

黑土坡耕地秸秆还田方式对土壤团聚体稳定性的影响

刘峥宇¹, 时妍², 李润芳³, 陈佳琦^{4,5}, 邱广伟⁶, 王怀鹏⁶, 李明⁶, 李玉梅⁴

(1. 黑龙江北大荒现代农业服务集团有限公司宝泉岭分公司, 黑龙江 佳木斯 154211;

2. 北大荒农业股份有限公司绥滨分公司, 黑龙江 绥滨 154213; 3. 哈尔滨师范大学 生命学院,

黑龙江 哈尔滨 150500; 4. 黑龙江八一农垦大学 农学院, 黑龙江 大庆 163000; 5. 黑龙江省黑土保护利用研究院, 黑龙江 哈尔滨 150086; 6. 黑龙江省农业科学院克山分院, 黑龙江 克山 161600)

摘要: [目的] 探讨秸秆还田方式对土壤结构性状及有机碳与团聚体稳定性之间的关系, 为黑土区坡耕地实施合理侵蚀防控技术提供理论依据。[方法] 模拟自然条件下土壤团聚体破碎机制, 分析秸秆还田下团聚体稳定性的变化。[结果] 不同秸秆还田方式下土壤团聚体稳定性的变化因破碎机制和还田方式而变化, 快速湿润是黑土团聚体破碎最主要的机制。快速湿润与湿润震荡机制下 <2 mm 和 2~5 mm 团聚体平均重量直径(MWD)值差异显著, 湿润震荡 2~5 mm 团聚体稳定性最高, 表明黑土中大粒径团聚体稳定性较高, 且大粒径团聚体稳定性与土壤有机碳呈正相关。湿润震荡 <2 mm 粒径团聚体与土壤容重和毛管孔隙呈显著正相关, 与总孔隙度、非毛管孔隙呈显著负相关。[结论] 短期内, 秸秆覆盖处理因土壤容重和孔隙度等非生物因素可能掩盖秸秆覆盖地表对侵蚀防控的效果从而影响团聚体稳定性, 而秸秆碎混还田土壤总孔隙度与非毛管孔隙度降低, 团聚体稳定性有增强趋势。

关键词: 黑土; 坡耕地; 秸秆还田; 团聚体

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)03-0205-08

中图分类号: S157.4

文献参数: 刘峥宇, 时妍, 李润芳, 等. 黑土坡耕地秸秆还田方式对土壤团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 205-212. Liu Zhengyu, Shi Yan, Li Runfang, et al. Effects of straw return methods on soil aggregate stability in sloping farmland of black soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 205-212. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.040; CSTR:32312.14.stbctb.2025.03.040.

Effects of straw return methods on soil aggregate stability in sloping farmland of black soil

Liu Zhengyu¹, Shi Yan², Li Runfang³, Chen Jiaqi^{4,5}, Qiu Guangwei⁶, Wang Huaipeng⁶, Li Ming⁶, Li Yumei⁴

(1. Bao Quanling Branch of Heilongjiang Beidahuang Modern Agricultural Service Co. Ltd.,

Jiamusi, Heilongjiang 154211, China; 2. Suibin Branch of Beidahuang Agriculture Co., Ltd., Suibin,

Heilongjiang 154213, China; 3. College of Life Sciences, Harbin Normal University, Harbin, Heilongjiang

150500, China; 4. College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang

163000; 5. Heilongjiang Black Soil Conservation and Utilization Research Institute, Harbin, Heilongjiang 150086,

China; 6. Keshan Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Keshan, Heilongjiang 161600, China)

Abstract: [Objective] The effects of different straw return methods on soil structural properties and the relationship between organic carbon and aggregate stability were investigated, in order to provide a theoretical basis for implementing effective erosion control techniques on sloping farmlands in black soil regions. [Methods] Natural soil aggregate breakdown mechanisms were simulated to analyze changes in aggregate stability under straw return practices. [Results] The stability of soil aggregates varied depending on the breakdown mechanism and straw return method. Rapid wetting was identified as the primary mechanism for aggregate breakdown in black

收稿日期: 2025-01-13

修回日期: 2025-03-03

采用日期: 2025-03-03

资助项目: 国家重点研发计划项目“坡耕地侵蚀阻控等高带状种植型梨树模式研发与示范”(2022YFD1500704), “黑土地土壤有机质和产能协同提升的绿色栽培模式与应用”(2022YFD1500305)

第一作者: 刘峥宇(1988—), 男(汉族), 山东省莱州市人, 硕士, 高级农艺师, 主要从事农业技术推广方面的工作。Email: 120005171@qq.com。

通信作者: 李玉梅(1971—), 女(汉族), 四川省射洪市人, 博士, 研究员, 主要从事土壤培肥方面的研究。Email: liyumeiwxyl@126.com。

soil. Significant differences in mean weight diameter were observed for <2 mm and 2—5 mm aggregates under rapid wetting and wet shaking mechanisms. The 2—5 mm aggregates under wet shaking exhibited the highest stability, indicating that larger aggregates in black soil were more stable and positively correlated with soil organic carbon. For <2 mm aggregates under wet shaking, stability was significantly positively correlated with soil bulk density and capillary porosity but negatively correlated with total porosity and non-capillary porosity. [Conclusion] In the short term, straw mulching may obscure its erosion control effects due to abiotic factors such as soil bulk density and porosity, thereby influencing aggregate stability. In contrast, straw incorporation reduces the total porosity and non-capillary porosity while tending to enhance aggregate stability.

Keywords: black soil; sloping farmland; straw returning; aggregates

水力侵蚀是世界上分布最广、造成危害最多的土壤侵蚀类型。东北黑土区为典型漫川漫岗地貌,坡长坡缓地形在降雨集中的夏季遇强降雨或降雨量较大时易形成汇流,增加汇水面积,导致旱作农田水土流失,加速黑土层变薄^[1-3],土壤侵蚀是黑土退化的主导因素^[4]。土壤团聚体是土壤结构最基本的单元,粒径不同团聚体在降雨过程中稳定性差异显著,土壤侵蚀的发生与土壤团聚体破碎密切相关。自然条件下,土壤团聚体破碎的机制包括快速湿润条件下团聚体中空气压缩产生的应力引起的破碎,土壤矿物湿润后非均匀膨胀引起的破裂以及雨滴打击和耕作等外力机械作用引起的破碎^[5]。不稳定团聚体在这些外界应力的作用下,产生可移动的更小的颗粒,一方面可在土壤表面形成结壳,加剧地表径流和土壤侵蚀,另一方面破坏土壤水热传输和养分保持供应过程,导致土壤养分流失和水体富营养化^[6-7]。

土地利用类型、耕作及秸秆还田等农业措施通过改变植被覆盖、地表形态、土壤理化性质影响坡耕地侵蚀的发生发展过程^[5,7]。土壤颗粒级配状况决定溅蚀特征,细砂易被雨滴击溅,而粗砂则相反^[8]。侵蚀红壤裸地在植被恢复过程中,提高土壤有机碳可促进土壤团聚体的形成从而提高其稳定性^[9]。黄土高坡地带增加秸秆覆盖坡长可增加雨水入渗和降低坡面产沙量^[10],但也有研究认为,黑土坡地土壤容重增加后秸秆覆盖的阻控侵蚀作用难以体现^[11]。团聚体稳定性是反映土壤抗蚀性的重要因素^[12],利用典型黑土坡耕地研究土壤团聚体稳定性,初步明确不同秸秆还田方式下团聚体稳定性与土壤结构及有机质的关系,为黑土区坡耕地实施科学的土壤侵蚀防控技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于黑龙江省克山县克山镇($47^{\circ}50'N$, $125^{\circ}10'E$),小兴安岭南麓与松嫩平原的过渡地带松嫩平原北部。该地区北部、中部为丘陵漫岗区,地

形总体趋势东北部较高、西南部偏低,地势从东北向西南倾斜 $2^{\circ}\sim 6^{\circ}$,丘陵漫岗地占 80%,平原区占 14%。中温带大陆季风气候,年平均气温 $2.4^{\circ}C$,有效积温 $2400^{\circ}C$,无霜期 122 d 左右。雨热同季,降雨集中在 6—8 月,年平均降水量 500 mm 左右,年平均风速 4 m/s。由于受蒙古低气压影响,每年 4 月上旬至 6 月上旬和 9 月下旬多大风天气,最大风力可达 8 级。土壤类型为典型黑土,坡向为东北向,坡度 3.2° 。土壤基础养分含量:全氮 1.96 g/kg,碱解氮 153.70 mg/kg,速效磷 52.90 mg/kg,土壤有机碳 24.05 mg/kg, pH 值 5.50。土壤机械组成:砂粒 5%,粉粒 55%,黏粒 40%。

1.2 试验设计

试验于 2021—2024 年进行,种植作物玉米,共设置 4 个处理:顺坡秸秆翻耕还田 25 cm 以下(DTS)、顺坡秸秆碎混还田 0—20 cm(MTS)、顺坡秸秆覆盖地表(NTS)、横坡秸秆覆盖地表(C-NTS)。每年秋季玉米采用联合收割机收获后进行如下处理:①秸秆翻耕还田。利用秸秆打茬机先将秸秆粉碎至长度小于 10 cm,然后用 150 马力大型机械带动翻转犁将秸秆翻埋于 20 cm 以下土层,镇压、起垄至待播种状态;②秸秆碎混还田。利用秸秆打茬机先将秸秆粉碎至长度小于 10 cm,然后利用重型耙和深松铲等设备将秸秆及根茬打碎旋耕入 0—20 cm 土层,镇压、起垄至待播种状态。秸秆翻耕还田与碎混还田处理均为 65 cm 均匀垄,垄上播种 1 行玉米。③秸秆覆盖还田。参照“梨树模式”中秸秆还田方式,采用一体式整地机,通过前置集行器将秸秆清扫归行到 90 cm 行间,后置整形设备将 40 cm 行间 0—15 cm 土层进行旋耕耙平至待播种状态。秸秆覆盖还田设置顺坡与横坡两个方向,均为 40—90 cm 宽窄行模式,窄行为双行播种带,宽行为秸秆覆盖带,播种带和还田带第二年实行交替轮换。④小区面积为 260 m^2 ,每处理设 3 次重复。供试玉米品种为克玉 9 号,底肥为玉米专用肥,用量 500 kg/hm^2 ,追肥为尿素(N 46%),用量 300 kg/hm^2 ,其他田间管理措施一致。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 样品采集 于2024年秋季按照分层采集0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm土样放置铝盒中带回测土壤团聚体,每个小区采集5点均匀混合为1个样品,3次重复;在0—20 cm耕层的5—15 cm土层处进行取样,测土壤容重、饱和含水量、总孔隙度及有机质、全氮等指标。

1.3.2 测定方法 土壤有机碳和全氮测定采用常规方法^[13];土壤团聚体稳定性分析采用Le Bissonais法^[14]:首先将干筛法筛出的<2 mm, 2~5 mm二级团聚体置于40℃的烘箱内烘24 h使团聚体土壤含水量一致后进行以下两种处理:①快速湿润(fast wetting, FW),取5 g团聚体浸没在盛有50 ml去离子水的250 ml烧杯中10 min后用移液管把水吸掉;②预湿润后震荡(wet stirring WS),取5 g团聚体浸没在盛有50 ml酒精(95%)的250 ml锥形瓶中10 min后,用移液管吸掉酒精,然后加水至200 ml,用橡皮塞把锥形瓶塞紧上下颠倒20次,静置30 min使粗分散体沉淀,用吸管吸去多余的水;其次,将已湿润处理的土壤移到浸没在酒精中的50 μm孔径筛子中,上下震荡20次(幅度2 cm);再把筛子放入40℃烘箱至酒精蒸发完,最后将土壤移至已编号称重的铝盒中,在40℃下烘干称重。将烘干土壤通过一组孔径依次为3, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.1和0.053 mm的筛子称重得到每个粒级

的破碎团聚体。

1.4 数据处理

团聚体稳定性一般采用平均重量直径(MWD)表示:

$$MWD=\sum_{i=1}^n W_i \cdot X_i / \sum_{i=1}^n W_i \tag{1}$$

式中: X_i 为聚集在每个尺寸筛子的土壤团聚体平均直径(mm); W_i 为该粒径范围内土壤团聚体百分含量(%); n 为分离出的团聚体份数; i 为第*i*个团聚体。

为了比较不同粒级团聚体的稳定性,引用标准化平均当量直径(NMWD):

$$NMWD=MWD/X_{\max}-X_{\min} \tag{2}$$

采用Excel 2017软件处理数据和绘图,通过SPSS 25.0进行不同处理间差异显著性分析($p<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同秸秆还田方式下土壤基本理化指标

秸秆还田方式影响土壤基础理化性状。由表1可见,秸秆翻耕还田(DTS)降低了土壤容重,增加了土壤含水量、饱和含水量和总孔隙度,而秸秆碎混还田(MTS)土壤容重虽有增加,但非毛管孔隙度较高;顺坡覆盖(NTS)与横坡覆盖(CNTS)处理对土壤容重、饱和含水量及总孔隙度影响无显著差异,横坡覆盖处理土壤有机质与全氮含量出现降低,但总体来说,不同秸秆还田方式对土壤C/N值影响不大。

表 1 不同秸秆还田方式下土壤基本理化指标

Table 1 Soil basic physical and chemical indicators under different straw returning methods

处理	容重/ (g·cm ⁻³)	含水量/ %	饱和含 水量/%	总孔隙度/ %	非毛管孔 隙/%	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	C/N
DTS	1.33 ^c	22.04 ^a	36.22 ^a	48.84 ^a	19.53 ^a	38.82 ^a	1.91 ^a	11.79 ^a
MTS	1.45 ^b	16.79 ^c	29.08 ^b	44.23 ^b	19.88 ^a	35.71 ^{bc}	1.74 ^{ab}	11.90 ^a
NTS	1.52 ^a	18.98 ^b	30.57 ^b	41.54 ^{bc}	12.69 ^c	37.10 ^{ab}	1.77 ^{ab}	12.106 ^a
CNTS	1.48 ^{ab}	17.93 ^b	28.96 ^b	43.07 ^b	16.54 ^b	33.70 ^c	1.65 ^b	11.85 ^a

注:①DTS为顺坡秸秆翻耕还田;MTS为顺坡秸秆碎混还田;NTS为顺坡秸秆覆盖地表;CNTS为横坡秸秆覆盖。②不同小写字母表示差异显著性($p<0.05$)。下同。

2.2 不同破碎机制团聚体分散后粒径分布

2.2.1 快速湿润处理团聚体分散后粒径分布 由图1可以看出,<2 mm粒径团聚体经快速湿润后分离获得0.25~2 mm, 0.053~0.25 mm和<0.053 mm粒径团聚体平均比例为50.74%, 42.12%和7.14%。各处理对10—30 cm土层分离获得的0.25~2 mm, 0.053~0.25 mm粒径团聚体及0—10 cm和20—30 cm土层获得的<0.053 mm粒径团聚体均无显著影响;与顺坡覆盖比较,秸秆碎混还田增加0—10 cm土层0.25~2 mm粒径比例,而横坡覆盖增加了20—30 cm

土层<0.053 mm粒径比例,与秸秆翻耕还田和碎混还田处理差异显著($p<0.05$)。

由图2可以看出,2~5 mm粒径团聚体经快速湿润后获得的0.25~2 mm, 0.053~0.25 mm及<0.053 mm, >2 mm粒径团聚体平均比例为64.61%, 28.18%和5.24%, 1.97%。

各处理对0—20 cm和10—20 cm土层2—5 mm粒径团聚体经快速湿润后获得的>2 mm粒径及0.25~2 mm粒径团聚体影响差异不显著;顺坡覆盖降低了0—10 cm土层0.25~2 mm比例,增加了0—

20 cm 土层 0.053~0.25 mm 及 <0.053 mm 比例,与秸秆翻耕还田和碎混还田差异显著($p<0.05$),团聚体

稳定性呈降低趋势;与横坡覆盖比较,顺坡覆盖也增加了 <0.053 mm 粒径比例。

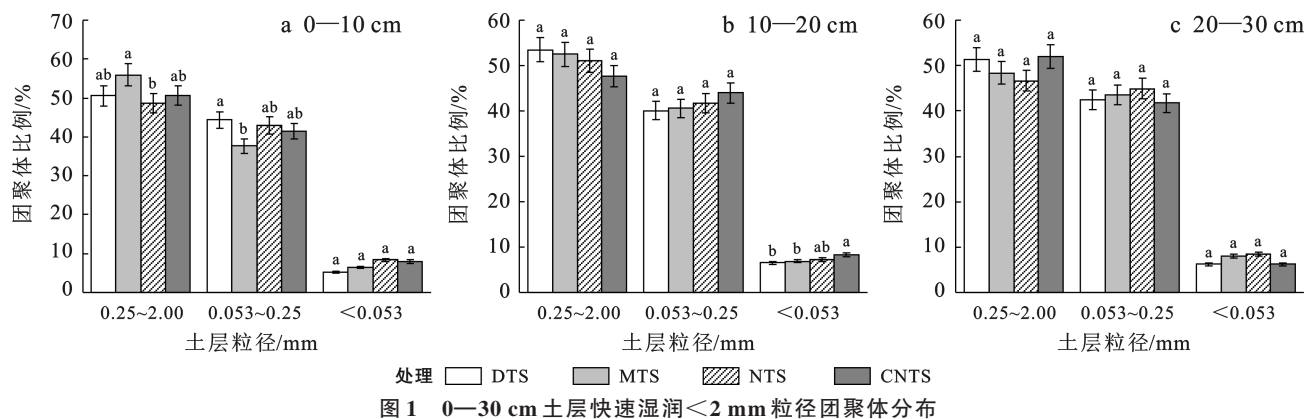


Fig.1 Distribution of <2 mm particle size aggregates in 0—30 cm soil layer during fast wetting

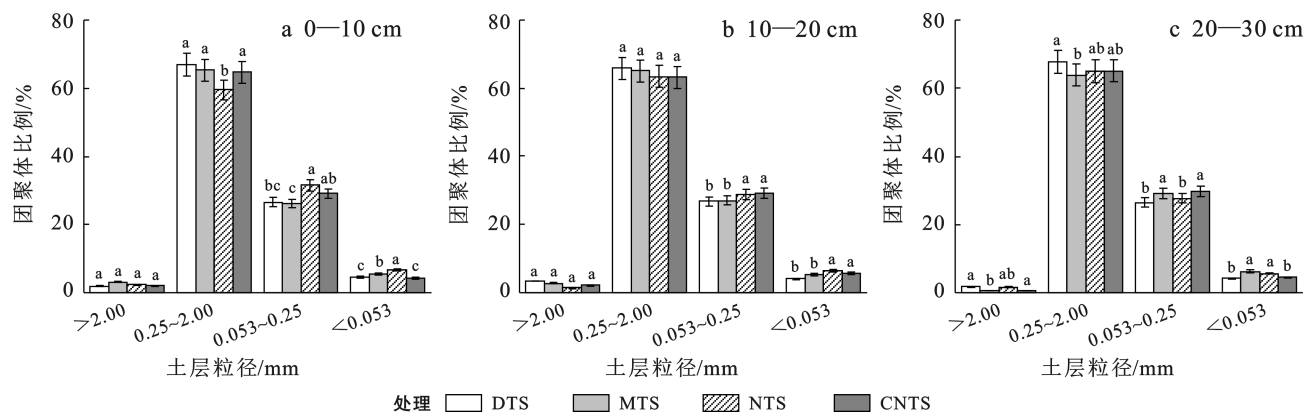


Fig.2 Distribution of 2~5 mm particle size aggregates in 0—30 cm soil layer after fast wetting

2.2.2 湿润震荡处理团聚体分散后粒径分布 由图 3 可知, <2 mm 粒径团聚体经湿润震荡后分离获得 0.25~2 mm, 0.053~0.25 mm 和 <0.053 mm 粒径团聚体平均比例分别为 78.02%, 18.56% 和 3.36%。各处理对 0—10 cm 土层分离获得的 <0.053 mm 及

10—30 cm 土层获得的 0.25~2 mm, 0.053~0.25 mm 和 <0.053 mm 粒径均无显著影响;与翻耕还田比较, 秸秆碎混还田处理 0—10 cm 土层 0.25~2 mm 粒径比例增加, 0.053~0.25 mm 粒径比例下降, 差异显著($p<0.05$), 团聚体稳定性表现为增强趋势。

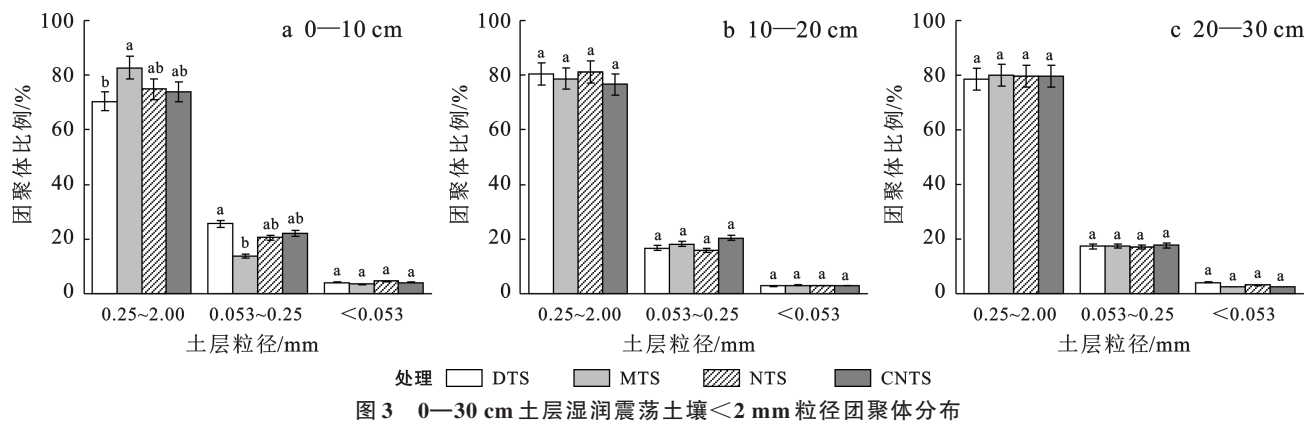


Fig.3 Distribution of <2 mm particle size aggregates in 0—30 cm soil layer after wet stirring

由图 4 可知, 2~5 mm 粒径团聚体经湿润震荡分离获得的 0.25~2 mm, 0.053~0.25 mm 及 >2 mm,

<0.053 mm 粒径团聚体平均比例分别为 79.22%, 10.65% 和 8.10%, 2.04%。各处理对 10—30 cm 土层

2~5 mm 粒径团聚体湿润震荡获得的>2 mm,0.25~2 mm 及<0.053 mm 粒径团聚体及 0—10 cm 土层 0.25~2 mm 粒径团聚体影响不大,差异不显著。覆盖处理土壤团聚体稳定性表现为降低趋势,MWD 值和 NMWD 值与深翻还田和碎混还田处理差异显著($p<0.05$)。

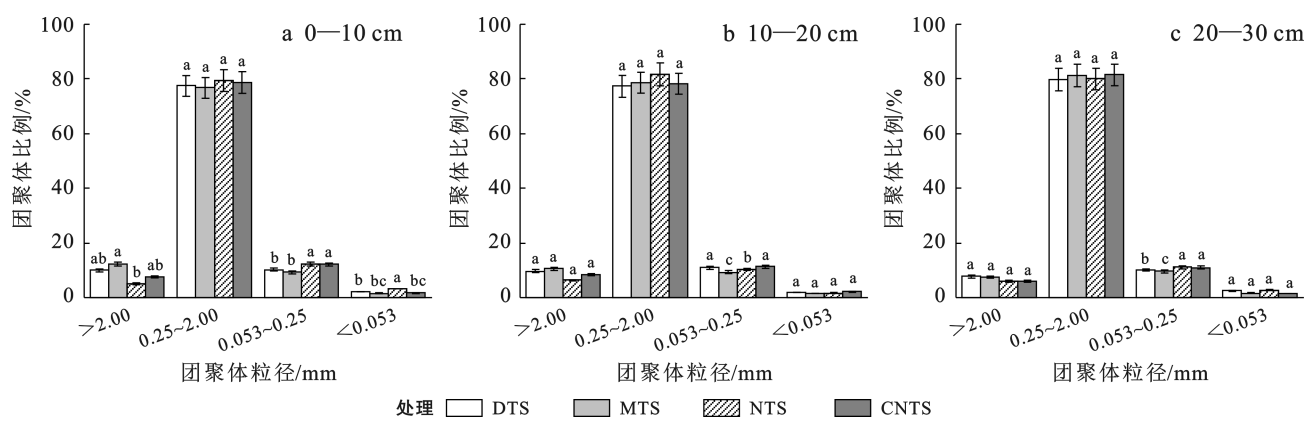


图 4 0—30 cm 土层湿润震荡后 2~5 mm 粒径团聚体分布
Fig.4 Distribution of 2~5 mm particle size aggregates in 0—30 cm soil layer after wet stirring

2.3 不同破碎机制下团聚体稳定性

当量直径 NMWD 是衡量团聚体稳定性的一个指标,其值越低,表示团聚体稳定性越小。在 2 种不同破碎机制处理中,团聚体重量直径和标准重量直径均随粒径增大而增大,团聚体稳定性是快速湿润<湿润震荡(表 2)。与快速湿润比较,湿润震荡增加了>0.25 mm 粒径比例,降低了<0.25 mm 粒径比例。对于<2 mm 粒径团聚体来说,湿润震荡分离得到 0.25~2 mm 粒径比例较快速湿润平均增加了

53.89%,而 0.053~0.25 mm 和<0.053 mm 粒径平均降低 55.94% 和 52.94%,差异显著($p<0.05$);对于 2~5 mm 粒径团聚体来说,湿润震荡分离得到 0.25~2 mm 粒径比例较快速湿润平均增加 22.62%,而 0.053~0.25 mm 和<0.053 mm 粒径平均降低 62.21% 和 61.15%,>2 mm 粒径比例平均增加了 6.23%,差异极显著($p<0.01$)。在湿润震荡和快速湿润过程中,<2 mm 团聚体的稳定性都显著低于 2~5 mm 团聚体的稳定性($p<0.05$)。

表 2 不同破碎机制团聚体粒级差异分析
Table 2 Analysis on particle size differences of aggregates measured based on different crushing mechanisms

处 理	粒径/mm	MWD	NMWD	不同径级团聚体含量			
				>2 mm	0.25~2 mm	0.05~0.25 mm	<0.053 mm
快速湿润	<2 mm	0.34 ^b	0.07 ^b	—	50.74 ^b	42.12 ^{Aa}	7.14 ^{Aa}
湿润震荡	<2 mm	0.60 ^a	0.11 ^a	—	78.08 ^a	18.56 ^{Bb}	3.36 ^{Bb}
快速湿润	2~5 mm	0.55 ^{Bb}	0.12 ^b	1.97 ^{Bb}	64.61 ^b	28.18 ^{Aa}	5.24 ^{Aa}
湿润震荡	2~5 mm	1.04 ^{Aa}	0.21 ^a	8.10 ^{Aa}	79.22 ^a	10.65 ^{Bb}	2.04 ^{Bb}

注:不同大小写字母分别代表差异显著性($p<0.01$ 和 $p<0.05$)。

2.4 影响团聚体稳定性的因素

快速湿润条件下<2 mm 和 2~5 mm 粒径团聚体 MWD 值与土壤容重均呈负相关关系,湿润震荡

<2 mm 粒径团聚体与土壤容重和毛管孔隙显著正相关,而与总孔隙度、非毛管孔隙显著负相关($p<0.05$)(表 3)。

表 3 土壤基础理化指标与团聚体稳定性的相关性分析
Table 3 Correlation analysis between soil basic physico-chemical indicators and aggregate stability

处 理	相关系数								
	粒径	含水量	容重	饱和含水量	总孔隙度	毛管孔隙	非毛管孔隙	有机质	全氮
快速湿润	<2	0.375	-0.059	0.191	0.056 8	0.318	-0.166	-0.04	0.258
	2~5	0.348	-0.236	0.358	0.233	0.187	0.015	0.176	0.363
湿润震荡	<2	0.422	0.65 [*]	-0.451	-0.654 [*]	0.705 [*]	-0.807 ^{**}	-0.034	0.113
	2~5	0.149	0.293	-0.217	0.284	0.276	0.332	0.145	0.515

注:*表示在 $p<0.05$ 水平差异显著;**表示在 $p<0.05$ 水平差异极显著。

无论快速湿润还是湿润震荡, <2 mm 粒径团聚体与非毛管孔隙和土壤有机质含量呈负相关, 而 $2\sim 5$ mm 粒径团聚体 MWD 值与非毛管孔隙和土壤有机质呈正相关关系。

3 讨论

3.1 不同破碎机制团聚体稳定性

团聚体的稳定性与土壤侵蚀和径流密切相关, 是土壤对径流和侵蚀敏感性的有效指示因子^[15]。团聚体破碎程度也受土壤物理性质和非生物因素的影响。快速湿润主要取决于团聚体初始含水量和湿润速度而导致孔隙中的空气受压破碎团聚体。在含水量一致的情况下, 团聚体的孔隙度是影响快速湿润的主要因素^[5]。本研究表明, 团聚体稳定性是快速湿润 $<$ 湿润震荡^[14], 粒径越大, 团聚体稳定性越高, $2\sim 5$ mm 团聚体的稳定性显著高于 <2 mm 团聚体的稳定性, 这一点与郭伟等^[15]对红壤的研究结果不同, 与土壤类型和有机质含量不同有关。无论是快速湿润还是湿润震荡, 团聚体破碎获得的 >2 mm 粒径与 $0.25\sim 2$ mm, $0.053\sim 0.25$ mm 粒径之间, $0.25\sim 2$ mm 粒径与 $0.053\sim 0.25$ mm 和 <0.053 mm 粒径之间均达到极显著负相关, 而两种方法分离得到的 $0.053\sim 0.25$ mm 与 <0.053 mm 粒径之间均呈显著正相关。预湿润震荡的机械外力能量只达到了一个可以克服土壤中胶结物质影响的较低值, 在实际降雨中, 机械外力破坏具有累积性, 施加于团聚体上的能量是持续增加的。因此, 在作物生长前期如遇干旱土壤含水量过低条件下大雨或持续降雨等均可促使 $2\sim 5$ mm 大粒径和 <2 mm 小粒径团聚体破碎并促进 $<0.053\sim 0.25$ mm 微团聚体和黏粉粒的形成, 增加地表结皮现象的发生, 从而影响土壤孔隙状况, 减小入渗率, 增加土壤侵蚀量^[15-16]。

3.2 秸秆还田方式与团聚体稳定性

有研究发现, 长期免耕秸秆覆盖促进大团聚体的形成和稳定, $0\sim 20$ cm 土层 $>2\ 000\ \mu\text{m}$ 团聚体对土壤碳的贡献率显著高于旋耕和翻耕秸秆还田处理, $5\sim 30$ cm 土层大团聚体随耕作强度的减弱提高^[17]。秸秆覆盖可提升地表粗糙度, 延滞坡面初始产流时间, 秸秆本身对径流和泥沙也具有物理拦截阻滞作用, 能削弱径流侵蚀力并使泥沙不断沉积, 减少坡面的侵蚀量^[18]。但当黑土容重 $>1.3\ \text{g}/\text{cm}^3$ 时, 土壤中有利于降雨入渗的大孔隙数量减少, 非活性孔隙增多, 由此导致的径流增加量远大于秸秆覆盖对径流量的减少, 致使秸秆覆盖的作用难以体现^[4]。本研究发现, 快速湿润机制下顺坡秸秆覆盖处理团

聚体稳定性降低, 湿润震荡机制下顺坡与横坡秸秆覆盖 MWD 值和 NMWD 值均降低, 与秸秆深翻和碎混还田处理差异显著, 表明土壤容重增加后秸秆覆盖效果难以体现。秸秆碎混还田处理土壤容重虽然也有增加, 但湿润震荡机制下 $0.25\sim 2$ mm 粒径比例显著增加, 团聚体稳定性表现为增强。当土壤孔隙度较大时, 团聚体内颗粒之间的接触点将下降, 也有降低团聚体强度的可能^[19]。本研究结果表明, 与翻耕还田比较, 短期内的秸秆碎混还田处理土壤总孔隙度与非毛管孔隙度均有降低, 可能对团聚体稳定性产生影响。

3.3 土壤有机质与团聚体稳定性

土壤有机质水平的高低虽与土壤团聚体稳定性密切相关, 但影响程度可因植被类型、耕作方式等而异^[7,9]。在快速湿润机制下, 团聚体的稳定性受不同数量和质量的碳源同时作用的影响。Boix-Fayos 等^[20]对半干旱到半湿润地区的土壤进行研究后认为, 微团聚体的水稳性与黏粒含量成正相关, 而大团聚体的稳定性则与土壤有机质密切相关。本研究表明, 无论快速湿润还是湿润震荡, <2 mm 粒径团聚体稳定性与土壤有机质含量呈负相关, 而 $2\sim 5$ mm 粒径团聚体稳定性与土壤有机质呈正相关。秸秆碎混还田处理土壤有机碳虽有降低, 但孔隙度也降低, 因而在快速湿润处理中大孔隙中的空气不易形成被压缩空气而爆裂, 其团聚体稳定性反而会增强。不同尺度的团聚体稳定性存在差异, 小团聚体的稳定性高于大团聚体, 原因在于小团聚体的孔隙更小, 弯曲度更大, 并容积密度更高, 导致较小的团聚体内聚力大于较大的团聚体^[21-22]。而本研究发现, 黑土坡耕地中大团聚体的稳定性高于小团聚体, 与典型黑土质地黏重、有机质初始含量较高有关。长期耕种后东北黑土有机质呈下降趋势^[23], 而已有关于坡耕地侵蚀研究多集中于室内模拟自然降雨或小区试验, 耕作措施也多为人工操作^[9,24-25], 与田间实际大型机械作业后对土壤结构等影响不同, 尤其是顺坡与横坡覆盖对黏质型土壤径流的防蚀效果在团聚体稳定性上如何表征, 种植秸秆量较少的作物如大豆, 在地表覆盖度较低时, 破碎机制如何影响土壤团聚体的稳定性, 还有待于进一步探讨。

4 结论

黑土坡耕地实施不同秸秆还田措施后, 土壤团聚体稳定性因破碎机制和还田方式的不同而不同。

(1) 在 Le Bissonais 法中, 湿润震荡处理的 $2\sim 5$ mm 团聚体稳定性最高, 快速湿润处理 <2 mm 团聚

体稳定性最低。快速湿润与湿润震荡处理 $<2\text{ mm}$ 和 $2\sim 5\text{ mm}$ 团聚体MWD值差异显著,说明黑土中大粒径团聚体稳定性较高。快速湿润是团聚体破碎最主要的机制,土壤有机质与大粒径团聚体稳定性呈正相关。

(2)短期内,秸秆覆盖因土壤容重和孔隙度等性状变化的影响可能掩盖了秸秆覆盖地表侵蚀防控对团聚体稳定性的作用。秸秆碎混还田土壤团聚体稳定性表现为增强,可能与典型黑土土壤机械组成及有机质初始含量有关,还需结合长期研究进一步探讨增加秸秆覆盖并通过调整耕作方式以增强团聚体稳定性防控土壤侵蚀的机制。

参考文献(References)

- [1] 史志华,宋长青.土壤水蚀过程研究回顾[J].水土保持学报,2016,30(5):1-10.
Shi Zhihua, Song Changqing. Water erosion processes: A historical review [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016,30(5):1-10.
- [2] 张光辉,杨扬,刘瑛娜,等.东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J].水土保持学报,2022,36(2):1-12.
Zhang Guanghui, Yang Yang, Liu Yingna, et al. Advances and prospects of soil erosion research in the black soil region of northeast China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(2):1-12.
- [3] 张兴义,刘晓冰.中国黑土研究的热点问题及水土流失防治对策[J].水土保持通报,2020,40(4):340-344.
Zhang Xingyi, Liu Xiaobing. Key issues of mollisols research and soil erosion control strategies in China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020,40(4):340-344.
- [4] 杨文文,张学培,王洪英.东北黑土区坡耕地水土流失及防治技术研究进展[J].水土保持研究,2005,12(5):232-236.
Yang Wenwen, Zhang Xuepei, Wang Hongying. Study on soil and water loss and prevention technology of sloping land in blackland in the northeast [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005,12(5):232-236.
- [5] 霍军力,王永成,董斌.东北黑土区坡耕地地表径流的影响因素分析:兼谈水土流失对策[J].黑龙江水利科技,2008,36(5):93-94.
Huo Junli, Wang Yongcheng, Dong Bin. Analysis of influencing factors on surface runoff of sloping farmland in the black soil region of northeast China [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2008,36(5):93-94.
- [6] 张琪,方海兰,史志华,等.侵蚀条件下土壤性质对团聚体稳定性影响的研究进展[J].林业科学,2007,43(S1):77-82.
Zhang Qi, Fang Hailan, Shi Zhihua, et al. Advances in influence factors of aggregate stability under erosion [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007,43(S1):77-82.
- [7] 沈海鸥,任明,温磊磊,等.黑土区坡耕地水力侵蚀及其防治技术研究进展[J].灌溉排水学报,2024,43(10):97-105.
Shen Haiou, Ren Ming, Wen Leilei, et al. Water erosion and its mitigation in sloped black soil farmlands in northeastern China: A review [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024,43(10):97-105.
- [8] 贺云锋,沈海鸥,张月,等.黑土区坡耕地不同秸秆还田方式的水土保持效果分析[J].水土保持学报,2020,34(6):89-94.
He Yunfeng, Shen Haiou, Zhang Yue, et al. Analysis of soil and water conservation effects of different straw returning patterns in sloping farmland in the Chinese black soil region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(6):89-94.
- [9] 彭新华,张斌,赵其国.红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响[J].生态学报,2003,23(10):2176-2183.
Peng Xinhua, Zhang Bin, Zhao Qiguo. Effect of soil organic carbon on aggregate stability after vegetative restoration on severely eroded red soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003,23(10):2176-2183.
- [10] 赵新凯.不同耕作和秸秆覆盖方式对黄土坡耕地水力侵蚀调控机制研究[D].陕西西安:西安理工大学,2024.
Zhao Xinkai. Study on the regulation mechanism of hydraulic erosion of farmland on loess slopes by different tillage and straw mulching methods [D]. Xi'an, Shaanxi: Xi'an University of Technology, 2024.
- [11] 付玉,李光录,郑腾辉等.雨滴击溅对耕作层土壤团聚体粒径分布的影响[J].农业工程学报,2017,33(3):155-160.
Fu Yu, Li Guanglu, Zheng Tenghui, et al., Effects of raindrop splash on aggregate particle size distribution of soil plough layer [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(3):155-160.
- [12] 孙芳媛.不同耕作措施对坡耕地水土流失的影响[D].广东广州:华南农业大学,2017.
Sun Fangyuan. Effects of Different Cultivation Measures on Soil Erosion of Sloping Farmland [D]. Guangzhou, Guangdong: South China Agricultural University, 2017.
- [13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
Bao Shidan. Soil and Agricultural Chemistry Analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [14] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology [J]. European Journal of Soil Science, 1996,47(4):425-437.

- [15] 郭伟,史志华,陈利顶,等.红壤表土团聚体粒径对坡面侵蚀过程的影响[J].生态学报,2007,27(6):2516-2522.
Guo Wei, Shi Zhihua, Chen Liding, et al. Effects of topsoil aggregate size on runoff and erosion at hillslope in red soils [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(6): 2516-2522.
- [16] 史志华,闫峰陵,李朝霞,等.红壤表土团聚体破碎方式对坡面产流过程的影响[J].自然科学进展,2007,17(2):217-224.
Shi Zhihua, Yan Fengling, Li Zhaoxia, et al. Effects of top soil aggregate fragmentation methods on runoff at hill slope in red soils [J]. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(2):217-224.
- [17] 王兴,祁剑英,井震寰等.长期保护性耕作对稻田土壤团聚体稳定性和碳氮含量的影响[J].农业工程学报,2019,35(24):121-128.
Wang Xing, Qi Jianying, Jing Zhenhuan, et al., Effects of long-term conservation tillage on soil aggregate stability and carbon and nitrogen in paddy field [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(24):121-128.
- [18] 李富程,花小叶,王彬.紫色土坡地旋耕机耕作侵蚀特征[J].中国水土保持科学,2016,14(1):71-78.
Li Fucheng, Hua Xiaoye, Wang Bin. Rate and pattern of tillage erosion by rotary cultivator on the steep land of purple soil [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2016, 14(1):71-78.
- [19] 闫雷,喇乐鹏,董天浩,等.耕作方式对东北黑土坡耕地土壤物理性状及根系垂直分布的影响[J].农业工程学报,2021,37(1):125-132.
Yan Lei, La Yuepeng, Dong Tianhao, et al. Soil physical properties and vertical distribution of root systems affected by tillage methods in black soil slope farmlands in northeast China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(1):125-132.
- [20] 曹允淞,李和平,肖波.秸秆覆盖量对不同容重黑土坡耕地水土流失的影响[J].水土保持通报,2021,41(3):56-61.
Cao Yousong, Li Heping, Xiao Bo. Effects of straw mulching on soil and water loss under different soil bulk densities on slope cropland in black soil region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(3):56-61.
- [21] Boix F C, Calvo C A, Imeson A C, et al. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators [J]. *Catena*, 2001, 44(1):47-67.
- [22] Díaz Z M, Perfect E, Grove J H. Disruptive methods for assessing soil structure [J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, 64(1/2):3-22.
- [23] 郝小雨,马星竹.黑土质量演变与可持续利用[M].北京:中国农业科学技术出版社,2023.
Hao Xiaoyu, Ma Xingzhu. *Evolution of Black Soil Quality and Sustainable Utilization* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2023.
- [24] 刘继龙,王志卓,曹晓强,等.黑土区坡耕地土壤侵蚀及水分利用效率对不同覆盖耕作模式的响应[J].排灌机械工程学报,2024,42(8):826-834.
Liu Jilong, Wang Zhizhuo, Cao Xiaoqiang, et al. Responses of soil erosion and water use efficiency of sloping farmland in black soil region to different mulch tillage modes [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2024, 42(8):826-834.
- [25] 盘礼东,李瑞,黎庆贵,等.黔西喀斯特区秸秆覆盖对坡耕地产流产沙特征的响应[J].水土保持学报,2021,35(1):9-16.
Pan Lidong, Li Rui, Li Qinggui, et al. Effects of straw mulching on runoff and sediment characteristics of sloping farmland in the karst area of western Guizhou [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1): 9-16.

(上接第 193 页)

- [11] 刘恒飞,王洪昌,刘禹鑫.自然资源智慧监管平台关键技术研究及构建[J].测绘与空间地理信息,2020,43(增刊1):76-79.
Liu Hengfei, Wang Hongchang, Liu Yuxin. Research and construction of key technology of wisdom supervision platform for natural resources [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2020, 43(Suppl.1):76-79.
- [12] 水土保持司.国务院领导充分肯定中国水土流失科考成果[J].水土保持应用技术,2009(4):30.
The Soil and Water Conservation Department of the Ministry of Water Resources. The State Council leaders fully affirmed the achievements of the scientific research on soil erosion in China [J]. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2009(4):30.
- [13] 水利部,中国科学院,中国工程院.中国水土流失防治与生态安全:开发建设活动卷[M].北京:科学出版社,2010.
Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Engineering. *Activity Volume of Soil Erosion Prevention and Ecological Security Development and Construction in China* Science Press [M]. Beijing: Science Press, 2010.