

小麦秸秆粉碎还田配施氮肥与多酚对土壤侵蚀阻力的影响

郭金金^{1,2}, 方怒放^{1,2}, 刘前进³, 张含玉³

(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.中国科学院大学,北京 100049;3.山东省水土保持与环境保育重点实验室,临沂大学资源环境学院,山东 临沂 276005)

摘要: 小麦秸秆粉碎还田可改变土壤性质,进而影响土壤侵蚀阻力。以北方土石山区褐土为研究对象,利用 $L_9(3^4)$ 正交表对秸秆长度(2,5,8 cm)、秸秆还田量(2 000,4 000,8 000 kg/hm²)、纯氮施加量(100,140,180 kg/hm²)及纯多酚施加量(0,40,80 kg/hm²)4 因素 3 水平进行正交设计,加空白对照共计 10 个处理。采用 JET 土壤侵蚀阻力测定仪测定土壤可蚀性和临界剪切力,分析秸秆粉碎还田对土壤侵蚀阻力的影响。结果表明:与对照相比,秸秆粉碎还田后各处理土壤临界剪切力均有所增大,但差异不显著($P>0.05$),氮肥量对土壤临界剪切力影响显著,随氮肥量增加土壤临界剪切力先增加后减小。秸秆长度、还田量、氮肥量和多酚量对土壤可蚀性均具有显著影响,其中秸秆还田量和多酚量的影响贡献率较大,分别为 50.61% 和 23.84%,其影响分别为负效应和正效应。秸秆粉碎还田条件下,土壤可蚀性可用土壤饱和含水量、 >0.25 mm 团聚体含量进行线性拟合($R^2=0.81, P<0.01$); >0.25 mm 水稳性团聚体含量与土壤可蚀性能较好地模拟土壤临界剪切力($R^2=0.76, P<0.05$)。研究结果有助于理解秸秆粉碎还田后土壤侵蚀阻力变化与机制,并可为模型模拟提供数据支持。

关键词: 土壤侵蚀阻力; 秸秆粉碎还田; 土壤可蚀性; 土壤临界剪切力; 土壤性质

中图分类号: S157.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2021)04-0122-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.04.017

Effects of Incorporated Wheat Straw Returning Combined Application with Nitrogen and Polyphenols on Soil Erosion Resistance

GUO Jinjin^{1,2}, FANG Nufang^{1,2}, LIU Qianjin³, ZHANG Hanyu³

(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; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3.Shandong Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Environmental Protection, College of Resources and Environment, Linyi University, Linyi, Shandong 276005)

Abstract: Incorporated wheat straw returning can change soil properties, which in turn affects soil erosion resistance. In order to clarify the response of soil erosion resistance after incorporated wheat straw returning to the field, this study took cinnamon soil in the earth-rocky mountain areas of northern China as research object. The orthogonal design table of $L_9(3^4)$ was used to arrange the treatments with factors of straw length (2, 5, 8 cm), straw returning amount (2 000, 4 000, 8 000 kg/hm²), pure nitrogen application amount (100, 140, 180 kg/hm²), and pure polyphenol application amount (0, 40, 80 kg/hm²) at three gradients. Totally, the study had 10 treatments including a controlled trial. The soil erodibility and critical shear stress were measured by the JET equipment. The results showed that the soil critical shear stress of all returning treatments increased compared with the controlled trial, but the difference was not significant ($P>0.05$). The effect of nitrogen fertilizer on the soil critical shear stress was significant, and the critical shear stress firstly increased and then decreased with the increase of nitrogen fertilizer amount. The straw length, straw returning amount, nitrogen fertilizer, and polyphenol had significant influence on soil erodibility. The contribution rates of straw returning and polyphenol were 50.61% and 23.84%, with negative and positive effects, respectively. Under the condition of incorporated wheat straw returning to the field, the soil erodibility could be fitted linearly with soil saturated water content and >0.25 mm aggregate content ($R^2 =$

收稿日期: 2021-03-18

资助项目: 国家自然科学基金项目(41701311, 4207071138); 山东省高等学校青创人才引育计划项目(LUJIAORENZI20199)

第一作者: 郭金金(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: guojinjin19@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 方怒放(1985—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: fnf@ms.iswc.ac.cn

0.81, $P < 0.01$). The change of critical shear stress could be simulated with the content of water-stable aggregate of > 0.25 mm and soil erodibility ($R^2 = 0.76$, $P < 0.05$). The results maybe helpful to understand the change and mechanism of soil erosion resistance after incorporated straw returning and provide data for soil erosion modeling.

Keywords: soil erosion resistance; incorporated straw returning; soil erodibility; soil critical shear stress; soil properties

土壤侵蚀是在水力、风力等外营力作用下引起的土壤分离、搬运和沉积过程,可导致土层变薄、养分流失、土壤质量下降、耕地面积减小等生态环境与粮食安全[1]。土壤分离过程是土壤侵蚀的起始阶段,可为泥沙搬运和沉积过程提供物质条件,受外在侵蚀动力与内在土壤性质的控制[2]。土壤侵蚀阻力是土壤抵抗侵蚀的能力,在细沟侵蚀过程中可用土壤临界剪切力和土壤可蚀性予以表征[2]。土壤临界剪切力常被量化为土壤分离发生时外界水动力的大小[3],而土壤可蚀性反映了土壤对侵蚀的敏感性和易损性[4]。研究土壤侵蚀阻力变化特征及其影响因素,可为揭示土壤分离过程与机制提供科学依据。

秸秆还田措施因具有培肥土壤、减少污染、促进作物增产等生态经济效益,在农业生产中得到大力推广。我国是世界上最大的小麦生产国,其中 70% 的小麦秸秆被还田作为肥料使用[5]。粉碎后的秸秆在土壤中腐解速度快、利用率高,因此秸秆粉碎还田已成为主要还田方式[6]。秸秆还田可通过改变土壤理化性质影响土壤侵蚀阻力[7]。秸秆分解与腐殖化可提高土壤有机质的含量[8],促进土壤团聚体形成,提高团聚体水稳性[9],降低土壤容重,增加土壤孔隙度[10],有利于改善土壤结构,增强土壤侵蚀阻力[11]。此外,残留秸秆与土壤颗粒相互交织,可降低土壤可蚀性,提高土壤临界剪切力[12]。然而,受秸秆长度和还田量的影响,秸秆还田对土壤理化性质的影响程度不同[6],使土壤侵蚀阻力的响应具有差异性。

小麦秸秆的碳氮比(C/N)较高($> 40 : 1$),还田后会导致土壤 C/N 失调,出现微生物与作物争氮现象[13]。因此,小麦秸秆还田需要配施氮肥来调整土壤 C/N。随施氮量的增加,土壤 C/N 降低,微生物活性提高,促进了秸秆腐解和土壤有机质积累[14]。但氮肥施用量过大会造成土壤退化[15],降低土壤侵蚀阻力。多酚作为一种广泛存在于植物中的次生代谢物质,因其多元酚结构能与多种化学物质和生命大分子反应[16],影响土壤微生物活性和氮的循环与利用,并可提高水肥利用率,调节生物生长[17]。此外,多酚具有无污染、易于生物降解的优点,在建设生态友好型农业环境方面具有广泛的应用前景[18]。因此,研究秸秆还田配施氮肥及多酚对土壤性质的影响与土壤侵蚀阻力的响应规律,对秸秆还田措施优化与土壤

侵蚀防治具有重要意义。

本试验以北方土石山区褐土为研究对象,分析秸秆粉碎长度、秸秆还田量、配施氮肥量、多酚量对土壤可蚀性和临界剪切力的影响,明确土壤侵蚀阻力的变化特征与主要影响因素,并建立土壤理化性质与土壤侵蚀阻力参数间的定量关系,研究结果有助于秸秆粉碎还田条件下的土壤侵蚀过程剖析与模型模拟。

1 材料与方 法

1.1 试验材料与设 计

本研究以石灰岩发育而来的褐土为试验土壤,参照实际生产经验与秸秆还田标准(NY/T 500—2015),设置秸秆长度(2, 5, 8 cm)、秸秆还田量(2 000, 4 000, 8 000 kg/hm²)、纯氮施加量(100, 140, 180 kg/hm²)及纯多酚施加量(0, 40, 80 kg/hm²)4 因素 3 水平的秸秆还田培养试验。采用 L₉(3⁴)正交表进行试验设计,加空白对照,共 10 个处理,每个处理设 6 个重复。供试秸秆为自然风干的小麦秸秆,含水量为 11.13%,按照试验设计将小麦秸秆剪成不同长度;供试氮肥为普通尿素(N 460 g/kg);所用多酚分子量在 300~370(纯度 95%)。根据试验装置的面积、秸秆含水量以及尿素、多酚的纯度,换算各处理不同试验因素的实际施用量,具体试验设计见表 1。试验土壤是采自山东省兰陵县 0—20 cm 的耕作层土壤。土壤采回后挑出石块、植物根系等杂物,自然风干后过 2 mm 筛备用,土壤容重为 1.30 g/cm³,土壤有机质、全氮、全磷含量分别为 8.09, 0.70, 0.31 g/kg,土壤胡敏酸、富里酸、胡敏素含量分别为 0.67, 2.79, 1.24 g/kg。

表 1 试验处理

处理	秸秆 长度/cm	风干秸秆量/ (g · m ⁻²)	尿素量/ (g · m ⁻²)	多酚量/ (g · m ⁻²)
1	2	4.58	0.47	0
2	5	4.58	0.66	0.10
3	8	4.58	0.84	0.19
4	8	9.19	0.47	0.10
5	2	9.19	0.66	0.19
6	5	9.19	0.84	0
7	5	18.33	0.47	0.19
8	8	18.33	0.66	0
9	2	18.33	0.84	0.10
CK	0	0	0	0

1.2 试验方法

1.2.1 秸秆还田培养试验 采用双环 PVC 桶进行秸秆还田培养试验(图 1),外环(a)直径为 25.40 cm;内环(b)直径为 16.10 cm,高 11.40 cm,体积为 2 300 cm³,桶底部打孔便于土壤水分下渗。试验填装容重为耕层土壤容重 1.30 g/cm³。将尿素和多酚溶于 500 mL 水中,在土壤和秸秆的搅拌过程中进行喷施,以保证混入均匀性。混匀后将样品填装于 PVC 桶内环(b)中,a、b 两环之间填装原始土作为缓冲以更好地模拟真实土壤环境,避免内环样品温度和水分急剧变化。填装完成后置于露天地块中进行培养。试验于 2020 年 6 月布设,2020 年 10 月培养试验结束,进行土壤侵蚀阻力及土壤初始含水量、容重等理化指标测定。

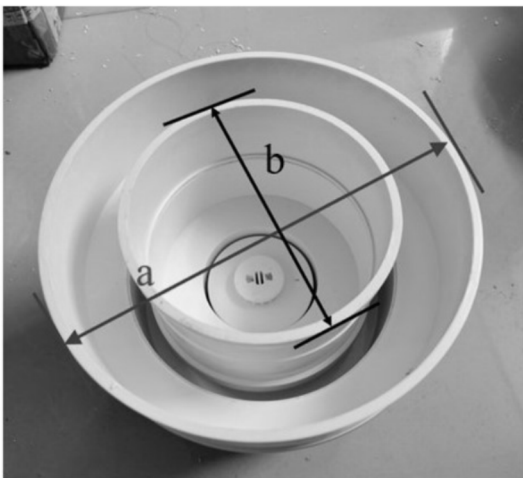


图 1 秸秆还田培养装置

1.2.2 土壤侵蚀阻力测定 为使测定样品水分条件一致,将培养装置的内环取出,在水中浸泡 48 h 后沥干 24 h,使土壤处于田间最大持水量状态,并用保鲜膜密封以避免土样水分蒸发。利用自制的 JET 土壤侵蚀阻力测定仪测定土壤可蚀性与土壤临界剪切力,每个处理取 3 个重复进行测定。该装置由测定装置(图 2A)和恒定水头供水装置(图 2B)组成。其中,测定装置包括圆形浸没槽(a)、喷头(b)和深度尺(c)。a 直径为 300 mm,高度为 300 mm,其底部居中位置设有排水阀(d)和排水管(e),用于设置自由下渗和非下渗两种土壤水文条件,并用于试验完成后排水和所冲刷物质。b 由外径为 63 mm,壁厚为 5 mm 的塑料管制成,出水直径为 6 mm;c 精度为 0.10 mm,用于读取冲刷深度数据。

土壤侵蚀阻力测定流程为:将样品放置于 a 中心,打开底部 d 设定为自由下渗条件。试验开始时打开进水阀(f),关闭阻挡片(g)至 b 下方阻断水流,当 b 被浸没后,开始冲刷。读数前关闭 g 阻断水流冲刷土壤,下调 c,利用 c(末端直径同 b 出水直径)将喷嘴

堵住;然后打开 g,继续下调 c 至土壤表面,读取深度值;读数结束后,上调 c 至末端与喷嘴平齐,关闭 g 后继续上调 c 约 5 cm,等待 b 被浸没后进行下一次冲刷与读数。按照冲刷深度变化速度来控制读数间隔,变化速度越慢读数间隔越大,当测定深度为 80 mm 左右,且连续 3 次测的深度无明显变化时停止冲刷。

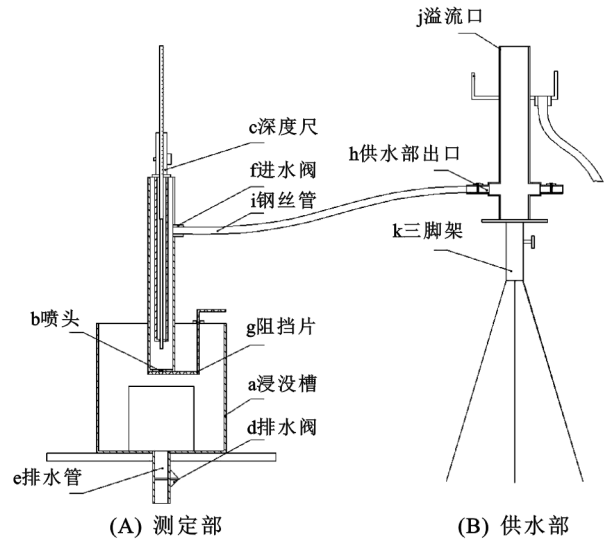


图 2 JET 土壤侵蚀阻力测定仪

根据记录的冲刷深度和时间序列之间的关系确定冲刷平衡深度,使用迭代解法计算土壤可蚀性 K_d (cm³/N·s)和土壤临界剪切力 τ_c (Pa),其中, τ_c 是平衡冲刷深度的函数, K_d 是侵蚀深度速率的函数,具体计算方法见文献[19]。

1.2.3 土壤性质测定 每个处理剩余的 3 个重复用于测定土壤理化性质。采用容积为 100 cm³的环刀在内环土壤中取样,利用环刀浸水法测定土壤容重、土壤孔隙度、饱和含水量等土壤性质。环刀取样后,内环剩余土样自然风干后过 2 mm 筛,用于测定其他土壤性质。其中,初始土壤含水量采用烘干法测定;>0.25 mm 水稳性团聚体含量采用湿筛法测定;>0.25 mm 团聚体含量采用干筛法测定。

1.3 数据分析

在 Microsoft Excel 2019 中利用迭代解法计算土壤可蚀性和临界剪切力。在 SPSS 26.0 软件中进行一般线性分析、多元线性逐步回归分析和非线性拟合。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田对土壤临界剪切力的影响

从表 2 可以看出,各处理 τ_c 值没有显著差异($P > 0.05$)。与对照 CK 相比,各处理 τ_c 值均有不同程度的增加。处理 5(秸秆长度 2 cm,秸秆还田量 4 000 kg/hm²,纯氮量 140 kg/hm²,纯多酚量 80 kg/hm²)的 τ_c 值最大,为 2.05 Pa,处理 1(秸秆长度 2 cm,秸秆还田量 2 000 kg/hm²,纯氮量 100 kg/hm²,纯多酚量 0 kg/hm²)的最小,为 1.55 Pa,与 CK 相比分别增加

33.10%, 0.60%, 说明秸秆粉碎还田配施氮肥、多酚对 τ_c 的综合影响为正效应。

表2 土壤临界剪切力与土壤可蚀性的测定结果

处理	τ_c / Pa	K_d / (cm ³ · N ⁻¹ · s ⁻¹)
1	1.55 ± 0.07a	113.82 ± 6.02bc
2	1.98 ± 0.55a	114.76 ± 20.64b
3	1.63 ± 0.11a	169.31 ± 27.94a
4	1.67 ± 0.30a	86.92 ± 9.20bcd
5	2.05 ± 0.20a	155.48 ± 2.80a
6	1.74 ± 0.20a	101.31 ± 9.48bc
7	1.73 ± 0.32a	69.43 ± 4.49d
8	1.77 ± 0.29a	56.96 ± 30.59d
9	1.63 ± 0.21a	85.39 ± 7.18bcd
CK	1.54 ± 0.07a	83.31 ± 14.90cd

注:CK 为对照; τ_c 为土壤临界剪切力; K_d 为土壤可蚀性; 同列不同小写字母表示处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)。下同。

一般线性分析(表3)结果表明, 试验处理因素与 τ_c 线性关系不显著, 且各因素对 τ_c 的影响存在较大差异。其中, 纯氮量对 τ_c 影响显著 ($P < 0.05$), 贡献率为 21.07%; 秸秆还田量、秸秆长度和纯多酚量对 τ_c 影响不显著 ($P > 0.05$), 三者贡献率较低。

表3 试验因素对土壤临界剪切力和土壤可蚀性的线性分析

试验因素	τ_c			K_d		
	F 值	显著性	CT/%	F 值	显著性	CT/%
秸秆长度	0.29	0.75	-5.14	7.15	0.01	5.57
秸秆还田量	0.32	0.73	-4.99	56.91	0	50.61
纯氮量	3.88	0.04	21.07	10.08	0	8.21
多酚量	0.20	0.82	-5.84	27.33	0	23.84
误差	—	—	94.76	—	—	11.77
R^2		0.05			0.88	

从表4可以看出, 随秸秆长度、还田量与纯氮量的增加, τ_c 值呈现先增加后降低的趋势。当秸秆长度为 5 cm、秸秆还田量为 4 000 kg/hm²、纯氮量为 140 kg/hm² 时 τ_c 值最大, 其中纯氮量为 140 kg/hm² 时的 τ_c 值与其他 2 个水平下的 τ_c 值差异显著 ($P < 0.05$)。 τ_c 值随多酚量的增大而增加, 但变化不显著 ($P > 0.05$)。

2.2 秸秆还田对土壤可蚀性的影响

由表2可知, 秸秆粉碎还田后土壤可蚀性 K_d 发生明显变化, 处理2(秸秆长度 5 cm, 秸秆还田量 2 000 kg/hm², 纯氮量 140 kg/hm², 纯多酚量 40 kg/hm²), 处理3(秸秆长度 8 cm, 秸秆还田量 2 000 kg/hm², 纯氮量 180 kg/hm², 纯多酚量 80 kg/hm²), 处理5(秸秆长度 2 cm, 秸秆还田量 4 000 kg/hm², 纯氮量 140 kg/hm², 纯多酚量 80 kg/hm²) 的 K_d 值与 CK 相比差异显著 ($P < 0.05$)。处理3的 K_d 值最大, 较对照提高 103.20%; 处理8(秸秆长度 8 cm, 秸秆还田量 8 000 kg/hm², 纯氮量 140 kg/hm², 纯多酚量 0 kg/hm²) 最小, 较对照降低 31.63%。一般线性分析

(表3)结果显示, 试验处理因素能解释 88% 的 K_d 变化, 各因素对 K_d 的影响均达到显著水平 ($P < 0.05$)。其中, 秸秆还田量和纯多酚量对 K_d 的影响较大, 贡献率分别为 50.61% 和 23.84%; 纯氮量和秸秆长度的贡献率较低, 分别为 8.21% 和 5.57%。

从表4可以看出, 秸秆还田试验各因素水平对 K_d 的影响具有差异性。随秸秆长度增大, K_d 值先减小后增加, 秸秆长度为 5 cm 时 K_d 值最小。随还田量的增加, K_d 值不断减小, 秸秆还田量 2 000 kg/hm² 和 8 000 kg/hm² 的 K_d 值存在显著差异 ($P < 0.05$)。纯氮量和纯多酚量对 K_d 的影响趋势相似, 随纯氮量、纯多酚量增加, K_d 值不断增大。

2.3 土壤侵蚀阻力模拟与影响因素分析

以土壤容重(g/cm³)、土壤总孔隙度(%)、土壤饱和含水量(%)、土壤含水量(%)、>0.25 mm 团聚体含量(%)、>0.25 mm 水稳性团聚体含量(%) 6 个指标为输入量, 利用逐步多元回归分析(因子输入和剔除标准分别为 $P \leq 0.05$ 和 $P \geq 0.10$) 得到 K_d 拟合方程(公式1):

$$K_d = -313.54 - 32.30 \times a + 22.09 \times b$$

$$R^2 = 0.81 \quad P < 0.01 \quad N = 9 \quad (1)$$

式中: K_d 为土壤可蚀性 (cm³/N·s); a 为土壤饱和含水量(%); b 为土壤 >0.25 mm 团聚体含量(%)。土壤可蚀性回归方程(公式1)具有较高的决定系数 ($R^2 = 0.81$), 土壤饱和含水量和 >0.25 mm 团聚体含量可解释 K_d 81% 的变化。

多元逐步回归未能建立土壤性质指标与 τ_c 的拟合方程。非线性拟合表明土壤临界剪切力 τ_c 可用 >0.25 mm 水稳性团聚体含量和土壤可蚀性 K_d 进行模拟, 方程为:

$$\tau_c = 1.66 + e^{13.44 - 0.47 \times c + 0.04 \times K_d}$$

$$R^2 = 0.76 \quad P < 0.05 \quad N = 9 \quad (2)$$

式中: τ_c 为土壤临界剪切力 (Pa); c 为土壤 >0.25 mm 水稳性团聚体含量(%); K_d 为土壤可蚀性 (cm³/N·s)。公式2的决定系数为 0.76, 说明土壤 >0.25 mm 水稳性团聚体含量和 K_d 能够解释 τ_c 76% 的变化。

根据各试验因素 3 个水平对应的土壤饱和含水量、土壤 >0.25 mm 团聚体含量和 >0.25 mm 水稳性团聚体含量(表4), 可分析各因素对三者的影响。秸秆长度对土壤饱和含水量、>0.25 mm 团聚体含量和 >0.25 mm 水稳性团聚体的影响较小。秸秆还田量对土壤饱和含水量和 >0.25 mm 团聚体含量的影响相似, 均呈现先降低后增加的趋势, 在秸秆还田量为 4 000 kg/hm² 时最小, 而不同秸秆还田量下 >0.25 mm 水稳性团聚体含量变化幅度较小。随纯氮量的增加, 土壤饱和含水量和 >0.25 mm 团聚体含量逐渐

降低;当纯氮量为 140 kg/hm²时,>0.25 mm 水稳性团聚体含量显著($P < 0.05$)低于纯氮量为 100 kg/hm²和 180 kg/hm²时。多酚量增加时,土壤饱和含水量呈先增加后大幅度下降的趋势,>0.25 mm 团聚体含量不断增加,而>0.25 mm 水稳性团聚体含量呈先降低后增加的趋势。

3 讨论

秸秆粉碎还田配施氮肥、多酚使土壤可蚀性和临界剪切力发生不同程度的变化。与 CK 相比,各处理土壤临界剪切力均有所增加,但未达到显著水平($P > 0.05$),而处理 2、处理 3、处理 5 的土壤可蚀性与 CK 相比差异显著($P < 0.05$)(表 2)。秸秆长度、秸秆还田量、氮肥量、多酚量与土壤可蚀性在 $P < 0.05$ 水平上显著相关(表 3)。说明与土壤临界剪切力相比,土

壤可蚀性对秸秆粉碎还田的响应更为敏感。随秸秆还田量的增加,土壤可蚀性不断降低(表 4),这可能是由于秸秆还田量增加可提高外源有机质的输入量,有利于有机质的累积及团聚体的稳定^[7-8],从而增强土壤侵蚀阻力。随秸秆长度的增加土壤可蚀性先降低后增加(表 4),说明秸秆长度对土壤可蚀性的影响较为复杂:相同秸秆还田量下秸秆较短时,单位面积上的秸秆数量增多,与土壤交叉结合紧密,空隙较小,提高了土壤结构稳定性^[20],从而使土壤侵蚀阻力增加;而相同秸秆还田量下秸秆较长时,在土壤中占据的横截面较大,增大土壤孔隙,容易形成剪切脆弱面,破坏土壤的完整性^[21],土壤易于被侵蚀。此外,秸秆对水流的导流作用可使局部流速加快^[22],水流剪切力增大,从而加剧土壤侵蚀。

表 4 试验因素对土壤临界剪切力、土壤可蚀性、土壤饱和含水量、>0.25 mm 团聚体和>0.25 mm 水稳性团聚体含量的影响

试验因素	τ_c / Pa	$K_d / (\text{cm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	土壤饱和含水量/%	>0.25 mm 团聚体/%	>0.25 mm 水稳性团聚体/%	
秸秆长度	2 cm	1.74a	118.23a	45.72a	85.69a	46.19a
	5 cm	1.81a	95.17a	45.51a	85.75a	47.00a
	8 cm	1.69a	104.40a	45.24a	85.50a	45.80a
秸秆还田量	2000 kg/hm ²	1.72a	132.63a	45.37a	86.31a	46.61a
	4000 kg/hm ²	1.81a	114.57ab	44.58a	84.39b	46.71a
	8000 kg/hm ²	1.71a	70.59b	46.83a	86.25a	45.68a
氮肥量	100 kg/hm ²	1.65b	90.06a	46.50a	86.03a	49.10a
	140 kg/hm ²	1.93a	109.06a	45.74a	86.00a	41.04b
	180 kg/hm ²	1.67b	118.67a	44.54a	84.91a	48.85a
多酚量	0 kg/hm ²	1.69a	90.70a	45.84a	85.29a	46.30a
	40 kg/hm ²	1.76a	95.69a	46.04a	85.80a	44.50a
	80 kg/hm ²	1.80a	131.41a	44.90a	85.86a	48.19a

秸秆还田配施氮肥是一种有效的耕作管理措施,能够降低土壤容重,提高土壤总孔隙度,有利于提高土壤稳定性^[10]。但本研究结果显示,随氮肥量的增加,土壤容重增大,总孔隙度降低,土壤可蚀性增加(表 4)。这可能是由于秸秆还田配施氮肥会降低土壤 C/N,促进土壤内外源有机碳的分解,且随施氮量的增加分解程度提高,导致土壤残留秸秆碳不能完全补偿因激发效应导致的土壤有机碳(SOC)损失,造成 SOC 库净亏损^[23]。土壤有机质含量降低可使容重增加,且不利于团聚体的形成和稳定性的提高^[24],从而导致土壤可蚀性增加。随多酚量的增加土壤可蚀性增大(表 4),>0.25 mm 团聚体含量也随之增加(表 4),且由公式 1 可知土壤可蚀性与>0.25 mm 团聚体含量呈正相关。这可能是由于添加多酚后,土壤微生物活性提高加快秸秆分解。秸秆分解形成的有机质具有迅速稳定的瞬时胶结作用,可将微团聚体

(<0.25 mm)或土壤单粒胶结形成大团聚体(>0.25 mm)。但由瞬时或暂时胶结介质形成的大团聚体,内聚力小,稳定性差,在侵蚀过程中易于破碎与剥离^[25],从而导致土壤可蚀性增加。随还田时间延长,有机质稳定性与团聚体稳定性可能会提高,从而使土壤可蚀性减小。

土壤可蚀性和临界剪切力是表征土壤抵抗集中径流侵蚀能力最常用的 2 个参数,利用易于测量的土壤理化性质实现对二者准确预测是土壤侵蚀研究的重要内容。Liu 等^[26]研究表明,土壤可蚀性是土壤临界剪切力、黏粒和孔隙比的指数函数;Li 等^[27]研究发现,不同土地利用下,土壤可蚀性与土壤粉粒含量、土壤黏结力和水稳性团聚体呈较好的幂函数关系;孙龙^[7]研究枯落物对土壤侵蚀阻力的影响时发现,土壤可蚀性可通过水稳性团聚体和枯落物密度模拟,土壤临界剪切力的变化仅能通过表土中的枯落物密度进

行解释。本研究结果表明,土壤可蚀性与土壤饱和含水量和 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体含量之间存在较好的线性关系($R^2=0.81, P<0.01$),土壤临界剪切力可通过土壤 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体和土壤可蚀性进行模拟($R^2=0.76, P<0.05$)。不同的拟合关系式表明,影响土壤可蚀性的因素或过程不一定对土壤临界剪切力产生影响,反之亦然。

利用JET测定土壤侵蚀阻力时要求土样具有较好的均匀性、测定时间尽可能最大化,且射流用于土壤分离的剪切力受土壤表面粗糙度、水涮窝形状等影响,这些缺点会增加测定值的不确定性^[28]。目前最常用的JET数据分析方法是基于平衡冲刷深度的迭代解法、Blaisdell法等,但在同样的冲刷深度下,水涮窝形状与侵蚀土壤体积的差异可影响土壤侵蚀阻力^[29]。为此,Rose等^[29-30]提出了通过被射流侵蚀的土壤质量、体积和冲刷深度来评估土壤抗侵蚀参数 J (J/kg),即侵蚀单位质量土壤所需的能量。农田土壤中作物根系、凋落物、秸秆及砾石等会对土壤表面粗糙度及土壤结构产生影响,导致土壤侵蚀阻力发生变化^[7],而本试验测定土样中无植被生长,因此大田情形下土壤侵蚀阻力对秸秆还田的响应机制有待进一步研究。此外,本试验从秸秆还田至测试分析时间较短,只经过一个玉米生长季,仅能反映小麦秸秆还田对当季玉米地土壤侵蚀阻力的影响,连续秸秆还田情形下多季土壤侵蚀阻力变化过程还需深入研究。

4 结论

(1)与对照相比,秸秆粉碎还田配施氮肥、多酚对土壤临界剪切力的综合影响为正效应。氮肥量对土壤临界剪切力影响显著($P<0.05$),随氮肥量增加,土壤临界剪切力先增加后降低。

(2)土壤可蚀性变化范围为 $56.96\sim 169.31\text{ cm}^3/\text{N}\cdot\text{s}$ 。秸秆还田量贡献率最高为 50.61% ,随还田量增加土壤可蚀性降低,随秸秆长度增加土壤可蚀性先增加后降低,随氮肥量、多酚量增加土壤可蚀性增加。

(3)土壤可蚀性与土壤饱和含水量、 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体含量间存在较好的线性关系($R^2=0.81, P<0.01$)。用土壤 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量和土壤可蚀性能较好地模拟土壤临界剪切力的动态变化($R^2=0.76, P<0.05$)。

参考文献:

[1] 刘强,穆兴民,高鹏,等.土壤水力侵蚀对土壤质量理化指标影响的研究综述[J].水土保持研究,2020,27(6):386-392.

[2] 张冠华,胡甲均.径流驱动土壤分离过程的影响因素及

机制研究进展[J].水科学进展,2019,30(2):294-304.

- [3] Singh H V, Thompson A M. Effect of antecedent soil moisture content on soil critical shear stress in agricultural watersheds[J].Geoderma,2016,262:165-173.
- [4] 魏慧,赵文武,王晶.土壤可蚀性研究述评[J].应用生态学报,2017,28(8):2749-2759.
- [5] Huang X L, Cheng L L, Chien H P, et al. Sustainability of returning wheat straw to field in Hebei, Shandong and Jiangsu provinces: A contingent valuation method [J].Journal of Cleaner Production,2019,213:1290-1298.
- [6] 王增丽.秸秆不同处理还田方式对土壤理化特性和作物生长效应的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [7] 孙龙.枯落物对土壤分离过程的影响及其季节变化特征[D].陕西 杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2016.
- [8] Rahmati M, Eskandari I, Kousehrou M, et al. Changes in soil organic carbon fractions and residence time five years after implementing conventional and conservation tillage practices[J/OL].Soil and Tillage Research,2020,200. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104632>.
- [9] Wang X J, Jia Z K, Liang L Y, et al. Maize straw effects on soil aggregation and other properties in arid land[J].Soil and Tillage Research,2015,153:131-136.
- [10] Zhang Y J, Wang S L, Wang H, et al. The effects of rotating conservation tillage with conventional tillage on soil properties and grain yields in winter wheat-spring maize rotations[J].Agricultural and Forest Meteorology,2018,263:107-117.
- [11] Neizah A D, Wakindiki I I C. Physical indicators of soil erosion, aggregate stability and erodibility[J].Archives of Agronomy and Soil Science,2015,61(6):827-842.
- [12] Sun L, Zhang G H, Luan L L, et al. Temporal variation in soil resistance to flowing water erosion for soil incorporated with plant litters in the Loess Plateau of China[J].Catena,2016,145:239-245.
- [13] Kalkhajah Y K, He Z, Yang X R, et al. Co-application of nitrogen and straw-decomposing microbial inoculant enhanced wheat straw decomposition and rice yield in a paddy soil [J]. Journal of Agriculture and Food Research,2021,4.
- [14] 吴鹏年,王艳丽,李培富,等.滴灌条件下秸秆还田配施氮肥对宁夏扬黄灌区春玉米产量和土壤理化性质的影响[J].应用生态学报,2019,30(12):4177-4185.
- [15] 马露洋.黄土丘陵区长期施肥对坡耕地土壤质量及农田系统可持续性的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [16] Suseela V, Alpert P, Nakatsu C H, et al. Plant-soil interactions regulate the identity of soil carbon in invaded ecosystems: Implication for legacy effects [J].

- Functional Ecology, 2016, 30(7):1227-1238.
- [17] Schmidt M A, Kreinberg A J, Gonzalez J M, et al. Soil microbial communities respond differently to three chemically defined polyphenols [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2013, 72:190-197.
- [18] Kuppusamy S, Thavamani P, Megharaj M, et al. Bioremediation potential of natural polyphenol rich green wastes: A review of current research and recommendations for future directions [J]. Environmental Technology and Innovation, 2015, 4:17-28.
- [19] Hanson G J, Cook K R. Development of excess shear stress parameters for circular jet testing[C]. American Society of Agricultural and Biological Engineers. ASAE Paper No. 97-2227, St. Joseph, MI, USA, 1997:18.
- [20] Foster G R, Johnson C B, Moldenhauer W C. Hydraulics of failure of unanchored cornstalk and wheat straw mulches for erosion control[J]. 1982, 25(4):940-947.
- [21] 林琳, 张程程, 王恩姮. 秸秆长度对黑土力学特征的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(5):128-134.
- [22] 李朝栋, 李占斌, 马建业, 等. 不同长度小麦秸秆覆盖下黄土耕地坡面流水动力学特性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4):153-160.
- [23] 孙昭安, 张轩, 胡正江, 等. 秸秆与氮肥配比对农田土壤内外源碳释放的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(1):459-466.
- [24] Wang J G, Feng S Y, Ni A M, et al. Soil detachment by overland flow on hillslopes with permanent gullies in the Granite area of southeast China[J/OL]. Catena, 2019, 183. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104235>.
- [25] Six J, Bossuyt H, Degryze S. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 79(1):7-31.
- [26] Liu Q J, Wells R R, Dabney S M, et al. Effect of water potential and void ratio on erodibility for agricultural soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2017, 81(3):622-632.
- [27] Li Z W, Zhang G H, Geng R, et al. Rill erodibility as influenced by soil and land use in a small watershed of the Loess Plateau, China[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129:248-257.
- [28] Karamigolbaghi M, Ghaneezad S M, Atkinson J F, et al. Critical assessment of jet erosion test methodologies for cohesive soil and sediment [J]. Geomorphology, 2017, 295:529-536.
- [29] Rose C W, Olley J M, Haddadchi A, et al. An alternative method for interpreting jet erosion test (JET) data: Part 1. Theory[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2018, 43(3):735-742.
- [30] Haddadchi A, Rose C W, Olley J M, et al. An alternative method for interpreting JET erosion test (JET) data: Part 2. Application[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2018, 43(3):743-754.
- (上接第 121 页)
- [35] Su C H, Dong M, Fu B J, et al. Scale effects of sediment retention, water yield, and net primary production: A case study of the Chinese Loess Plateau[J]. Land Degradation and Development, 2020, 31(11):1408-1421.
- [36] 戴尔阜, 王亚慧. 横断山区产水服务空间异质性及归因分析[J]. 地理学报, 2020, 75(3):607-619.
- [37] Carlucci M B, Brancalion P H S, Rodrigues R R, et al. Functional traits and ecosystem services in ecological restoration[J]. Restoration Ecology, 2020, 28(6):1372-1383.
- [38] 郝梦雅, 任志远, 孙艺杰, 等. 关中盆地生态系统服务的权衡与协同关系动态分析[J]. 地理研究, 2017, 36(3):592-602.
- [39] Wen X, Zhen L. Soil erosion control practices in the Chinese Loess Plateau: A systematic review[J]. Environmental Development, 2020, 34:100493.
- [40] Hao R F, Yu D Y, Wu J G. Relationship between paired ecosystem services in the grassland and agro-pastoral transitional zone of China using the constraint line method[J]. Ecosystems and Environment, 2017, 240:171-181.
- [41] Wang J T, Peng J, Zhao M Y, et al. Significant trade-off for the impact of Grain-for-Green Programme on ecosystem services in North-western Yunnan, China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 574:57-64.
- [42] Wang C, Wang S, Fu B J, et al. Precipitation gradient determines the tradeoff between soil moisture and soil organic carbon, total nitrogen, and species richness in the Loess Plateau, China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 575:1538-1545.