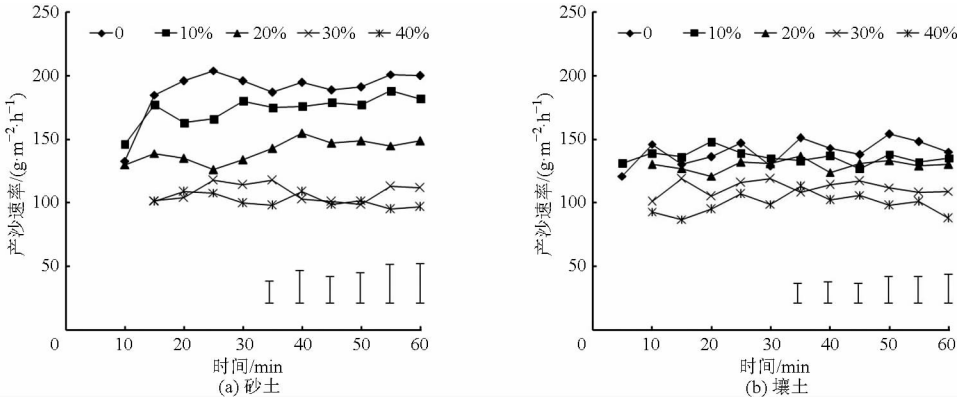


图 4 不同秸秆覆盖度对产沙过程的影响

Fig. 4 Effect of straw mulching treatments on sediment yield rate under different soil type conditions

砂土条件下,降雨强度80 mm/h时,不同秸秆覆盖处理之间的坡面产沙过程存在差异。无秸秆覆盖时,初始产沙速率为133 g/(m²·h),20 min时急剧增大至196 g/(m²·h),而后产沙速率上下波动并趋于平缓,降雨后期平均产沙速率为194 g/(m²·h);秸秆覆盖度10%时,产沙速率的变化规律与无覆盖条件相似,初始产沙速率由146 g/(m²·h)增大至177 g/(m²·h),随后波动趋于平缓,降雨后期平均产沙速率为179 g/(m²·h),较无覆盖减小15 g/(m²·h);秸秆覆盖度20%、30%、40%时,径流产生初期产沙

速率并未出现急剧的增大,整体上表现为上下波动,降雨后期平均产沙速率较无覆盖分别减小46、86、94 g/(m²·h)。

壤土条件下,坡面产沙过程呈上下波动规律。无覆盖条件下,径流产生初期产沙速率为121 g/(m²·h),随后产沙速率上下波动,降雨后期平均产沙速率为143 g/(m²·h),降雨过程中产沙速率最大值和最小值相差33 g/(m²·h);秸秆覆盖度为10%、20%、30%、40%条件下的平均产沙速率分别为134、130、112、101 g/(m²·h),较无覆盖分别减小9、13、32、

42 g/(m²·h)。

2.3 秸秆覆盖对入渗总量和产沙总量的影响

2.3.1 秸秆覆盖对入渗总量的影响

为了研究华北保护性耕作研究区域自然降雨条件下玉米秸秆覆盖对产流入渗的影响,计算了各次模拟试验的入渗总量。不同土壤类型下秸秆覆盖对入渗总量的影响见表4。总体上,入渗总量随着秸秆覆盖的增加而增大。砂土条件下,秸秆覆盖度10%时较无覆盖入渗总量提高14.1%;秸秆覆盖度大于10%时对入渗总量的影响显著,秸秆覆盖度20%、30%、40%时入渗总量分别提高23.0%、33.9%、54.6%。壤土条件下,秸秆覆盖度10%、20%时较无覆盖入渗总量分别提高8.1%、11.4%;秸秆覆盖度大于20%时对入渗总量的影响显著,秸秆覆盖度30%、40%时入渗总量分别提高25.7%、41.0%。

表4 秸秆覆盖度对入渗总量和产沙总量的影响

Tab.4 Total infiltration and total sediment yield under different straw mulching conditions in sandy soil and loam soil

土壤类型	秸秆覆盖度/%	入渗总量/mm	产沙总量/g
砂土	0	26.9 ^a	6 206 ^a
	10	30.7 ^{ab}	5 585 ^b
	20	33.1 ^b	4 441 ^c
	30	36.0 ^c	3 324 ^d
	40	41.6 ^d	3 122 ^d
壤土	0	21.0 ^a	4 842 ^a
	10	22.7 ^{ab}	4 629 ^a
	20	23.4 ^{ab}	4 370 ^{ab}
	30	26.1 ^{bc}	3 766 ^{bc}
	40	29.6 ^c	3 339 ^c

2.3.2 秸秆覆盖对产沙总量的影响

产沙总量的观测结果(表4)表明:不同土壤类型下,秸秆覆盖对产沙总量的影响呈相似规律,即秸秆覆盖度越高产沙总量越小。砂土条件下,秸秆覆盖对产沙总量的影响显著,秸秆覆盖度10%、20%、30%、40%时较无覆盖产沙总量分别减小10.0%、28.5%、46.4%、49.7%。壤土条件下,秸秆覆盖度10%、20%时较无覆盖产沙总量分别提高4.4%、9.7%;秸秆覆盖度大于20%时对产沙总量的影响显著,秸秆覆盖度30%、40%时产沙总量分别提高22.2%、31.0%。

3 讨论

3.1 土壤质地对产流产沙过程的影响

不同质地下的土壤抗侵蚀能力存在差异:80 mm/h降雨强度下,无秸秆覆盖时,壤土条件下的

产流时间较砂土短2.8 min,稳定入渗率和入渗总量较砂土分别小0.02 mm/min和5.9 mm,产沙总量较砂土少1 364 g,结果表明壤土透水性弱于砂土,但是保土效果优于砂土,研究结果与王辉等^[16]的报道一致。土壤透水性和抗冲性是水土流失密切相关的2个土壤性状指标^[29],砂粒间孔隙粗,透水性强^[15],粉粒与粘粒具有较强的粘结力,在受同等径流冲击作用情况下,抵抗径流机械破坏的能力也更强^[30]。该研究结果不仅可以为华北不同土壤质地下的水土保持措施提供依据,也可以为其他区域的土壤侵蚀治理研究提供参考。

由于不同质地下的土壤抗侵蚀能力有所不同,所以相应秸秆覆盖的水土保持效果存在差异。砂土条件下,秸秆覆盖度不小于20%时入渗总量显著提高,秸秆覆盖度不小于10%时土壤流失显著减少;壤土条件下,秸秆覆盖度不小于30%时水土保持效果显著。结果表明,对于显著减少土壤侵蚀所需要的秸秆覆盖量,壤土高于砂土。同时,砂土和壤土条件下,秸秆覆盖度10%、20%、30%、40%时较无覆盖产沙总量分别减小621 g和213 g、1 765 g和472 g、2 882 g和1 076 g、3 084 g和1 503 g,该结果表明使用相同的秸秆覆盖时,砂土条件下的土壤侵蚀防治效果优于壤土,这是因为土表覆盖的拦沙效应主要是体现在对大粒径泥沙的拦蓄上^[31]。

3.2 秸秆覆盖对产流产沙过程的影响

秸秆覆盖推迟径流产生时间,10%、20%、30%和40%秸秆覆盖下的径流产生时间较无覆盖分别推迟0.1~0.7 min、0.7~1.8 min、0.9~3.0 min和1.4~3.4 min,由此可知秸秆覆盖越多,径流产生时间的推迟效果越明显,这与王晓燕等^[9]的研究结果一致。同时,秸秆覆盖提高土壤入渗率:秸秆覆盖度30%时较无覆盖处理稳定入渗率提高0.05~0.1 mm/min,入渗总量显著提高25.7%~33.9%;秸秆覆盖度40%时入渗总量显著提高41.0%~54.6%,研究结果与唐涛等^[32]报道接近。降雨入渗过程中,由于雨滴具有动能和动量^[33],会破坏土壤表面特性。雨滴的击溅作用使细颗粒填充和阻塞土壤孔隙,降低土壤入渗率^[34]。玉米秸秆覆盖对雨滴的阻挡削弱了雨滴动能,且覆盖度越大,对雨滴动能的削弱作用越明显,从而减弱了雨滴对土壤团聚体的破坏,改善了土壤结构,有利于降雨入渗。同时,秸秆覆盖提高了地表糙度,随着地表糙度的增加,地表临时性蓄水能力增强,延缓了坡面的汇流作用^[35],减缓了地表的冲刷。

秸秆覆盖影响产沙过程:砂土条件下,无秸秆覆盖时径流产生初期产沙速率急剧增大,而30%和

40%覆盖条件下的产沙速率表现为上下波动,未发生急剧变化,说明秸秆覆盖能够抑制产沙的急剧变化。当径流达到稳定入渗阶段时,产沙速率表现平缓,秸秆覆盖度10%、20%、30%、40%时的平均产沙速率较无覆盖分别减小9~15 g/(m²·h)、13~46 g/(m²·h)、32~86 g/(m²·h)和42~94 g/(m²·h),说明秸秆覆盖能够减小稳定入渗阶段的产沙速率,且秸秆覆盖度越大效果越明显,研究结果与刘柳松等^[26]相比研究结果偏大,这可能是因为选用了不同的作物秸秆作为覆盖物。综上所述,秸秆覆盖对坡面径流侵蚀土壤的抑制作用主要体现在两方面:一是抑制径流产生初期产沙速率的急剧增大;二是降低降雨后期,径流达到稳定入渗阶段的产沙速率。其原因主要有:部分秸秆在径流的冲击下,聚集形成微型坝,阻挡径流,降低流速^[36],减少水土流失^[37];秸秆覆盖改变地表糙度,地表凹陷导致地表径流形成阻滞作用,进而减缓了产沙^[38]。

秸秆覆盖度10%时能够显著减少砂土的土壤流失(表4),但是与壤土比较,砂土产沙总量大于相同秸秆覆盖度下壤土的产沙总量(砂土5 585 g、壤土4 629 g),所以为了达到良好的水土保持效果,建议在砂土条件下施用大于10%的秸秆覆盖度。另一方面,秸秆覆盖度30%时显著减少壤土条件下的产沙总量,同时砂土在30%秸秆覆盖时的产沙总量小于壤土,说明秸秆覆盖度30%时在砂土和壤土条件下均具有良好的水土保持效果。考虑到不同土壤质地的农田地表施用不同的秸秆还田量,会提高配套秸秆还田机具的研发难度,综上所述建议砂土和

壤土质地下的农田地表最少保持30%的秸秆覆盖度。保护性耕作实践证明^[39],在后续播种中玉米秸秆覆盖度不大于60%时,播种机能顺利通过,当覆盖率达到80%以上,田间布满秸秆经常出现播种机堵塞的问题。所以,在华北保护性耕作研究实践中,为了在减少土壤侵蚀的基础上确保后续的播种质量,建议农田地表保持1 600~3 000 kg/hm²(30%~60%)的玉米秸秆覆盖。

4 结 论

(1)壤土抗侵蚀能力优于砂土,但透水性弱于砂土。同时不同土壤质地条件下秸秆覆盖效应存在差异:相同的秸秆覆盖时,砂土条件下的土壤侵蚀防治效果优于壤土。

(2)砂土和壤土条件下,30%(1 600 kg/hm²)秸秆覆盖能够显著提高土壤入渗总量(25.7%~33.9%),减少产沙总量(22.2%~46.4%),对水土流失具有良好的防治效果。

(3)推荐砂土地表最少保持30%的秸秆覆盖度,原因主要有2点:一是10%秸秆覆盖下砂土产沙总量远远大于壤土,同时30%秸秆覆盖时砂土和壤土产沙总量接近;二是不同土壤质地的农田地表施用不同的秸秆还田量,会提高配套秸秆还田机具的研发难度。综上所述,在华北保护性耕作研究实践中,建议砂土和壤土质地下的农田地表均保持1 600~3 000 kg/hm²(30%~60%)的玉米秸秆覆盖,以达到较好的水土保持效果和播种质量。

参 考 文 献

- 高焕文,李洪文,陈君达. 可持续机械化旱作农业研究[J]. 干旱地区农业研究,1999(1):57-62.
GAO Huanwen, LI Hongwen, CHEN Junda. Research on sustainable mechanized dryland farming[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,1999(1):57-62. (in Chinese)
- 高焕文,李问盈,李洪文. 中国特色保护性耕作技术[J]. 农业工程学报,2003,19(3):1-4.
GAO Huanwen, LI Wenying, LI Hongwen. Conservation tillage technology with Chinese characteristics[J]. Transactions of the CSAE,2003,19(3):1-4. (in Chinese)
- 何进,李洪文,高焕文. 中国北方保护性耕作条件下深松效应与经济效益研究[J]. 农业工程学报,2006,22(10):62-67.
HE Jin, LI Hongwen, GAO Huanwen. Subsoiling effect and economic benefit under conservation tillage mode in Northern China [J]. Transactions of the CSAE,2006,22(10):62-67. (in Chinese)
- 高焕文,李洪文,李问盈,等. 保护性耕作的发展[J]. 农业机械学报,2008,39(9):43-48.
GAO Huanwen, LI Hongwen, LI Wenying, et al. Development of conservation tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9):43-48. (in Chinese)
- HALLSTED A L, COLES E H. A preliminary report of the relation between yield of winter wheat and moisture in the soil at seeding time[J]. Journal of Agricultural Research, 1930, 41:467-477.
- TEBRUGGE F, DURING R A. Reducing tillage intensity—a review of results from a long-term study in Germany[J]. Soil & Tillage Research,1999,53(1):15-28.
- Huixiao W, Changming L, Lu Z. Water-saving agriculture in china: an overview[J]. Advances in Agronomy, 2002, 75(2):135-171.
- WISCHMEIER W H. Relation of field-plot runoff to management and physical factors[J]. Soil Science Society of America Journal,

1966, 30(2):272 – 277.

9 王晓燕, 高焕文, 杜兵, 等. 保护性耕作的不同因素对降雨入渗的影响[J]. 中国农业大学学报, 2001, 6(6):42 – 47.
WANG Xiaoyan, GAO Huanwen, DU Bing, et al. Rainfall infiltration related to different conservation tillage factors[J]. Journal of China Agricultural University, 2001, 6(6):42 – 47. (in Chinese)

10 张亚丽, 张兴昌, 邵明安, 等. 秸秆覆盖对黄土坡面矿质氮素径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1):85 – 88.
ZHANG Yali, ZHANG Xingchang, SHAO Ming'an, et al. Impact of straw cover on mineral nitrogen loss by runoff on loess slope [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(1):85 – 88. (in Chinese)

11 雷金银, 吴发启, 王健, 等. 保护性耕作对土壤物理特性及玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10):40 – 45.
LEI Jinyin, WU Faqi, WANG Jian, et al. Effect of conservation tillage on soil physical properties and corn yield [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(10):40 – 45. (in Chinese)

12 刘世平, 陈后庆, 聂新涛, 等. 稻麦两熟制不同耕作方式与秸秆还田土壤肥力的综合评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5):51 – 56.
LIU Shiping, CHEN Houqing, NIE Xintao, et al. Comprehensive evaluation of tillage and straw returning on soil fertility in a wheat-rice double cropping system[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(5):51 – 56. (in Chinese)

13 张俊鹏, 孙景生, 刘祖贵, 等. 不同麦秸覆盖量对夏玉米田棵间土壤蒸发和地温的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1):95 – 100.
ZHANG Junpeng, SUN Jingsheng, LIU Zugui, et al. Effects of different straw mulching quantity on soil evaporation and soil temperature in summer corn field[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(1):95 – 100. (in Chinese)

14 李升东, 王法宏, 司纪升, 等. 耕作方式对土壤微生物和土壤肥力的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5):1961 – 1964.
LI Shengdong, WANG Fahong, SI Jisheng, et al. Effect of different farming methods on soil microbial biomass and soil fertility [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(5):1961 – 1964. (in Chinese)

15 秦耀东. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社, 2003:1 – 7.

16 王辉, 王全九, 邵明安. 前期土壤含水量对坡面产流产沙特性影响的模拟试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5):65 – 68.
WANG Hui, WANG Quanjiu, SHAO Ming'an. Simulation experiment of effect of antecedent soil moisture content on characteristics of runoff and sediment from two soil sloping lands[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(5):65 – 68. (in Chinese)

17 郑智旗, 王树东, 何进, 等. 基于自动监测径流场的秸秆覆盖坡耕地产流产沙过程[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12):160 – 164.
ZHENG Zhiqi, WANG Shudong, HE Jin, et al. Study on process of runoff and sediment yield in straw-covering sloping fields based on automatic runoff monitoring field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12):160 – 164. (in Chinese)

18 张翼夫, 李洪文, 何进, 等. 玉米秸秆覆盖对坡面产流产沙过程的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7):118 – 124.
ZHANG Yifu, LI Hongwen, HE Jin, et al. Effects of maize straw mulching for runoff and sediment process of slope [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(7):118 – 124. (in Chinese)

19 孟霄. 保定平原区农田覆麦盖提高土壤水资源利用量的研究[D]. 保定:河北农业大学, 2006.

20 贺勇, 胡克林, 李卫东, 等. 华北冲积平原区土壤剖面质地层次空间分布的三维随机模拟[J]. 土壤学报, 2008, 45(2):193 – 200.
HE Yong, HU Kelin, LI Weidong, et al. Stochastic simulation of three-dimensional spatial distribution of soil profile textural layers in alluvial plain, North China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(2):193 – 200. (in Chinese)

21 郑智旗. 田间径流试验场的设计与应用研究[D]. 北京:中国农业大学, 2013.

22 陈文亮, 唐克丽. SR 型野外人工模拟降雨装置[J]. 水土保持研究, 2000, 7(4):106 – 110.
CHEN Wenliang, TANG Keli. A new SR style field artificial rainfall simulator[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2000, 7(4):106 – 110. (in Chinese)

23 钟兆站, 赵聚宝, 郁小川, 等. 中国北方主要旱地作物需水量的计算与分析[J]. 中国农业气象, 2000, 21(2):1 – 4.
ZHONG Zhaozhan, ZHAO Jubao, YU Xiaochuan, et al. Calculation and analysis on water requirements of major crops in northern China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2000, 21(2):1 – 4. (in Chinese)

24 JB/T 6678—2001 秸秆粉碎还田机[S]. 2001.

25 王晓燕, 高焕文, 李洪文, 等. 保护性耕作对农田地表径流与土壤水蚀影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3):66 – 69.
WANG Xiaoyan, GAO Huanwen, LI Hongwen, et al. Experimental study on runoff and erosion under conservative tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(3):66 – 69. (in Chinese)

26 刘柳松, 任红艳, 史学正, 等. 秸秆覆盖对不同初始含水率土壤产沙过程的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1):108 – 112.
LIU Liusong, REN Hongyan, SHI Xuezheng, et al. Effect of straw mulching on sediment yielding process of soil with different initial water contents[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1):108 – 112. (in Chinese)

- [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(6): 92–97. (in Chinese)
- 45 王清奎, 李艳鹏, 张方月, 等. 短期施氮肥降低杉木幼林土壤的根系和微生物呼吸[J]. 植物生态学报, 2015, 39(12): 1166–1175.
WANG Qingkui, LI Yanpeng, ZHANG Fangyue, et al. Short-term nitrogen fertilization decreased root and microbial respiration in a young *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(12): 1166–1175. (in Chinese)
- 46 RASHEDUL I M, CHAUHAN P S, YOOHAK K, et al. Community level functional diversity and enzyme activities in paddy soils under different long-term fertilizer management practices[J]. Biology and Fertility of Soils, 2011, 47(5): 599–604.
- 47 何绪生, 廖宗文, 黄培钊, 等. 一种新型保水缓释氮肥有关特征及性能[J]. 中国农业科学, 2006, 39(10): 2048–2055.
HE Xusheng, LIAO Zongwen, HUANG Peizhao, et al. Characteristics and performance of a new water-absorbent slow release nitrogen fertilizer[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(10): 2048–2055. (in Chinese)
- 48 LUGLIA M, CRIQUET S, SARRAZIN M, et al. Functional patterns of microbial communities of rhizospheric soils across the development stages of a young mangrove in French Guiana[J]. Microbial Ecology, 2014, 67(2): 302–317.
- 49 HAN Yuguo, YANG Peiling, LUO Yuanpei, et al. Porosity change model for watered super absorbent polymer-treated soil[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 61(6): 1197–1205.
- 50 何绪生, 黄培钊, 廖宗文, 等. 保水缓释氮肥水分状态与吸持特征研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 10–15.
HE Xusheng, HUANG Peizhao, LIAO Zongwen, et al. State and retention characteristics of water in hydrogel of water absorbent slow release nitrogen fertilizer[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 10–15. (in Chinese)
-

(上接第 145 页)

- 27 陈洪松, 邵明安, 王克林. 土壤初始含水率对坡面降雨入渗及土壤水分再分布的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 44–47.
CHEN Hongsong, SHAO Ming'an, WANG Kelin. Effects of initial water content on hillslope rainfall infiltration and soil water redistribution[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(1): 44–47. (in Chinese)
- 28 郭延辅, 段巧甫. 水土保持径流调控理论与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004: 21.
- 29 罗利芳, 张科利, 李双才. 撂荒后黄土高原坡耕地土壤透水性和抗冲性的变化[J]. 地理科学, 2003, 23(6): 728–733.
LUO Lifang, ZHANG Keli, LI Shuangcai. Change in soil permeability and anti-scourability of farmland after abandonment[J]. Scientia Geographica Sinica, 2003, 23(6): 728–733. (in Chinese)
- 30 王一峰, 张平仓, 朱兵兵, 等. 长江中上游地区土壤抗冲性特征研究[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(1): 12–15.
WANG Yifeng, ZHANG Pingcang, ZHU Bingbing, et al. Features of soil anti-scourability in upper-middle reaches of Yangtze River[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2007, 24(1): 12–15. (in Chinese)
- 31 潘成忠, 上官周平. 不同坡度草地含沙水流水力学特性及其拦沙机理[J]. 水科学进展, 2007, 18(4): 490–495.
PAN Chengzhong, SHANGGUAN Zhouping. Hydraulic characteristics of silt-laden flow on different gradient grassplots and its mechanism of sediment retention[J]. Advance in Water Science, 2007, 18(4): 490–495. (in Chinese)
- 32 唐涛, 郝明德, 单凤霞. 人工降雨条件下秸秆覆盖减少水土流失的效应研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 9–11, 40.
TANG Tao, HAO Mingde, SHAN Fengxia. Effects of straw mulch application on water loss and soil erosion under simulated rainfall[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(1): 9–11, 40. (in Chinese)
- 33 SHAINBERG I, MAMEDOV A I, LEVY G J. Role of wetting rate and rain energy in seal formation and erosion 1[J]. Soil Science, 2003, 168(1): 54–62.
- 34 唐泽军, 雷廷武, 张晴雯, 等. 雨滴溅蚀和结皮效应对土壤侵蚀影响的试验研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 632–635.
TANG Zejun, LEI Tingwu, ZHANG Qingwen, et al. Quantitative determination of the impacts of raindrop splash and crust on soil erosion with ree experimental data[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 632–635. (in Chinese)
- 35 郑子成, 何淑勤, 吴发启. 降雨条件下地表糙度对片蚀的影响及其变化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊 1): 139–145.
ZHENG Zicheng, HE Shuqin, WU Faqi. Effects of soil surface roughness on sheet erosion and change under different rainfall conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp. 1): 139–145. (in Chinese)
- 36 WHELAN M J, ANDERSON J M. Modeling spatial patterns of throughfall and interception loss in a Norway spruce (*Picea abies*) plantation at the plot scale[J]. Journal of Hydrology, 1996, 186: 335–354.
- 37 DORING T F, BRANDT M, HESS J, et al. Effects of straw mulch on soil nitrate dynamics, weeds, yield and soil erosion in organically grown potatoes[J]. Field Crops Research, 2005, 94(2–3): 238–249.
- 38 郑子成, 吴发启, 何淑勤, 等. 地表糙度对径流和产沙影响的室内试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(10): 19–24.
ZHENG Zicheng, WU Faqi, HE Shuqin, et al. Effects of soil surface roughness on runoff and sediment discharges with laboratory experiments[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(10): 19–24. (in Chinese)
- 39 贾延明, 尚长青, 张振国. 保护性耕作适应性试验及关键技术研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 78–81.
JIA Yanming, SHANG Zhangqing, ZHANG Zhenguo. Adaptability test and key technology research on conservation tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(1): 78–81. (in Chinese)