

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.01.007

王威, 唐蛟, 殷金忠, 等. 秸秆全量还田配施沼液对砂姜黑土水稳性团聚体及结合有机碳的影响. 土壤, 2023, 55(1): 53–61.

秸秆全量还田配施沼液对砂姜黑土水稳性团聚体及结合有机碳的影响^①

王威¹, 唐蛟^{1,2,3*}, 殷金忠¹, 潘飞飞⁴, 樊姝言¹, 黄文文¹, 吴大付¹

(1 河南科技学院资源与环境学院, 河南新乡 453003; 2 河南科技学院博士后研发基地, 河南新乡 453003; 3 河南省生物药肥研发与协同应用工程研究中心, 河南新乡 453003; 4 河南科技学院园艺与园林学院, 河南新乡 453003)

摘要: 为探究秸秆还田配施沼液对土壤水稳性团聚体及结合有机碳的影响, 以黄淮海平原砂姜黑土为研究对象, 设置秸秆全量还田和秸秆全量还田配施不同剂量(低剂量: 450 m³/hm²; 中剂量: 750 m³/hm²; 高剂量: 1 050 m³/hm²)沼液处理以及空白对照, 采集并分析了不同土层(0~20 cm 和 20~40 cm)水稳性团聚体及结合有机碳的分布情况。结果表明: 相较于对照, 秸秆还田和沼液灌施均显著促进各土层水稳性大团聚体形成及稳定性提高。秸秆还田配施中量沼液处理>0.25 mm 粒径团聚体质量组成比例(WR_{0.25})、平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)最高, 而团聚体破碎率(PAD)和分形维数(D)最低。单一进行秸秆还田和秸秆还田配施不同剂量沼液均显著增加各土层大团聚体结合有机碳贡献率, 降低<0.25 mm 粒径土壤颗粒结合有机碳的贡献率。秸秆还田配施中量沼液处理使得大粒径团聚体结合有机碳贡献率显著高于其他处理。因此, 进行秸秆全量还田配施适量沼液有助于该区域砂姜黑土土壤结构的改善和土壤有机碳的积累, 促进水稳性大团聚体的形成和团聚体稳定性的提高, 并通过影响各粒径团聚体结合有机碳含量, 提高有机碳在大粒径团聚体中的分布, 其中以秸秆全量还田配施中量沼液处理团聚体稳定性及结合有机碳提升效果最为明显。

关键词: 秸秆还田; 沼液; 土壤团聚体; 结合有机碳; 砂姜黑土

中图分类号: S156 文献标志码: A

Aggregates and Associated Organic Carbon in Lime Concretion Black Soil in Response to Combined Full-rate Straw Incorporation and Biogas Slurry Application

WANG Wei¹, TANG Jiao^{1,2,3*}, YIN Jinzhong¹, PAN Feifei⁴, FAN Shuyan¹, HUANG Wenwen¹, WU Dafu¹

(1 College of Resources and Environment Sciences, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, Henan 453003, China; 2 Postdoctoral Research and Development Base, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, Henan 453003, China; 3 Henan Engineering Research Center of Biological Pesticide & Fertilizer Development and Synergistic Application, Xinxiang, Henan 453003, China; 4 College of Horticulture and Landscape Architecture, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, Henan 453003, China)

Abstract: To explore the effects of combined full-rate straw incorporation (SW) and biogas slurry (BS) on soil water-stable aggregates and aggregated-associated organic carbon, lime concretion black soil in North China Plain was used as the research object. A field experiment was conducted with treatments including blank control (CK), SW alone, SW combined with low, middle and high amounts of BS, i.e., 450 m³/hm²(SW+LBS), 750 m³/hm²(SW+MBS), 1050 m³/hm²(SW+HBS). Soil samples in different layers (0–20 cm and 20–40 cm) were collected and water-stable aggregates and aggregate-associated organic carbon were analyzed. The results show that compared with CK, SW and BS significantly improve the mass proportion of water-stable macro-aggregates and aggregate stability in different layers. SW+MBS has the greatest mass proportions of water-stable macro-aggregates (WR_{0.25}), mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD), but the lowest percentage of aggregate destruction (PAD) and fractal dimension (D). SW alone and SW combined BS significantly increase the contribution rate of macro-aggregate associated organic carbon in different layers, but decrease that of aggregates <0.25 mm. SW+MBS results in higher contribution rate of macro-aggregate associated organic carbon than other treatments. Therefore, SW combined

①基金项目: 河南省重点研发与推广专项(212102110388)和河南省博士后基金项目(201903042)资助。

* 通讯作者(tangjiaoviva1988@126.com)

作者简介: 王威(1998—), 男, 河南驻马店人, 硕士研究生, 主要从事农业废弃物资源化利用研究。E-mail: wang479152022@163.com

appropriate BS is a promising approach for lime concretion black soil in this region by promoting water-stable large aggregate formation and aggregate stability, changing contents of aggregate-associated organic carbon and facilitating organic carbon distribution in large aggregates. The most obvious enhancement is obtained by SW+MBS.

Key words: Straw returning; Biogas slurry; Soil aggregates; Associated organic carbon; Lime concretion black soil

土壤团聚体和有机碳是进行土壤肥力评估和开展土壤质量评价的两大关键指标^[1]。土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,其粒径分布可以表征土壤物理结构稳定性,与土壤抗侵蚀性和保肥供肥性联系紧密^[2]。土壤有机碳是形成土壤团粒结构的主要胶结物质,有助于土壤微团聚体形成大团聚体。土壤团聚体作为土壤有机碳的主要储存场所,能够保护有机碳免受微生物矿化分解,维持相对稳定的土壤有机碳储量^[3]。然而,由于现代集约化农业生产过度依赖化学肥料而忽视有机物料的投入,导致农田土壤碳素过度释放问题凸显。相关研究已经证实我国大部分农田有机碳含量出现负平衡现象^[4]。此外,土壤有机碳在不同粒径团聚体中的分布也不均匀,超过 70% 的有机碳存在于微团聚体内,并且不同粒径团聚体对有机碳的固持能力也存在一定差异,并随土壤质地、土壤类型、耕作制度和施肥水平发生相应改变^[5]。因此,开展有关土壤团聚体及结合有机碳研究对农田土壤碳库稳定和固碳机制研究具有重要意义。

合理进行外源有机物料添加是进行土壤肥力提升和改良的重要措施,有利于土壤团聚体的形成并影响土壤有机碳在不同粒径团聚体中的积累与分配^[6]。近年来,受养殖企业集约规模化迅猛发展影响,粪污排放量急剧增加,仅 2021 年中国畜禽粪污产生量约 30.5 亿 t^[7]。将畜禽粪污作为原材料利用沼气工程进行厌氧发酵是目前养殖业进行粪污消纳的主要处理方式。其中产生的液体残余物——沼液不仅富含植物生长所需的多种营养元素,还包含一定数量的水溶性有机碳和生物活性物质,常作为一种优质的液体有机肥在农业生产中得到广泛利用^[8]。相关研究已经证实进行农田沼液施用能够显著提高土壤有机质含量,促进土壤微生物活动和酶活性,提高团聚体稳定性及结合有机碳含量^[9]。然而目前沼液还田技术依然不够成熟,存在盲目施用、过量施用等问题,极易加快土壤有机碳矿化分解过程,降低土壤有机碳积累潜力,增加土壤污染风险^[10]。此外,开展秸秆还田是一种低耗能可持续的保护性耕作措施,既可充分利用秸秆资源,减轻焚烧秸秆对生态环境造成的负面影响,又能增加土壤有机物料投入量,促进土壤团聚体的形成和有机碳积累^[11-13]。虽

然秸秆还田具有诸多优点,但是由于普遍采用秸秆全量还田措施,随着秸秆还田年限的增加容易造成土壤碳氮比失衡和还田秸秆分解腐熟效果差等问题,不仅限制了土壤肥力提升和土壤有机碳积累潜力,还降低了农民秸秆还田积极性。然而目前多数研究关注单一进行沼液施用或秸秆还田对土壤团聚体和有机碳含量的影响,鲜有将两者配合施用的相关报道,且已开展的试验多为室内培养或短期研究,缺乏长期定位大田试验数据支撑。因此,有必要开展秸秆还田结合沼液灌施对土壤团聚体及结合有机碳影响的中长期定位研究,为促进区域农业废弃物资源化利用进程提供数据参考。

黄淮海平原是我国重要的粮食生产基地和生猪养殖基地,具有丰富的秸秆和沼液资源。秸秆还田已在当地得到广泛应用,将沼液就近还田是区域内生猪养殖企业普遍采取的沼液消纳措施之一。砂姜黑土是黄淮海平原主要的耕作土壤类型,具有土质黏重、土层紧实、通气性差、有机质含量低、耕性不良等特征,改良潜力巨大^[10]。本研究以黄淮海平原种养结合农牧循环示范基地为平台,探究秸秆还田配施沼液对砂姜黑土团聚体特征变化的影响,分析土壤团聚体结合有机碳积累与分布规律,以期增强对农业土壤碳固持途径及机制的理解。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于河南省周口市商水县张明乡曹庄种养结合农牧循环示范基地(114°28'E, 33°63'N)。该地区属暖温带大陆性季风气候,年均日照时数 2 094.9 h,无霜期 223 d,历年平均气温 14.50℃,多年平均降水量 785.10 mm,70% 以上的降雨集中在 6—9 月。试验区域地势平坦,排水良好,长期进行冬小麦和夏玉米轮作。土壤属于典型砂姜黑土,表层土壤(0~10 cm)pH 为 6.50,有机碳、全氮、有效磷、速效钾含量分别为 23.05 g/kg, 1.68 g/kg, 20.60 mg/kg 和 245.26 mg/kg。根据国际制土壤颗粒分析方法,土壤砂粒(>0.02 mm)、粉粒(0.02~0.002 mm)和黏粒(<0.002 mm)质量占比分别为 41.08%、26.20% 和 32.72%。

1.2 试验设计

本试验于 2016 年 10 月开始, 采用完全随机设计, 共设置 5 个处理, 分别为: ①对照(CK), 不进行秸秆还田和沼液灌施; ②单一秸秆全量还田(SW); ③秸秆全量还田配施低量沼液(SW+LBS); ④秸秆全量还田配施中量沼液(SW+MBS); ⑤秸秆全量还田配施高量沼液(SW+HBS)。每个处理设置 4 个重复, 每个重复一个小区, 小区面积为 300 m² (50 m × 6 m)。各小区用土埂隔开, 防止水肥互串。供试沼液来源为牧原食品有限公司商水八场以猪粪为主要原料的沼气工程厌氧发酵液体残余物。沼液 pH 7.20 ~ 7.60, 总氮、总磷和总钾含量分别为 1 180.00 ~ 2 300.00、350.00 ~ 580.00、325.00 ~ 450.00 mg/L, 有机碳含量为 1.25 ~ 1.49 g/L。各处理小麦和玉米生长季氮、磷和钾投入量与当地农户平均化肥施用量保持一致, 氮磷钾肥分别选择市售普通尿素(含 N 460 g/kg)、重过磷酸钙(含

P₂O₅ 460 g/kg)和氯化钾(含 K₂O 600 g/kg)。氮肥按 6 : 4 的基追比进行施用, 磷、钾肥作基肥一次性撒施, 各处理具体施肥量见表 1。夏玉米秸秆粉碎后利用旋耕机将秸秆与土壤进行充分混合, 旋耕深度为 15 cm。冬小麦秸秆全部粉碎后覆盖于地表, 直接播种夏玉米。试验区域其他农田管理方式与当地大田种植保持一致, 按一般高产田进行管理。

灌施沼液各处理利用前期铺设好的沼液输送管网和加压装置, 使用配套的 5 mm 孔径的微喷软管, 根据天气情况分次进行喷施。60% 的沼液在冬小麦播种前 20 d 内分 2 ~ 3 次进行喷施, 其余 40% 的沼液在每年 12 月中上旬采用相同方式施用。在夏玉米播种前 7 d 将 40% 的沼液一次性进行喷施, 其余 60% 在出苗后至大喇叭口期分 2 ~ 3 次进行施用。为了保证作物生长全过程各处理灌水量一致, 根据配施高量沼液处理的液体体积, 在相同时间对其余处理进行清水补灌。

表 1 生长季秸秆全量还田配施沼液处理肥料具体施用量

Table 1 Amounts of chemical fertilizer and biogas slurry application under different treatments during crop growing season

处理	年施肥总量		冬小麦		夏玉米		
	沼液 (m ³ /hm ²)	化肥 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O (kg/hm ²)	沼液 (m ³ /hm ²)	化肥 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O(kg/hm ²)		沼液 (m ³ /hm ²)	化肥 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O (kg/hm ²)
				基肥	追肥		
CK	0	360-180-180	0	108-90-90	72-0-0	0	180-90-90
SW	0	360-180-180	0	108-90-90	72-0-0	0	180-90-90
SW+LBS	450	360-180-180	225	108-90-90	72-0-0	225	180-90-90
SW+MBS	750	360-180-180	375	108-90-90	72-0-0	375	180-90-90
SW+HBS	1 050	360-180-180	525	108-90-90	72-0-0	525	180-90-90

1.3 样品采集与测定

土壤样品采集与测定在 2021 年 10 月夏玉米收获后进行。利用五点混合取样法分别采集各试验小区 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层原状土样各 1 kg, 装入硬质塑料盒中。运输过程中尽量防止挤压和碰撞, 带回实验室后去除肉眼可见的砾石、植物残体、根系和土壤动物, 过 10 mm 筛, 自然风干备用。风干土壤分别采用干、湿筛法进行 >2 mm、0.25 ~ 2 mm 粒径大团聚体, 0.053 ~ 0.25 mm 粒径微团聚体以及 <0.053 mm 粒径黏粉粒的分级, 具体操作方法详见唐蛟等^[14]报道。烘干后的水稳性团聚体采用重铬酸钾外加热法进行团聚体结合有机碳的测定^[15]。

1.4 数据处理与统计分析

利用平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、团聚体破碎率(PAD)和质量分形维数(D)表征水稳性团聚体稳定性^[14]。团聚体结合有机碳贡献率计算公式为: 团聚体结合有机碳贡献率(%)=[第 i 粒

径团聚体有机碳含量(g/kg) × 该粒径团聚体的质量组成比例(%)]/土壤团聚体结合有机碳总量(g/kg) × 100。

利用 Excel 2016 对数据进行整理和计算, 使用 SPSS 25 软件分析数据。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)并利用 Tukey 检验法进行土壤团聚体特征及结合有机碳显著性分析和处理间的比较, 显著性水平设置为 0.05。通过 Origin Pro 2021b 软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 秸秆全量还田配施沼液对水稳性团聚体质量组成比例的影响

由表 2 可知, 秸秆还田和沼液灌施显著影响各土层水稳性团聚体质量组成比例, 有利于大团聚体形成, 降低微团聚体和黏粉粒所占比例。在 0 ~ 20 cm 土层, 除 CK 处理外, 各处理土壤团聚体的优势粒径均为 0.25 ~ 2 mm (42.86% ~ 47.41%) 和 >2 mm

表 2 秸秆全量还田配施沼液处理对水稳性团聚体质量组成比例(%)的影响
Table 2 Mass proportions of water-stable aggregates under different treatments

土层(cm)	处理	>2 mm	0.25 ~ 2 mm	0.053 ~ 0.25 mm	<0.053 mm	WR _{0.25}
0 ~ 20	CK	5.75 ± 1.16 d	18.52 ± 2.65 c	39.74 ± 3.85 a	36.00 ± 6.19 a	24.26 ± 3.63 d
	SW	27.44 ± 1.54 c	47.41 ± 0.45 a	16.77 ± 1.08 b	8.40 ± 0.86 b	74.84 ± 1.21 c
	SW+LBS	34.16 ± 4.56 bc	43.45 ± 3.67 a	9.46 ± 1.12 c	12.93 ± 0.78 b	77.61 ± 1.40 c
	SW+MBS	54.91 ± 2.19 a	35.00 ± 2.17 b	4.40 ± 0.35 c	5.71 ± 0.27 b	89.90 ± 0.33 a
	SW+HBS	41.21 ± 3.37 b	42.86 ± 2.73 a	6.08 ± 0.75 c	9.87 ± 0.39 b	84.06 ± 0.72 b
20 ~ 40	CK	7.82 ± 0.38 d	61.05 ± 6.32 a	19.04 ± 4.47 a	12.11 ± 3.81 a	68.86 ± 6.63 b
	SW	23.78 ± 2.64 bc	49.91 ± 3.49 b	15.42 ± 0.58 ab	10.89 ± 0.96 ab	73.69 ± 1.31 b
	SW+LBS	27.96 ± 8.28 ab	47.78 ± 3.09 b	14.55 ± 4.45 ab	9.72 ± 2.02 abc	75.74 ± 5.36 ab
	SW+MBS	33.15 ± 7.33 a	49.53 ± 4.54 b	10.59 ± 1.96 b	6.74 ± 1.22 c	82.68 ± 3.09 a
	SW+HBS	18.01 ± 3.14 c	57.96 ± 2.99 a	16.23 ± 2.40 a	7.81 ± 2.93 bc	75.97 ± 5.24 ab

注: 表中 WR_{0.25} 表示 >0.25 mm 团聚体质量组成比例; 同列数据后不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下表同。

(27.44% ~ 54.91%)。单一进行秸秆还田处理(SW)较 CK 处理显著提高 0.25 ~ 2 mm 和 >2 mm 粒径土壤团聚体质量组成比例, 增幅分别为 155.99% 和 377.22%, 显著降低 0.053 ~ 0.25 mm 和 <0.053 mm 粒径占比, 降幅分别为 57.80% 和 76.67%。与 SW 处理相比, 秸秆还田配施沼液各处理(SW+LBS、SW+MBS 和 SW+HBS)均提高 >2 mm 粒径水稳性团聚体质量组成比例, 其中秸秆还田配施中量沼液处理(SW+MBS)提升效果最为明显, 增幅达 100.11%。然而秸秆还田不同沼液灌施处理间 0.053 ~ 0.25 mm 和 <0.053 mm 粒径团聚体质量组成比例差异未达到显著水平。各秸秆还田和沼液灌施处理均显著提高 0 ~ 20 cm 土层 WR_{0.25} 数值, 其中 SW+MBS 处理条件下取得最大值, 为 89.90%。

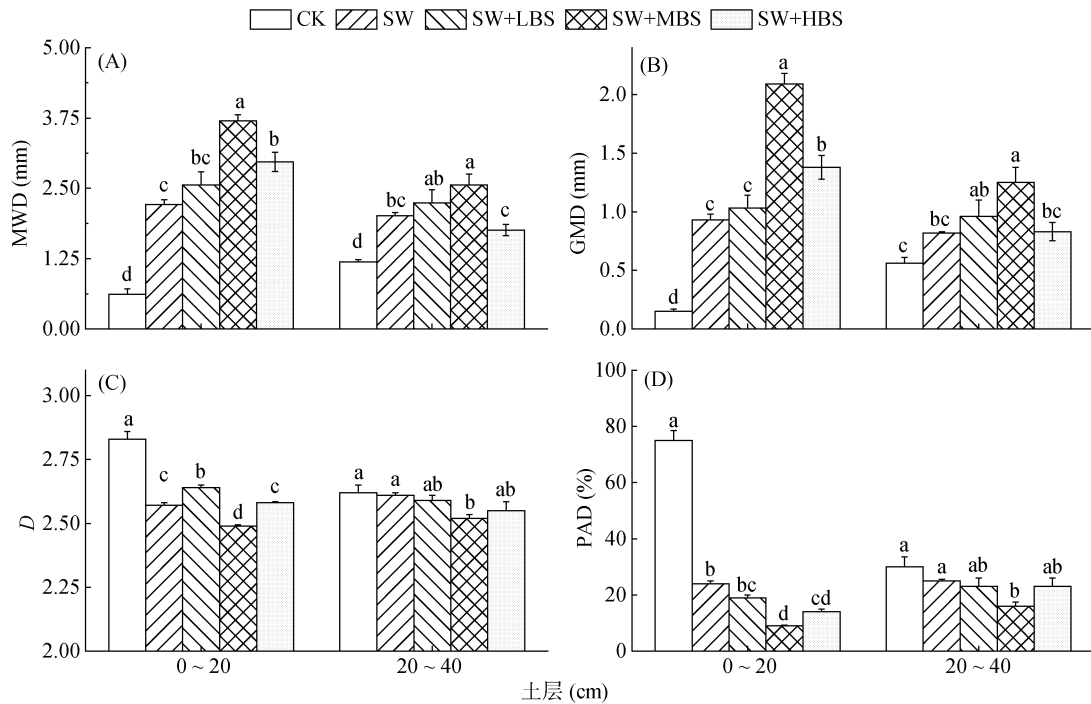
在 20 ~ 40 cm 土层, 小粒径大团聚体(0.25 ~ 2 mm)在 CK 处理中所占比例最高, 而大粒径大团聚体(>2 mm)所占比例最低。秸秆还田配施沼液各处理土壤团聚体主要集中在 0.25 ~ 2 mm(47.78% ~ 57.96%)和 >2 mm(18.01% ~ 33.15%)。与 CK 处理相比, SW 处理显著提高 >2 mm 粒径团聚体质量组成比例, 增幅达 204.09%, 但是显著降低 0.25 ~ 2 mm 粒径团聚体质量组成比例, 降幅为 18.25%; 而该处理对其他粒径水稳性团聚体质量组成比例未产生显著影响。SW+MBS 处理较 SW 处理进一步促进 >2 mm 粒径团聚体的形成, 降低 <0.053 mm 粒径团聚体占比。该处理条件下本土层 WR_{0.25} 数值最高, 为 82.68%, 而其余各处理 WR_{0.25} 之间无显著差异。

2.2 秸秆全量还田配施沼液对水稳性团聚体稳定性指标的影响

秸秆还田配施沼液处理对各土层水稳性团聚体

稳定性指标(MWD、GMD、*D* 和 PAD)均产生显著影响(图 1)。SW 处理较 CK 处理显著提高了 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层团聚体 MWD 值, 增幅分别为 256.45% 和 68.91%(图 1A)。在秸秆还田的基础上配施沼液, MWD 值随沼液灌施量的增加表现出先升高后降低的趋势, 并在灌施中量沼液处理下(SW+MBS)达到最大值, 分别为 3.70 mm 和 2.56 mm。灌施低量(SW+LBS)或高量沼液(SW+HBS)均会不同程度增加各土层 MWD 值, 但在 0 ~ 20 cm 土层二者之间无显著差异。各土层水稳性团聚体 GMD 变化规律与 MWD 基本一致(图 1B)。秸秆还田和沼液灌施处理均显著增加 0 ~ 20 cm 土层 GMD 值, 增幅达 520.00% ~ 1 293.33%。在 20 ~ 40 cm 土层, SW+MBS 处理条件下 GMD 值最高, 为 1.25 mm。除 CK 和 SW+MBS 处理外, 其余各处理之间 GMD 值无显著差异。

在 0 ~ 20 cm 土层, SW 处理较 CK 处理显著降低水稳性团聚体 *D* 值, 降幅为 9.19%。在秸秆还田的基础上配施沼液, *D* 值随沼液施用量的增加表现出波动的趋势(图 1C)。其中 SW+MBS 处理下 *D* 值最小, 为 2.49; SW+LBS 处理下, *D* 值较 SW 处理显著升高, 增幅为 2.72%; 而 SW+HBS 处理与 SW 处理间 *D* 值无显著差异。在 20 ~ 40 cm 土层, 各秸秆还田配施沼液处理较 CK 处理均不同程度降低 *D* 值, 但仅有 SW+MBS 处理达到显著水平, 降幅为 3.82%。各土层团聚体 PAD 值变化规律与 *D* 值变化趋势类似(图 1D)。相较于 CK 处理, 秸秆还田和沼液灌施各处理显著降低 0 ~ 20 cm 土层 PAD 值, 降幅为 68.18% ~ 88.21%。在秸秆还田的基础上配施沼液, PAD 值随沼液施用量的增加表现出先降低后升高的趋势, 其中 SW+MBS 处理 PAD 值最低, 仅为 8.84%, 而配施低



(图中不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05), 下图同)

图 1 秸秆全量还田配施沼液处理对水稳性团聚体稳定性指标的影响
Fig. 1 Stability parameters of water-stable aggregates under different treatments

量和高量沼液处理 PAD 值之间无显著差异, 分别为 19.09% 和 22.88%。在 20~40 cm 土层, 各秸秆还田配施沼液处理 PAD 值较 CK 处理均有不同程度降低, SW+MBS 处理条件下 PAD 值最低, 为 16.08%, 但是各配施沼液处理之间 PAD 值无显著差异。

2.3 秸秆全量还田配施沼液对水稳性团聚体结合有机碳含量的影响

由表 3 可知, 秸秆还田和沼液灌施显著影响各筛分粒径团聚体结合有机碳含量。在 0~20 cm 土层, SW 处理较 CK 处理显著促进黏粉粒结合有机碳含量的提高, 增幅为 69.21%, 但对其他粒径无显著影响。

在秸秆还田的基础上配施沼液有利于增加 0.25~2 mm 和 >2 mm 粒径大团聚体结合有机碳含量, 并随沼液灌施量的增加表现出上升的趋势, 增幅分别为 33.71%~114.04% 和 86.98%~142.32%。其中 SW+LBS 处理 >2 mm 粒径有机碳含量较 SW 处理无明显变化, 其余各配施处理该粒径有机碳含量显著增加。然而配施不同剂量沼液处理均显著提高 0.25~2 mm 粒径团聚体结合有机碳含量。对于 0.053~0.25 mm 粒径微团聚体, SW+HBS 处理下该粒径团聚体结合有机碳含量显著高于其余各处理。当秸秆还田配施低量或中量沼液时, <0.053 mm 粒径团聚体结合有机碳

表 3 秸秆全量还田配施沼液处理对团聚体结合有机碳含量的影响(g/kg)
Table 3 Contents of aggregate associated organic carbon under different treatments

土层(cm)	处理	>2 mm	0.25~2 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm
0~20	CK	9.05 ± 1.38 d	8.91 ± 2.31 b	12.31 ± 3.69 b	13.48 ± 1.30 b
	SW	9.85 ± 1.67 cd	7.68 ± 2.31 b	13.16 ± 1.37 b	22.81 ± 3.11 a
	SW+LBS	13.17 ± 0.30 bc	14.36 ± 1.53 a	13.94 ± 0.89 b	13.65 ± 3.27 b
	SW+MBS	16.66 ± 2.40 b	18.50 ± 1.63 a	11.30 ± 1.65 b	11.24 ± 1.55 b
	SW+HBS	21.08 ± 4.34 a	18.61 ± 4.55 a	22.90 ± 6.17 a	22.14 ± 1.83 a
20~40	CK	7.96 ± 2.38 c	7.46 ± 1.69 d	6.69 ± 0.31 c	7.54 ± 0.94 b
	SW	10.09 ± 2.40 bc	8.88 ± 1.47 cd	12.62 ± 4.08 b	7.65 ± 1.25 b
	SW+LBS	10.89 ± 2.60 bc	12.71 ± 2.49 c	9.73 ± 3.22 bc	11.05 ± 3.38 b
	SW+MBS	13.39 ± 2.91 b	19.15 ± 1.58 b	10.55 ± 1.44 bc	10.04 ± 2.23 b
	SW+HBS	19.16 ± 1.85 a	25.40 ± 4.77 a	20.65 ± 2.76 a	24.27 ± 5.81 a

含量较 SW 处理显著降低。虽然黏粉粒结合有机碳含量在 SW 处理取得最高值,但是与 SW+HBS 处理无显著差异。

在 20 ~ 40 cm 土层, CK 处理中各粒径团聚体结合有机碳含量基本保持一致。单一进行秸秆还田(SW)能够不同程度提高各粒径团聚体结合有机碳含量,其中 0.053 ~ 0.25 mm 粒径团聚体结合有机碳含量较 CK 处理显著增高 88.64%。SW+LBS 处理虽然提高了各粒径团聚体结合有机碳含量,但与 SW 处理间无显著差异。SW+MBS 处理较 SW 处理仅显著增加 0.25 ~ 2 mm 粒径团聚体结合有机碳含量,增幅达 115.65%。而 SW+HBS 处理显著提高各粒径团聚体结合有机碳含量,较 SW 处理分别增加 89.89%、186.04%、63.63% 和 217.25%。

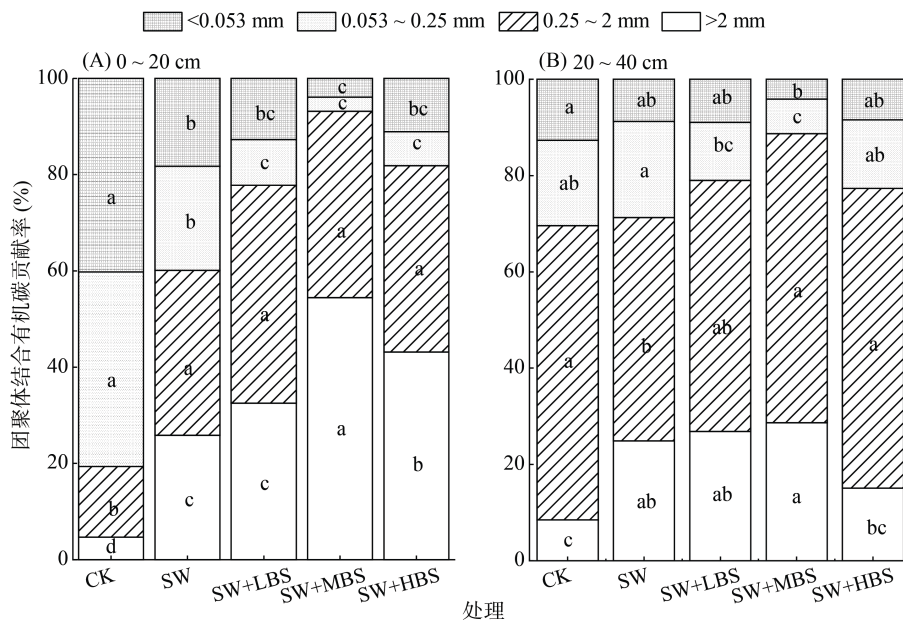


图 2 秸秆全量还田配施沼液处理对土壤团聚体结合有机碳贡献率的影响
Fig. 2 Contribution rates of different treatments to aggregate associated organic carbon

在 20 ~ 40 cm 土层, CK 处理团聚体结合有机碳主要积累在小粒径大团聚体(0.25 ~ 2 mm)中,其贡献率为 61.10%(图 2B)。SW 处理能够显著提高 >2 mm 粒径团聚体结合有机碳贡献率,增幅达 193.29%,显著降低 0.25 ~ 2 mm 粒径团聚体结合有机碳贡献率,降幅为 31.79%。在秸秆还田的基础上配施不同剂量沼液均有助于提升大团聚体结合有机碳贡献率。其中,SW+MBS 和 SW+HBS 处理显著提高 0.25 ~ 2 mm 粒径团聚体结合有机碳贡献率,较 SW 处理增加 29.42% 和 34.34%。SW+LBS 和 SW+MBS 处理显著降低 0.053 ~ 0.25 mm 粒径团聚体结合有机碳贡献率,较 SW 处理降低 39.81% 和 64.10%。特别是

由图 2 可知,秸秆还田配施沼液对团聚体结合有机碳贡献率产生显著影响。在 0 ~ 20 cm 土层, CK 处理团聚体结合有机碳主要集中在 <0.25 mm 粒径微团聚体中,有机碳积累贡献率达 80.62%(图 2A)。单一进行秸秆还田(SW)能够显著提高 0.25 ~ 2 mm 和 >2 mm 粒径大团聚体结合有机碳贡献率,较 CK 处理增加 133.29% 和 451.39%。在秸秆还田的基础上配施不同剂量沼液进一步提高了大团聚体结合有机碳占比,其中 >2 mm 粒径团聚体结合有机碳贡献率在 SW+MBS 处理下达到最大值,为 54.43%。配施沼液各处理与 CK 处理相比不同程度提高 0.25 ~ 2 mm 粒径团聚体结合有机碳贡献率,然而较 SW 处理显著降低 0.053 ~ 0.25 mm 和 <0.053 mm 粒径团聚体结合有机碳贡献率,但是各沼液配施处理间无显著差异。

SW+MBS 处理较 CK 处理显著提高 >2 mm 粒径团聚体结合有机碳贡献率,增幅达 237.29%,但是显著降低 0.053 ~ 0.25 mm 和 <0.053 mm 粒径团聚体结合有机碳贡献率,降幅分别为 59.61% 和 67.11%。

3 讨论

3.1 秸秆全量还田配施沼液对水稳性团聚体特征的影响

土壤团聚体粒径分布是评价土壤结构质量优劣的重要指标,可根据土壤团聚体测定方法分为力稳性和水稳性团聚体两大类。其中水稳性团聚体与土壤抗崩解能力密切相关,对湿润半湿润地区土壤结构稳定

性的保持具有重要意义。本研究结果表明, 秸秆还田配施沼液对砂姜黑土水稳性团聚体质量组成比例产生显著影响。在 0~20 cm 土层, 单一进行秸秆还田即可显著提高土壤大团聚体(WR_{0.25})质量组成比例。这与周孟棕等^[16]研究发现秸秆配施氮肥能显著促进大团聚体的形成的结果一致。由于本研究区域普遍采取秸秆全量还田措施, 因此向土壤中输入了大量有机物料, 为土壤颗粒团聚过程提供了丰富的胶结物质。同时秸秆中富含木质素, 可以作为内核吸附细小颗粒促进较大粒径团聚体的形成^[17]。本研究还进一步验证了在秸秆还田的基础上配施不同剂量沼液均能够有效提高 0~20 cm 土层大团聚体质量组成比例, 降低微团聚体和黏粉粒质量组成比例, 其中秸秆还田配施中量沼液(SW+MBS)处理提升效果最为显著。以上结果均证实秸秆还田后 0~20 cm 土层 <0.25 mm 粒径土壤颗粒呈现向大团聚体转变的趋势, 且配施沼液后更有利于大粒径团聚体的形成, 这与 Du 等^[18]在潮土分布区域连续多年开展秸秆还田配施猪粪沼液的研究结果相似。这是因为沼液灌施不仅可以利用沼液中的腐殖酸等胶结物质在土壤中形成具有较高表面积的土壤结构体, 还可以充分发挥沼液中各种有机化合物官能团的联合作用及亲水胶体的化学键作用促进土壤颗粒发生团聚过程^[2]。此外, 在秸秆还田的基础上配施沼液, 沼液中存在的微生物和多种营养物质有助于秸秆分解过程, 进而提高土壤有机质含量和微生物活性, 有效促进土壤大团聚体的形成。袁晶晶等^[10]的研究结果表明, 砂土中 >0.25 mm 粒径水稳性团聚体质量组成比例与生物质炭和沼液施用量呈正相关, 这与本研究结果存在一定差异, 可能是由于研究区域土壤质地和施用的沼液成分存在差异所导致的。虽然单一秸秆还田对 20~40 cm 土层土壤结构改良作用与 0~20 cm 土层表现出相同的趋势, 即大团聚体所占比例随沼液施用量的增加表现出先升高后降低的趋势, 但是改良效果 20~40 cm 土层不及 0~20 cm 土层明显。这可能是由于单一秸秆全量还田处理导致土壤 C/N 较高, 短时间内秸秆难以被微生物降解利用^[19], 加之目前主要采用旋耕作业, 还田秸秆主要集中在 0~20 cm 土层, 因此弱化了对 20~40 cm 土层的改良效果。然而在秸秆还田的基础上施用沼液不仅能够调节秸秆还田后土壤 C/N, 提高秸秆分解率, 而且沼液具有较强的流动性, 能够将分解后的可溶性有机物质转移到更深层土壤^[8], 因此秸秆还田配施沼液较单一进行秸秆还田有助于 20~40 cm 土层大团聚体的形成。

土壤团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)常用来衡量团聚体稳定性, 其值越大, 说明团聚体稳定性越高^[20]。本研究结果表明, 秸秆还田和沼液灌施均能显著提高各土层团聚体 MWD 和 GMD 值, 并且秸秆还田配施沼液较单一秸秆还田对 MWD 和 GMD 值的提升作用更为明显。这是由于土壤中存在的大量有机物质作为胶结物质不但提高了土壤大团聚体质量组成比例, 而且增强了团聚体稳定性^[21]。团聚体破碎率(PAD)主要指征土壤团聚体受水力破坏而导致的分散程度, 其值越小, 说明土壤团聚体稳定性越高^[22]。分形维数(D)是评价土壤结构分布的综合指标, 反映土壤颗粒大小、分布以及土壤质地的均一程度, 其值越大, 表明土壤质地越黏重, 通透性越差^[23]。本研究表明, 秸秆还田和灌施沼液处理均显著降低 0~20 cm 土层 PAD 和 D 值, 但只有秸秆还田配施中量沼液处理显著降低 20~40 cm 土层相应数值。这说明秸秆还田和沼液灌施对 0~20 cm 土层土壤团聚体稳定性提高作用明显, 对 20~40 cm 土层的作用效果主要受沼液灌施量的影响。总之, 秸秆还田与沼液灌施均能向土壤中输入大量有机物质和各種植物生长所需营养元素, 促进作物生物量积累, 同时还能提高土壤微生物活性, 加速土壤微团聚体向大团聚体转化, 进而提高土壤团聚体稳定性。但是 20~40 cm 土层较深, 养分、根系和微生物作用效果不如 0~20 cm 土层明显, 因此团聚体稳定性提高效果较弱。

3.2 秸秆全量还田配施沼液对水稳性团聚体结合有机碳的影响

不同粒径团聚体结合有机碳含量及相对贡献率反映了外源有机碳投入对土壤团聚体质量组成比例及结合有机碳积累与分布的差异。秸秆还田和灌施沼液有助于团聚体结合土壤有机碳含量的提高, 这是由于秸秆和沼液本身含有大量有机质, 为土壤输入大量外源有机碳, 此外秸秆和沼液的施用能够促进作物根系微生物新陈代谢活动, 提高根际沉积过程, 进而增加土壤有机碳的输入和积累^[24]。毛霞丽等^[25]研究发现, 长期施用有机肥能显著提高各粒径团聚体结合有机碳含量。韩明钊等^[26]研究表明, 秸秆和猪粪肥的施用均能降低<0.25 mm 粒径团聚体结合有机碳贡献率。本研究发现, 单一进行秸秆还田虽然显著提高 0~20 cm 土层黏粉粒结合有机碳含量, 但相应粒径团聚体结合有机碳贡献率却显著降低。这可能与添加外源碳提高土壤有机碳的周转速率和加速有机碳的物理迁移过程有关^[27]。而>0.25 mm 粒径团聚体结

合有机碳含量虽未显著提高,有机碳贡献率却显著增加,这也在一定程度证明团聚体结合有机碳贡献率受团聚体质量组成比例和结合有机碳含量的双重影响。在秸秆还田基础上配施沼液能显著提高各土层水稳性大粒径团聚体结合有机碳含量,并随着沼液施用量的增加,提高效果越显著,且大团聚体有机碳贡献率显著高于微团聚体。有机物料进入土壤后,易分解成分首先在细菌的作用下经历快速分解过程,然后难分解物质在真菌作用下通过复杂的变化过程形成腐殖物质,这些物质可以在土壤中长期稳定存在,进而增加土壤有机碳含量^[28]。由于秸秆的 C/N 较高,直接全量还田后在土壤中不易分解。沼液相较于秸秆拥有更低的 C/N,还田后有利于调节土壤 C/N,促进还田秸秆的腐解过程,更利于提高土壤团聚体结合有机碳含量。同时,秸秆还田配施沼液促进细小土壤颗粒团聚形成较大粒径团聚体,进而提高了大团聚体结合有机碳贡献率。张赛等^[29]研究表明,土壤有机碳主要富集在 0.25 ~ 2 mm 粒径水稳性团聚体内,秸秆覆盖提高了 >2 mm 粒级团聚体结合有机碳贡献率。这与本研究结果具有一定差异,可能与不同试验区施肥和秸秆还田方式、土壤类型和气候条件等人为和自然原因有关。

4 结论

1) 秸秆全量还田和秸秆全量还田配施沼液均不同程度增加 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层 $WR_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 值,显著降低 PAD 和 D 值。其中各土层均以秸秆还田配施中量沼液处理(SW+MBS) $WR_{0.25}$ 提升最为明显,团聚体稳定性最高。

2) 秸秆还田和沼液灌施均显著增加外源有机碳投入,提高各土层水稳性大团聚体结合有机碳含量,增加 >0.25 mm 粒径大团聚体结合有机碳贡献率,其中,秸秆还田配施中量沼液处理大粒径团聚体结合有机碳贡献率显著高于其他处理。

3) 秸秆全量还田配施中量沼液促进砂姜黑土水稳性大团聚体的形成并提高团聚体稳定性,促进有机碳在大粒径团聚体中的分布与积累,可实现改良土壤结构和增加土壤有机碳积累的双重目的。

参考文献:

[1] Badagliacca G, Petrovičová B, Pathan S I, et al. Use of solid anaerobic digestate and no-tillage practice for restoring the fertility status of two Mediterranean orchard soils with contrasting properties[J]. *Agriculture, Ecosystems*

& Environment, 2020, 300: 107010.

[2] 胥佳忆, 李先德, 刘吉龙, 等. 农业土地利用转变对土壤团聚体组成及碳、氮含量的影响[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(8): 438–448.

[3] Tang J, Davy A J, Wang W, et al. Effects of biogas slurry on crop yield, physicochemical properties and aggregation characteristics of lime concretion soil in wheat-maize rotation in the North China plain[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2022, 22(2): 2406–2417.

[4] 于严严, 郭正堂, 吴海斌. 1980—2000 年中国耕作土壤有机碳的动态变化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(6): 123–130.

[5] Cates A M, Ruark M D, Hedtcke J L, et al. Long-term tillage, rotation and perennialization effects on particulate and aggregate soil organic matter[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 371–380.

[6] Wen Y J, Tang Y F, Wen J, et al. Variation of intra-aggregate organic carbon affects aggregate formation and stability during organic manure fertilization in a fluvo-aquic soil[J]. *Soil Use and Management*, 2021, 37(1): 151–163.

[7] 赵立欣, 孟海波, 沈玉君, 等. 中国北方平原地区种养循环农业现状调研与发展分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(18): 1–10.

[8] Bosch-Serra À D, Yagüe M R, Poch R M, et al. Aggregate strength in calcareous soil fertilized with pig slurries[J]. *European Journal of Soil Science*, 2017, 68(4): 449–461.

[9] Chen Z M, Wang Q, Ma J W, et al. Soil microbial activity and community composition as influenced by application of pig biogas slurry in paddy field in southeast China[J]. *Paddy and Water Environment*, 2020, 18(1): 15–25.

[10] 袁晶晶, 齐学斌, 赵京, 等. 生物炭配施沼液对土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(1): 80–86.

[11] Hu N J, Wang B J, Gu Z H, et al. Effects of different straw returning modes on greenhouse gas emissions and crop yields in a rice-wheat rotation system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 223: 115–122.

[12] Xu X R, Pei J B, Xu Y D, et al. Soil organic carbon depletion in global Mollisols regions and restoration by management practices: A review[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(3): 1173–1181.

[13] Liu X J A, Sun J R, Mau R L, et al. Labile carbon input determines the direction and magnitude of the priming effect[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 109: 7–13.

[14] 唐蛟, 王威, 潘飞飞, 等. 沼液灌施对潮土土壤团聚体组成及稳定性的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(2): 10–17.

[15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[16] 周孟棕, 高焕平, 刘世亮, 等. 秸秆与氮肥配施对潮土微生物活性及团聚体分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(1): 340–345.

[17] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology*

- and Biochemistry, 2000, 32(14): 2099–2103.
- [18] Du Z J, Chen X M, Qi X B, et al. The effects of biochar and hoggery biogas slurry on fluvo-aquic soil physical and hydraulic properties: A field study of four consecutive wheat-maize rotations[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(8): 2050–2058.
- [19] 袁嫚嫚, 邬刚, 胡润, 等. 秸秆还田配施化肥对稻油轮作土壤有机碳组分及产量影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 27–35.
- [20] 郑学博, 樊剑波, 周静. 沼液还田对旱地红壤有机质及团聚体特征的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(16): 3201–3210.
- [21] 李慧, 代新俊, 高志强. 夏闲期耕作对黄土高原旱地麦田土壤水稳性团聚体稳定性的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(13): 2524–2534.
- [22] Fei C, Zhang S R, Li J L, et al. Partial substitution of rice husks for manure in greenhouse vegetable fields: Insight from soil carbon stock and aggregate stability[J]. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(14): 3962–3972.
- [23] 刘红梅, 李睿颖, 高晶晶, 等. 保护性耕作对土壤团聚体及微生物学特性的影响研究进展[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(6): 1277–1284.
- [24] Hu Y G, Wang Z R, Zhang Z S, et al. Alteration of desert soil microbial community structure in response to agricultural reclamation and abandonment[J]. *CATENA*, 2021, 207: 105678.
- [25] 毛霞丽, 陆扣萍, 何丽芝, 等. 长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. *土壤学报*, 2015, 52(4): 828–838.
- [26] 韩明钊, 赵雨森, 翟国庆, 等. 有机物料添加对黑土团聚体稳定性及有机碳影响[J]. *东北林业大学学报*, 2021, 49(5): 109–114.
- [27] 刘哲, 韩霁昌, 孙增慧, 等. 外源新碳对红壤团聚体及有机碳分布和稳定性的影响[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(6): 2351–2359.
- [28] 郭瑞华, 靳红梅, 常志州, 等. 秸秆还田模式对土壤有机碳及腐植酸含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(4): 727–733.
- [29] 张赛, 王龙昌. 保护性耕作对土壤团聚体及其有机碳含量的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(4): 263–267, 272.