

旱作红壤团聚体稳定性对沼液化肥混合溶液的响应研究

阮仁杰^{1, 2}, 屠人凤^{1, 2*}, 李 阳^{2, 3}, 胡宏祥^{1, 2}, 吴 俊⁴

(1. 安徽农业大学/农田生态保育与污染防治安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230036;
2. 安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036; 3. 中国农业大学土地科学与技术学院,
北京 100193; 4. 安徽禾美环保集团有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘 要: 利用沼液化肥混合溶液作为分散介质对红壤团聚体进行湿筛, 探讨旱作红壤团聚体稳定性对沼液化肥混合溶液的响应机制, 为推广沼液合理农用提供理论依据。试验共设 7 个处理: CF1 (100% 化学 N); CF2 (80% 化学 N+20% 沼液 N); CF3 (60% 化学 N+40% 沼液 N); CF4 (40% 化学 N+60% 沼液 N); CF5 (20% 化学 N+80% 沼液 N); F (100% 沼液 N); CK (纯水)。各混合物总 N、P、K 保持一致, N、P₂O₅、K₂O 分别为 120、90、135 kg·hm⁻²。分析各处理下土壤 >0.25 mm 水稳定性团聚体含量 (WR_{0.25})、团聚体平均质量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD)、团聚体稳定率 (AR) 和分形维数 (D) 等团聚体稳定性指标。从 CF1 处理依次至 CK 处理, WR_{0.25}、MWD、GMD 以及 AR 大致呈现上升的趋势, D 呈现下降的趋势; 各处理均以 <0.25 mm 水稳性团聚体含量最高 (30.9% ~ 33.9%); 各处理 WR_{0.25} 较供试土壤样品的 >0.25 mm 机械性团聚体含量 (DR_{0.25}) 均有大幅度的下降。随着混合溶液中沼液用量的增加, WR_{0.25}、MWD、GMD 以及 AR 都呈现上升的趋势, D 呈现下降的趋势。化肥水溶液中离子对土壤团聚体具有冲击作用, 土壤团聚体的破坏主要表现为破坏大团聚体, 形成小团聚体, 而有机大分子可以减弱团聚体的分散作用。随着混合溶液中有机物质的增加, 土壤团聚体的水稳定性增加。

关键词: 旱作红壤; 团聚体稳定性; 沼液化肥配比; 湿筛法

红壤是我国南方地区的主要土壤类型, 在我国农业发展以及国民经济的持续发展中扮演着重要的角色。但由于红壤本身性质较弱以及人类不合理的利用, 我国南方红壤区生态环境恶化, 土壤结构遭到破坏^[1]。土壤团聚体是土壤结构的基本单元, 是土壤肥力的载体^[2], 能够反映土壤的物理、化学、生物学特性, 在土壤的形成与发展中扮演着重要的角色。它由土壤颗粒在自然环境的影响下以胶结物质为媒介通过多级团聚过程形成^[3]。目前, 相关研究多集中在土壤团聚体的机械稳定性和水力学稳定性方面。近年来, 以沼气为纽带的“种

养结合”模式不仅有效地解决了农业废弃物带来的环境污染问题, 同时, 产出的沼液在农业生产中得到了较为广泛的应用, 在提高作物产量, 改善作物品质以及改良土壤结构方面都产生了积极的作用, 但关于沼液农用对土壤团聚体影响的报道颇少。大田试验中发现, 相对纯化肥施用, 沼液化肥配合施用能显著提高旱作红壤机械稳定性、水稳定性团聚体含量及团聚体机械稳定性, 但作用机理尚未探明。由于每年沼液产出量巨大, 研究沼液对土壤团聚体含量影响对于推广沼液合理农用意义重大。研究表明沼液中成分复杂, 除含有丰富的常量元素和微量元素外, 还含有较多的维生素、氨基酸、水解酶、植物激素等, 沼液合理农用能够在一定程度上减少作物病害, 提高作物品质^[4]。同时, 沼液作为有机肥料, 合理农用不仅能够解决能源浪费问题, 还能改善土壤生态环境, 提高土壤产出能力^[4]。刘希玉等^[5]发现, 土壤中碳能够提高土壤团聚体的稳定性, 促进大团聚体和微团聚体的形成, 土壤团聚体中的氮含量与施肥方式密切相关, 长期施肥尤其是施用有机肥有利于促进红壤水稻土中大团聚体

收稿日期: 2020-04-28; 录用日期: 2020-06-29

基金项目: 安徽省教育厅科研项目 (KJ2017A159); 农田生态保育与污染防治安徽省重点实验室开放基金 (FECPP201703); 国家科技重大专项 (2017ZX07603-002-002)。

作者简介: 阮仁杰 (1996-), 男, 安徽人, 硕士研究生, 主要从事农业资源环境工作。E-mail: ruanrenjwxy@163.com。屠人凤 (1983-), 男, 安徽人, 讲师, 博士, 主要从事农业资源环境教科科研工作。E-mail: turenfeng@ahau.edu.cn。

通讯作者: 屠人凤, E-mail: turenfeng@ahau.edu.cn。

的形成。沼液在施肥的过程中, 会向土壤中带入较多的离子, 有研究表明, 土壤溶液中一价可溶性阳离子对于 >0.25 mm 团聚体具有分散作用, 三价可溶性阳离子对 ≤ 0.25 mm 团聚体具有絮凝或再团聚作用, 而二价可溶阳离子同时存在分散和絮凝作用; 不同粒径的团聚体在同种盐溶液下表现出不一致的响应倾向^[6]。同时, 有机肥施用可提高土壤团聚体水稳性, 抑制离子对团聚体的分散作用^[7], 提高 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 含量, 同时影响土壤 pH 和磷素有效性, 进而影响大团聚体稳定性^[8]。水力学稳定性作为评价土壤结构体特征的重要指标, 前人研究大多数采用纯水分散湿筛的方法, 但土壤溶液并非纯水, 特别是施肥后土壤溶液成分、浓度急剧变化, 溶液性状、离子类型及含量均会影响土壤颗粒的团聚。沼液化肥配施与纯化肥施用相比, 施肥的同时也是灌溉的过程, 溶液中离子复杂且还有较丰富的有机质, 该溶液会对土壤团聚体产生冲击, 因此, 利用沼液作为分散介质分析团聚体组成, 更符合实际生产状况; 分析不同配比溶液下土壤团聚体的分布, 探讨旱作红壤团聚体稳定性对沼液化肥混合溶液的响应机制和推广沼液合理农用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤样品为旱地红壤, 取自江西省余江县鹰潭红壤生态试验站 ($116^{\circ} 5' \text{ E}$, $28^{\circ} 12' \text{ N}$)。气候属于亚热带季风气候, 年均温为 17.8°C , 多年平均降水量约 1842 mm。分别采集了耕层 ($0 \sim 20$ cm) 原状土壤样品以及扰动样品。原状土用于土壤团聚体分析, 用木盒盛装防止运输途中破坏, 室内风干后将其掰成 1 cm^3 大小的土块, 经振动干筛机分为不同粒级的团聚体备用。扰动样品用于测定土壤的部分理化性质, 其主要理化性质为: pH 5.30, 有机碳 $7.90 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 总氮 $0.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $62.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $126.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验开展于 2018 年 30°C 恒温室内, 共设 7 个沼液化肥混合液处理: CF1 (100% 化学 N)、CF2 (80% 化学 N+20% 沼液 N)、CF3 (60% 化学 N+40% 沼液 N)、CF4 (40% 化学 N+60% 沼液 N)、

CF5 (20% 化学 N+80% 沼液 N)、F (100% 沼液 N)、CK (纯水)。各混合物总 N、P、K 保持一致, N、 P_2O_5 、 K_2O 分别为 120、90、135 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 具体施肥量见表 1。

表 1 每升混合溶液中化肥和沼液的用量

处理	尿素 (g)	磷酸二氢钾 (g)	氯化钾 (g)	沼液 (mL)
CF1	1.72	1.14	1.40	0
CF2	1.38	1.12	1.24	200
CF3	1.02	1.10	1.06	400
CF4	0.68	1.08	0.90	600
CF5	0.34	1.06	0.72	800
F	0	1.04	0.54	1000
CK	0	0	0	0

表 1 为各试验处理每升混合溶液中需要添加的化肥和沼液用量, 不足一升的用纯水补足。所使用化肥为尿素 (N 46%)、磷酸二氢钾 (P_2O_5 24%、 K_2O 27%) 和氯化钾 (K_2O 60%)。供试沼液采集于养猪场正常产气的沼液池, 地处安徽省合肥市肥东县, 试验前一天采集, 经多层纱布过滤, pH 7.4、总氮 $789 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、总磷 $21.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、总钾 $453 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.3 分析方法

机械团聚体稳定性 (干筛法): 将风干土样过孔径 5、2、1 和 0.25 mm 土筛, 分 >5 、 $2 \sim 5$ 、 $1 \sim 2$ 、 $0.25 \sim 1$ 、 $<0.25 \text{ mm}$ 5 个级别, 过筛后收集并计算出各粒级团聚体所占风干总土样质量的比例。经计算得 $>0.25 \text{ mm}$ 机械性团聚体含量 ($\text{DR}_{0.25}$) 为 95.42%。

水稳定性团聚体 (湿筛法): 将各粒级土粒按干筛法比例配成 50 g 土壤样品, 沿容器壁缓慢加入 CF1、CF2、CF3、CF4、CF5、F、CK 处理相同的沼液化肥混合溶液 300 mL, 浸泡土壤 24 h, 然后将各处理样品完全转移至 1 L 有机玻璃沉降筒中, 相应混合溶液补充至 600 mL, 封闭沉降筒, 使沉降筒中土壤悬液上下翻动 5 min ($30 \text{ 次} \cdot \text{min}^{-1}$)。将分散好的土壤样品转移至淹没在相应浓度化肥沼液混合溶液的一套土筛上, 筛孔从上到下依次为 5、2、1 和 0.25 mm , 在水中上下晃动数次, 将留在各筛子上的团聚体小心冲洗至蒸发皿, 水浴蒸干后移至烘箱烘干至恒重, 计算土壤团聚体组成。以上各处理重复 3 次。

1.4 数据处理

利用各粒级团聚体数据, 计算团聚体平均质量直径 (MWD, mm)、几何平均直径 (GWD, mm)、土壤团聚体稳定率 (AR, %) 和质量分形维数 (D), 计算公式:

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i \times W_i$$

$$GWD = \text{Exp} \left[\frac{\sum_{i=1}^n W_i \times \ln X_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right]$$

式中: X_i 为任一级别的平均土壤团聚体直径, 数值上等于相邻两级筛孔的平均值, >5 mm 团聚体直径上限为 10 mm; W_i 为对应的团聚体百分比。

$$AR = \frac{WR_{0.25}}{DR_{0.25}} \times 100\%$$

式中: $DR_{0.25}$ 为 >0.25 mm 机械稳定性团聚体含量 (%), $WR_{0.25}$ 为 >0.25 mm 水稳性团聚体含量 (%). 质量分形维数 (D) 的计算采用杨培岭等^[9]推导的公式:

$$D = 3 - \lg \frac{M(r < X_i)}{M} / \lg \left(\frac{X_i}{X_{\max}} \right)$$

式中: X_i 为任一级别的平均土壤团聚体直径, 数值上等于相邻两级筛孔的平均值, >5 mm 团聚体直径上限为 10 mm; $X_{\max}$ 为最大粒级的平均粒径; $M(r < X_i)$ 为粒径小于 X_i 的团聚体的重量, M 为团聚体总重量。以 $\lg(X_i/X_{\max})$ 为横坐标, $\lg[M(r < X_i)/M]$ 为纵坐标, 最小二乘法直线拟

合, 计算其斜率, 最后由斜率推算得到质量分形维数 D 。

2 结果与分析

2.1 不同处理下水稳性团聚体数量的分布

表 2 为通过湿筛法获得的水稳性团聚体的分布情况。从表 2 可知, 各处理均以 <0.25 mm 水稳性团聚体含量最高 (30.34% ~ 38.12%), 其次为 >5 mm 水稳性团聚体 (22.69% ~ 29.04%)。5 ~ 2 和 2 ~ 1 mm 水稳性团聚体含量较少, 其中 CF1、CF2、CF3 以及 CK 处理 2 ~ 1 mm 水稳性团聚体含量最低 (6.39% ~ 9.57%), CF1、CF4、CF5 以及 F 处理 5 ~ 2 mm 水稳性团聚体含量最低 (8.53% ~ 9.77%)。各处理 >0.25 mm 水稳性团聚体含量 ($WR_{0.25}$) 均较高 (61.88% ~ 69.66%), 但相比较供试土壤样品的 >0.25 mm 机械性团聚体含量 ($DR_{0.25}$) 95.42% 均有大幅度的下降, 降幅依次为 35.15%、34.35%、30.25%、32.78%、29.75%、27.35% 和 27.00%, CK 处理的 $WR_{0.25}$ 最高, 降幅最低, 除 CF4 处理外, 随着混合溶液中沼液含量的增加, $WR_{0.25}$ 逐渐增加, 较 $DR_{0.25}$ 下降比依次降低。该现象表明, 用纯水和沼液化肥混合溶液作为分散介质湿筛, 对 >0.25 mm 团聚体具有冲击作用, 使其分散为粒径更小的团聚体, 纯水的冲击作用最小, 沼液化肥混合溶液中随着沼液含量的增加, 对 >0.25 mm 团聚体的冲击作用减弱。

表 2 不同处理下土壤水稳性团聚体组成

(%)

处理	团聚体粒径 (mm)					$WR_{0.25}$
	>5	5 ~ 2	2 ~ 1	1 ~ 0.25	<0.25	
CF1	29.04 ± 1.17a	8.53 ± 3.81d	6.39 ± 3.76e	17.92 ± 2.53c	38.12 ± 0.59a	61.88 ± 0.37d
CF2	22.69 ± 4.30c	10.82 ± 7.32ab	8.49 ± 2.50d	20.64 ± 1.23b	37.36 ± 1.74a	62.64 ± 1.04d
CF3	24.59 ± 3.28b	10.43 ± 0.95abc	9.49 ± 2.24c	22.05 ± 1.73a	33.44 ± 0.34c	66.56 ± 0.17b
CF4	22.93 ± 0.68c	9.77 ± 1.30bc	11.19 ± 3.16a	20.25 ± 1.61b	35.86 ± 1.97b	64.14 ± 1.10c
CF5	27.73 ± 2.19a	8.57 ± 5.78d	9.80 ± 0.58bc	20.93 ± 5.74ab	32.97 ± 0.47c	67.03 ± 0.23b
F	28.91 ± 1.91a	9.60 ± 0.59cd	10.35 ± 0.68b	20.46 ± 1.24b	30.68 ± 1.38d	69.32 ± 0.61a
CK	28.11 ± 1.66a	11.17 ± 6.71a	9.57 ± 3.69c	20.81 ± 0.75ab	30.34 ± 0.75d	69.66 ± 0.32a

注: 同一列中不同小写字母代表 0.05 水平下差异显著。下同。

2.2 不同处理下水稳性团聚体的平均质量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD)

土壤团聚体稳定性是土壤物理质量的综合体现^[10], 研究表明 (表 3), 各处理的 MWD 大小顺序为 CK>F>CF5=CF1>CF3>CF4>CF2, GMD 的大小顺序为 CK>F>CF5>CF3>CF1>CF4>CF2, 除 CF1 处理外, 各处理的 MWD 和 GMD 的大小顺序均和 $WR_{0.25}$ 一致。这与郑学博等^[11] 研究中发现的 MWD、GMD 与 >0.25 mm 团聚体含量呈线性正相关符合。从表 2 中可得 CF1 处理 >5 mm 水稳性团聚体含量在各处理中最高, 且与 CF2、CF3、CF4 处理在 0.05 水平上存在显著差异, 所以 CF1 处理的 MWD 和 GMD 均高于 CF2 和 CF4 处理。由于在配比用于湿筛的土壤样品过程中, 只能保证各粒级质量相等, 而不能确保各粒级颗粒大小完全一致, 在 >5 mm 团聚体中的表现更为明显, 这可能是造成 CF1 处理 >5 mm 水稳性团聚体含量在各处理中最高的原因之一。F 处理的 MWD 和 GMD 与 CK 处理差异较小, 在 0.05 水平上差异不显著, 说明全沼液溶液对土壤团聚体的冲击作用接近于纯水溶液, 对大团聚体的破坏程度较小。

表 3 不同处理土壤水稳性团聚体平均质量直径和几何平均直径 (mm)

处理	平均质量直径	几何平均直径
CF1	2.05b	0.99c
CF2	1.86d	0.92d
CF3	1.96c	1.00c
CF4	1.87d	0.95d
CF5	2.05b	1.04b
F	2.14a	1.11a
CK	2.15a	1.12a

2.3 不同处理下土壤团聚体稳定率

由图 1 可知, 各处理下土壤团聚体稳定率的大小顺序为 CK>F>CF5>CF3>CF4>CF2>CF1, 该顺序与 $WR_{0.25}$ 一致, CF2、CF3、CF4、CF5、F 和 CK 处理较 CF1 处理相比, 土壤团聚体稳定率增幅依次为 1.23%、7.56%、3.65%、8.32%、12.02% 和 12.57%。CF1 处理除了和 CF2 处理在 0.05 水平上差异不显著外, 和其他处理差异均显著。除 CF4 处

理外, 从 CF1 到 F 处理, 随着沼液浓度的增加, 土壤团聚体稳定率增大。通过对沼液含量与团聚体稳定率进行拟合 (图 2), 发现两者呈线性正相关关系 ($R^2=0.80406$), 与图 1 所得结论一致, 说明沼液化肥混合溶液中沼液含量是决定土壤团聚体稳定率大小的主要因素之一。

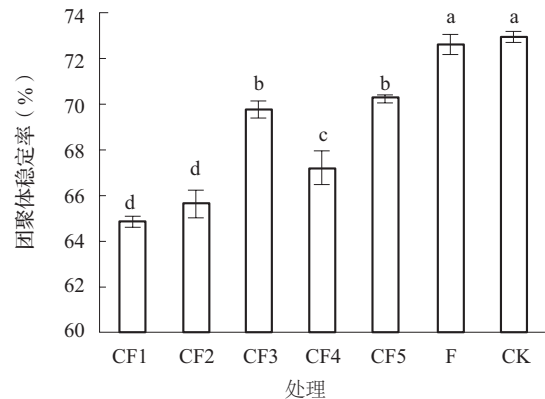


图 1 各处理团聚体稳定率

注：柱上不同小写字母表示 0.05 水平下差异显著。下同。

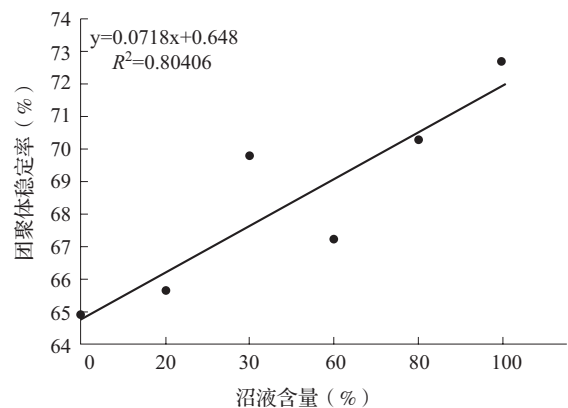


图 2 沼液含量与团聚体稳定率的拟合

2.4 不同处理下的分形维数

图 3 和图 4 是关于分形维数的相关图形分析。从图 3 可知, 各处理分形维数的范围为 2.677 ~ 2.739, CK 处理最低, 除 CK 处理外, CF1 处理最高, F 处理最低。其中 CF4 处理分形维数大于 CF3 处理, 而其余的后一个处理的分形维数均小于前一个处理, 由此可得, 随着沼液化肥混合溶液中沼液含量的增加, 分形维数呈现下降的趋势 (CF4 除外)。图 4 显示了沼液含量与分形维数的拟合情况 ($R^2=0.80124$), 与图 3 结论一致。这与 $WR_{0.25}$ 和团聚体稳定率呈现相反的趋势。

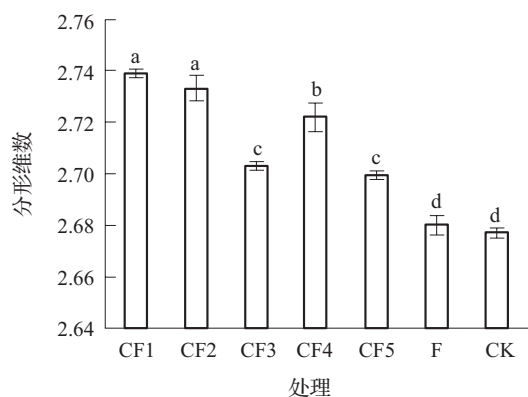


图3 各处理分形维数

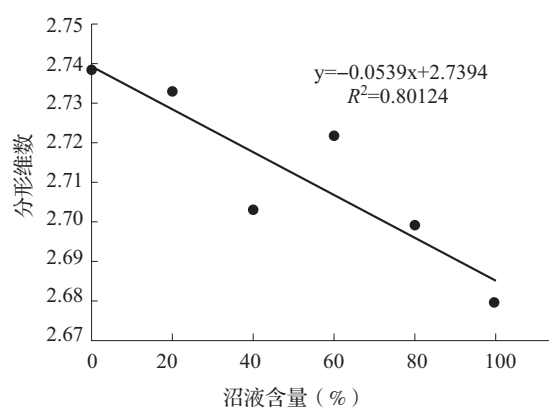


图4 沼液含量与分形维数的拟合

3 讨论

3.1 土壤团聚体稳定率

本试验利用沼液化肥混合溶液作为分散介质,当土壤样品与之完全接触时,实际上与溶液中的水、各种离子以及有机质进行了充分的接触。Bissonnais^[12]研究表明,当干燥的土壤遇水快速润湿时,土粒迅速被水包被,土壤团聚体孔隙中的空气无法及时排出,再加上水的进入导致团聚体内部产生巨大压力,团聚体破裂,即水溶液的消散作用。混合溶液中含有大量的离子电解质,牛华玲等^[13]研究表明,土壤团聚体破裂的本质是土壤所处的溶液电解质浓度降低,土壤颗粒表面电场迅速增强,在短时间内在颗粒之间形成强大的静电排斥力,导致团聚体破裂。溶液中电解质对土壤团聚体的破坏作用主要表现为破坏大团聚体、形成小团聚体^[14]。从团聚体的形成角度去考虑,一般认为,大团聚体是由寿命短暂的菌丝和根系将微团聚体胶结起来形成的,而微团聚体则由一些更为稳定的有机组分所决定^[15]。从水溶液对土壤

团聚体的消散作用以及电解质对土壤团聚体的作用可以解释各处理均以 $<0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量最高这一结果和各处理 $WR_{0.25}$ 均小于 $DR_{0.25}$ 的原因。有机质在土壤团聚体的形成过程中扮演着重要的角色^[10],团聚体和有机质是保持土壤结构和肥力的基础,二者相互作用,不可分割,前者是后者存在的场所,后者是前者存在的胶结物质^[16]。黄学茹等^[17]指出,在土壤团聚体的形成和稳定方面,土壤电场带来的是斥力,它导致团聚体分散;有机大分子增强的是引力,它阻止团聚体的分散。Tombácz 等^[18]认为在自然水体系中,有机大分子与土壤矿质颗粒表面发生配位反应,增加了水分散体系胶体稳定性。在本试验中,随着混合溶液中沼液用量的增加,体系中的有机大分子也随之增加,颗粒与颗粒之间的引力增大,能够减弱离子对团聚体的冲击作用。因此,随着沼液用量的增加, $WR_{0.25}$ 呈现上升的趋势。在全沼液处理中,体系中必然存在离子态物质,尽管有机物质含量较高,也避免不了这部分离子对团聚体的冲击,这可以解释 F 处理的 $WR_{0.25}$ 小于又非常接近于 CK 处理这一现象。

3.2 土壤结构特性

关于土壤结构特性的评价指标,学术界普遍采用筛分方法,测得直径 $>0.25\text{ mm}$ 的团聚体含量作为指标。为了更加全面地反映团聚体的大小和含量等综合信息,更加准确地评价团聚体的质量水平^[19], van Bavel^[20]采用加权求和方法提出了结构体平均质量直径 (MWD) 的概念, Gardner^[21]在此基础上提出了几何平均直径的 (GMD) 的概念。在本试验中,随着混合溶液中沼液用量的增加, $WR_{0.25}$ 、AR、MWD、GMD 大致呈现上升的趋势。根据郑学博等^[11]研究所得“ $>0.25\text{ mm}$ 团聚体含量越高, MWD、GMD 越大, AR 越大, 团聚体稳定性越强, 土壤抗蚀能力越强”, 不难得出“随着混合溶液中有机物质的增加, 土壤团聚体水稳定性增强”这一结论。

近些年来,也有人运用分形理论研究土壤团聚体的分布状况^[22-23]。Castrignanò 等^[24]将分形理论运用于土壤团聚体评价的研究之中,提出分形维数 (D) 概念,土壤团聚体分形维数越大,则团聚体的分散度越大,当 D 接近 2 时,表明团聚体主要由数量很少的大团聚体组成,随着 D 的增大,土壤中小级别团聚体的数量随之增加。从图 3 可以看出,各

处理分形维数都在 2.66 之上, 表明各处理土壤主要由中小团聚体组成, 大团聚含量较低, 团聚体分散度较高。随着沼液用量的增加, 分形维数呈现下降的趋势, 团聚体的分散度下降, 即有机大分子能够减弱混合溶液对团聚体的分散作用。

由于沼液成分的复杂性, 利用沼液作为试验材料, 无法定量控制各种沼液成分的含量, 对试验结果会有一定的影响, 这是本试验的不足之处。在今后进一步的研究中, 可以定量模拟沼液中的主要成分, 从而排除天然沼液复杂性对试验的影响。通过控制变量法和多元线性回归分析, 研究沼液中各种不同主要成分对试验结果的影响, 进而得出更加准确的结论。

4 结论

随着混合溶液中沼液用量的增加, >0.25 mm 团聚体含量、团聚体稳定率、平均质量直径和几何平均直径都呈现上升的趋势, 分形维数呈现下降的趋势。水溶液以及离子对土壤团聚体具有冲击作用, 使土壤团聚体破裂, 土壤团聚体的破坏主要表现为破坏大团聚体, 形成小团聚体, 而有机大分子可以减弱团聚体的分散作用。随着混合溶液中有机物质的增加, 土壤团聚体的水稳定性增加。

参考文献:

- [1] 赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策 [J]. 生态学报, 2013, 33 (24): 7615-7622.
- [2] 乔丹丹, 吴名字, 张倩, 等. 秸秆还田与生物炭施用对黄褐土团聚体稳定性及有机碳积累的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2018 (3): 92-99.
- [3] Hadas A. Long-term tillage practice effects on soil aggregation modes and strength [J]. Soil Science Society of America Journal, 1987, 51 (1): 191-197.
- [4] 涂成, 闫湘, 李秀英, 等. 沼渣沼液农用安全风险 [J]. 中国土壤与肥料, 2018 (4): 8-13, 27.
- [5] 刘希玉, 王忠强, 张心昱, 等. 施肥对红壤水稻土团聚体分布及其碳氮含量的影响 [J]. 生态学报, 2013, 33 (16): 4949-4955.
- [6] 徐爽. 化学物质对土壤团聚体稳定性及其它物理性状的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [7] Hao X Y, Chang C. Effect of 25 annual cattle manure applications on soluble and exchangeable cations in soil [J]. Soil Science, 2002, 167 (2): 126-134.
- [8] Whalen J K, Chi C, Clayton G W, et al. Cattle manure amendments can increase the pH of acid soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64 (3): 962-966.
- [9] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征 [J]. 科学通报, 1993, 38 (20): 1896-1899.
- [10] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review [J]. Geoderma, 2005, 124 (1-2): 3-22.
- [11] 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.
- [12] Bissonnais Y L. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology [J]. European Journal of Soil Science, 1996, 47: 425-437.
- [13] 朱华玲, 李航, 贾明云, 等. 土壤有机/无机胶体凝聚的光散射研究 [J]. 土壤学报, 2012, 49 (3): 409-416.
- [14] 邵婷婷. 第四纪粘土红壤团聚体在不同 pH 和电解质条件下的破碎特征 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- [15] 殷明. 长期不同施肥对黑土基本性状及土壤有机碳组成的影响 [D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- [16] 史振鑫, 吴景贵. 不同处理牛粪对黑土团聚体组成与稳定性的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2013 (4): 10-15.
- [17] 黄学茹, 李航, 李嵩, 等. 土壤电场与有机大分子的耦合对土壤团聚体稳定性的影响 [J]. 土壤学报, 2013, 50 (4): 734-742.
- [18] Tombácz E, Szekeres M. Colloidal behavior of aqueous montmorillonite suspensions: the specific role of pH in the presence of indifferent electrolytes [J]. Applied Clay Science, 2015, 27 (1): 75-94.
- [19] 马征, 董晓霞, 张柏松. 不同保水剂对土壤团聚体组成及微生物量碳、氮的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2018 (5): 122-128.
- [20] van Bavel C H M. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation [J]. Soil Science Society of America Journal, 1950, 14 (C): 20-23.
- [21] Gardner W R. Representation of soil aggregate-size distribution by a logarithmic-normal distribution1, 2 [J]. Soil Science Society of America Journal, 1956, 20 (2): 151-153.
- [22] 孙天聪, 李世清, 邵明安. 半湿润区长期施肥对土壤结构体分形特征的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13 (3): 417-422.
- [23] 周虎, 吕贻忠, 杨志臣, 等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响 [J]. 中国农业科学, 2007, 40 (9): 1973-1979.
- [24] Castrignanò A, Stelluti M. Fractal geometry and geostatistics for describing the field variability of soil aggregation [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 73 (1): 13-18.

Study on the response of the stability of red soil aggregates to chemical fertilizer mixture with biogas slurry in dryland farming

RUAN Ren-jie^{1, 2}, TU Ren-feng^{1, 2*}, LI Yang^{2, 3}, HU Hong-xiang^{1, 2}, WU Jun⁴ (1. Anhui Province Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention, Anhui Agricultural University, Hefei Anhui 230036; 2. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei Anhui 230036; 3. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193; 4. Anhui Hemei Environmental Protection Group Co. Ltd., Hefei Anhui 230000)

Abstract: Wet sieving of red soil aggregates with biogas slurry and fertilizer mixture as dispersive medium is conducted to explore the response mechanism of the stability of dryland farming red soil aggregates to biogas slurry and fertilizer mixture and to provide theoretical basis for popularizing rational agricultural use of biogas slurry. This experiment consists of seven treatments; CF1 (100% chemical N); CF2 (80% chemical N+20% biogas slurry N); CF3 (60% chemical N+40% biogas slurry N); CF4 (40% chemical N+60% biogas slurry N); CF5 (20% chemical N+80% biogas slurry N); F (100% biogas slurry N); CK (pure water). The total N, P and K of each mixture are equal, and the N-P₂O₅-K₂O is 120-90-135 kg · hm⁻². The soil >0.25 mm water stable aggregate content (WR_{0.25}), aggregate average mass diameter (MWD), geometric average diameter (GMD), aggregate stability (AR) and fractal dimension (D) were analyzed. From CF1 treatment to CK treatment, WR_{0.25}, MWD, GMD and AR show an upward trend, while D shows a downward trend. In each treatment, the content of water stable aggregate < 0.25 mm is the highest (30.9% ~ 33.9%). The content of WR_{0.25} in each treatment is significantly lower than that of >0.25 mm mechanical aggregate (DR_{0.25}) in the tested soil samples. With the increase of the biogas slurry in mixed solution, WR_{0.25}, MWD, GMD and AR all show an upward trend, while D shows a downward trend. Aqueous solution and ions have an impact on soil aggregates, and the destruction of soil aggregates is mainly manifested as the destruction of large aggregates and the formation of small aggregates, while organic macromolecules can weaken the dispersion of aggregates. The water stability of soil aggregates increases with the increase of organic matter in the mixed solution.

Key words: dryland red soil; stability of aggregates; chemical fertilizer ratio of biogas slurry; wet sieving method