

决超,杨因君,王盛荣. 化肥配施微生物菌肥及改良基质对土壤团聚体有机碳及微生物菌群结构的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(19): 237-244.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.19.034

化肥配施微生物菌肥及改良基质对土壤团聚体有机碳及微生物菌群结构的影响

决超¹, 杨因君¹, 王盛荣²

(1. 商丘职业技术学院, 河南商丘 476000; 2. 河南省农村社会事业发展服务中心, 河南郑州 450003)

摘要:为探究化肥与不同比例微生物菌肥及改良基质配施对土壤团聚体有机碳及微生物菌群结构的影响,通过 3 年田间定位试验,设不施肥(CK)、单施化肥(T1)、50% 化肥 + 50% 微生物菌肥(T2)、50% 化肥 + 50% 微生物菌肥 + 改良基质(T3)、70% 化肥 + 30% 微生物菌肥(T4)、70% 化肥 + 30% 微生物菌肥 + 改良基质(T5)6 个处理,分析不同施肥处理对土壤团聚体组成、稳定性、团聚体有机碳及微生物菌群结构的影响。结果表明,与 CK 处理相比,T5 处理 >2.000 mm 粒径团聚体含量及 MWD 值、GMD 值、 $R_{0.25}$ 值分别显著提高 15.61%、9.71%、12.71%、6.82%,T5 处理 <0.053、0.053~0.250、>0.250~2.000 mm 粒径团聚体含量及 D 值分别显著降低 17.68%、25.21%、8.84%、4.92%。连续不同施肥 3 年后,T2、T3、T4、T5 处理土壤有机碳含量较 CK 处理分别显著提高 5.64%、9.28%、7.51%、13.37%;与 CK 处理相比,T3 处理 0.053~0.250 mm 粒径团聚体有机碳含量显著提高 9.59%,T5 处理 >0.250~2.000、>2.000 mm 粒径团聚体有机碳含量分别显著提高 12.55%、10.95%;T5 处理 >2 mm 粒径有机碳相对贡献率较 CK 处理显著提高 14.77%,较其他施肥处理显著提高 5.40%~10.79%;与 CK 处理相比,T5 处理细菌、放线菌生物量以及细菌/真菌比值分别显著提高 6.81%、12.42%、15.79%,T3 处理革兰氏阳性菌生物量、 $G+/G-$ 比值分别显著提高 12.55%、11.86%;团聚体有机碳相对贡献率及微生物菌群结构变化与土壤团聚体稳定性密切相关。综上所述,合理比例微生物菌肥与化肥及改良基质配施能够提升土壤团聚体稳定性,提高土壤有机碳含量,改善土壤团聚体有机碳相对贡献率及土壤微生物菌群结构。

关键词:施肥;微生物菌肥;改良基质;团聚体;有机碳;微生物

中图分类号:S153;S532.06;S154.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)19-0237-08

近年来,随着农业高度集约化生产,作物长期连作种植以及化肥施用不合理造成土壤结构破坏、养分供应不均、微生物结构失调、产量及品质下降等问题,严重影响了我国农业可持续生产^[1-2]。有研究表明,改变种植制度或施肥方式是解决目前困境的有效途径^[3-5]。其中,通过调整种植制度来改善土壤质量往往需要年限较长,不能满足产业发展需求。因此,通过改变施肥方式提高土壤质量,改善土壤结构对农业可持续发展具有更重要的意义。

长期单一施用化肥会破坏土壤结构,造成土壤养分供应不均,生物学活性降低^[6-7]。而有研究表明,有机无机肥配施能够改善土壤质量,提高土壤微生物活性^[8-9]。赖金平等的研究表明,增施有机肥能够促进土壤大粒径团聚体形成,提高团聚体稳定性以及大粒径团聚体有机碳含量^[10]。张勇等的研究表明,化肥配施有机肥可以改变土壤团聚体结构组成,提高团聚体稳定性,增加土壤有机碳含量^[11]。孟庆英等的研究表明,化肥配施微生物菌肥能够提高大粒径团聚体含量,改变土壤真菌群落多样性^[12]。可见,增施有机肥能够对土壤团聚体及有机碳含量变化产生较大的影响。

土壤团聚体是由土粒径生物及非生物与环境因子相互作用形成,是土壤结构的基础物质^[13-15]。土壤团聚体是土壤中物质转化和能量循环的重要场所,其数量和质量直接或间接地影响土壤碳氮等元素循环与利用,是决定土壤肥力水平的重要因

收稿日期:2023-03-22

基金项目:河南省科技攻关项目(编号:182102110371);河南省高等学校重点科研项目(编号:23B210006)。

作者简介:决超(1981—),男,河南周口人,硕士,讲师,主要从事园艺专业教学、微生物科研及技术服务工作。E-mail:juechao2000@126.com。

通信作者:王盛荣,硕士,高级农艺师,主要从事农业技术推广及园艺作物新品种开发利用工作。E-mail:78935035@qq.com。

素^[16-17]。土壤有机碳是土壤养分供应和能量循环的核心物质,能够调节土壤养分供应能力,改善土壤微生态环境,其含量高低是评价农田土壤质量的重要指标^[18-19]。有研究发现,土壤团聚体通过对有机碳的包被作用将其与外界隔离,降低碳裸露,可以有效减缓有机碳分解^[20]。土壤微生物参与土壤有机碳形成、分解与转化的大多数过程,同时土壤有机碳也是微生物生命活动所需物质和能量的主要来源^[21]。因此,探究施肥方式对土壤团聚体有机碳及微生物菌群结构的影响有助于了解农田土壤肥力的变化规律。

微生物菌肥具有活化有机质、培肥地力,增加土壤生物学活性,减少环境污染等优势^[22-23]。土壤改良基质具有提高土壤透气性、提升土壤蓄水保肥能力、增加土壤生物学活性等特点^[24]。目前,无机有机肥配施对土壤团聚体有机碳影响的研究有很多,而关于化肥与微生物菌肥及土壤改良基质配施对土壤团聚体有机碳及微生物菌系结构影响的研究很少,且不同区域土壤类型、气候因素不尽相同^[25-26]。因此,本研究通过多年田间试验,探究化肥与不同比例微生物菌肥及改良基质配施对土壤团聚体及团聚体有机碳、微生物菌群结构的影响,揭示不同施肥条件下土壤团聚体有机碳及微生物菌群结构的变化规律,以期为豫东地区黄潮土微生物菌肥及土壤改良基质的合理应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2020—2022 年在河南省商丘职业技术学院试验示范基地附近农户(116°15'E,39°28'N)进行。该区域位于河南省东部,平均海拔 53 m,属暖温带半湿润季风气候。年均气温 14.2℃,年均日照时长 2 200 h,无霜期为 212 d。多年平均降水量 650~700 mm,年内降雨分布不均,主要集中在 6—9 月。供试土壤为黄潮土二合土质,播种前 0~20 cm 土壤理化性状:碱解氮含量为 32.65 mg/kg、速效磷含量为 43.21 mg/kg、有机质含量为 9.94 g/kg、速效钾含量为 134.56 mg/kg、有机碳含量为 10.12 g/kg、pH 值 8.12;团聚体质量分数:<0.053 粒径为 12.55%、0.053~0.250 mm 粒径为 15.85%、>0.250~2.000 mm 粒径为 21.72%、>2.000 mm 粒径为 49.88%。试验地前茬为多年马铃薯—玉米轮作种植。

1.2 试验材料

供试马铃薯:中薯 5 号脱毒种薯(中国农业科学院蔬菜花卉所);供试玉米:郑单 958(河南省农业科学院粮食作物研究所);供试肥料:马铃薯复合肥(N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 16%、5%、21%,中农舜天生态肥业公司);玉米复合肥(N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 10%、5%、15%,河南民丰肥业有限公司);微生物菌肥(有效活菌数≥2.0 亿 CFU/g,含 N 5.32%、P₂O₅ 3.18%、K₂O 4.16%、有机质 45.32%,枣阳美岛生物科技有限公司);土壤改良基质(由牛粪、蘑菇料和秸秆腐熟而成,含 N 4.19%、P₂O₅ 2.24%、K₂O 1.85%、有机质 29.19%)。

1.3 试验设计

试验设 6 个处理,分别为不施肥(CK),单施化肥(T1),50%化肥+50%微生物菌肥(T2),50%化肥+50%微生物菌肥+土壤改良基质(T3),70%化肥+30%微生物菌肥(T4),70%化肥+30%微生物菌肥+土壤改良基质(T5)。3 次重复,共计 18 个小区,随机区组排列。试验田种植制度为马铃薯—玉米轮作种植;耕作制度均为 0~20 cm 旋耕。其中马铃薯株行距 35 cm×45 cm,玉米株行距 30 cm×50 cm,小区面积 48 m²,走道 0.6 m,保护行 3 m。马铃薯季施肥量:单施化肥 600 kg/hm²;单施微生物菌肥 1 200 kg/hm²;土壤改良基质 15 000 kg/hm²;玉米季施肥不做特殊处理,均为复合肥(N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 10%、5%、15%)750 kg/hm²;马铃薯季在整地前均作为基肥一次性施入,生育期内不进行追肥;玉米季复合肥 70%作为基肥施入,30%在大喇叭口期进行追肥。马铃薯生育期:4 月 1 日至 6 月 10 日;玉米生育期:6 月 15 日至 10 月 8 日。马铃薯季、玉米季田间管理措施均不做特殊处理,按照当地种植习惯进行。

1.4 样品采集与试验方法

于 2022 年马铃薯收获期进行土壤样品采集。利用 5 点取样法采集 0~20 cm 土层样品,混匀后通过冰盒带回实验室。检出较大根系、石砾等杂物后,将土壤样品分成 2 份,一份自然风干,用于土壤团聚体组成、团聚体有机碳含量测定;另一份保存在 -40℃ 冰箱,用于土壤微生物菌群结构测定。并于 2021 年、2022 年采集土样测定土壤有机碳含量。

采用重铬酸钾容量-外加加热法^[27]进行土壤有机碳及团聚体有机碳含量测定。采用磷脂脂肪酸法^[28]进行土壤微生物菌群结构测定。采用干筛法

进行团聚体粒径测定,称取风干土样 100 g,放入从上到下装有 2.000、0.250、0.053 mm 的振荡套筛上,利用振荡式筛分仪在 200 次/min 频率下振荡 10 min 后,分别称取 <0.053、0.053 ~ 0.250、>0.250 ~ 2.000、>2.000 mm 粒径土壤质量,计算不同粒径质量分数。其中,平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、>0.250 mm 粒径团聚体($R_{0.25}$)含量和分形维数(D)计算公式如下^[16]:

$$\begin{aligned} \text{MWD} &= \sum_{i=1}^n (\overline{X_i} \times W_i); \\ \text{GMD} &= \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n M_i \times \ln \overline{X_i}}{\sum_{i=1}^n M_i} \right]; \\ R_{0.25} &= \frac{M_{i>0.25}}{M_i}; \\ D &= 3 - \frac{\lg \left[\frac{W(\delta < \overline{X_i})}{W_i} \right]}{\lg \left(\frac{X_i}{X_{\max}} \right)}. \end{aligned}$$

式中: $\overline{X_i}$ 为土壤不同粒径团聚体平均直径; W_i 为土壤不同粒径团聚体质量所占比值; M_i 为土壤不同粒径团聚体质量; $W(\delta < X_i)$ 为土壤粒径< X_i 粒径团聚体质量; W_i 为 100 g; X_{\max} 为>2 mm 粒径团聚体平均直径。

团聚体有机碳相对贡献率 = 某粒级团聚体有机碳含量 × 该粒级团聚体含量 / 土壤有机碳含量 × 100%。

1.5 数据处理

采用 WPS Excel 进行原始数据计算、分析与作

图;采用 SPSS 17.0 进行处理间差异显著性检验与相关性分析;采用 canoco 5.0 进行冗余(RDA)分析。

2 结果与分析

2.1 化肥配施菌肥及改良基质对土壤团聚体组成的影响

不同施肥处理土壤团聚体组成差异明显(表1)。各处理土壤团聚体以>2.000 mm 粒径为主,占比为 49.21% ~ 56.89%;其次是>0.250 ~ 2.000 mm 粒径,占比为 25.17% ~ 27.61%;0.053 ~ 0.250 mm 粒径与<0.053 mm 粒径所占比值较小,分别为 11.33% ~ 15.15%、6.61% ~ 8.03%。与 CK 处理相比,不同施肥处理均可提高>2.000 mm 粒径团聚体含量,降低<0.053、0.053 ~ 0.250、>0.250 ~ 2.000 mm 粒径团聚体含量。其中,T5 处理>2.000 mm 粒径团聚体含量最高,较 CK 处理显著提高 15.61% ($P < 0.05$),较其他施肥处理提高 11.00% ~ 4.91%,显著高于除 T3 处理外的其他施肥处理($P < 0.05$)。T5 处理<0.053、0.053 ~ 0.250、>0.250 ~ 2.000 mm 粒径团聚体含量均最低,较 CK 处理分别显著降低 17.68%、25.21%、8.84% ($P < 0.05$);<0.053、0.053 ~ 0.250 mm 粒径团聚体含量较其他处理分别显著降低 7.42% ~ 13.82%、7.66% ~ 20.66% ($P < 0.05$);>0.250 ~ 2.000 mm 粒径团聚体含量较 T1、T2 处理分别显著降低 7.60%、5.34% ($P < 0.05$),与 T3、T4 处理相比均无显著性差异。

表 1 不同处理土壤团聚体质量分数变化

处理	土壤团聚体质量分数(%)			
	<0.053 mm 粒径	0.053 ~ 0.250 mm 粒径	>0.250 ~ 2.000 mm 粒径	>2.000 mm 粒径
CK	8.03 ± 0.49a	15.15 ± 0.78a	27.61 ± 1.05a	49.21 ± 2.32c
T1	7.67 ± 0.42ab	13.87 ± 0.92b	27.24 ± 1.62a	51.46 ± 3.10c
T2	7.64 ± 0.33b	14.28 ± 0.40b	26.59 ± 0.83a	51.25 ± 1.89c
T3	7.14 ± 0.81c	12.27 ± 0.92c	26.36 ± 1.29ab	54.23 ± 2.25ab
T4	7.51 ± 0.25b	12.34 ± 0.63c	26.31 ± 1.61ab	53.84 ± 1.44b
T5	6.61 ± 0.23d	11.33 ± 0.73d	25.17 ± 1.34b	56.89 ± 2.17a

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异达到显著性水平($P < 0.05$),下表同。

2.2 化肥配施菌肥及改良基质对土壤团聚体稳定性的影响

不同施肥处理土壤团聚体平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、>0.250 mm 粒径团聚体($R_{0.25}$)含量以及分形维数(D)变化较大(表

2)。与 CK 处理相比,不同施肥处理均可提高 MWD 值、GMD 值、 $R_{0.25}$ 值,降低 D 值。其中,T5 处理 MWD 值、GMD 值、 $R_{0.25}$ 值均最高,较 CK 处理分别显著提高 9.71%、12.71%、6.82% ($P < 0.05$);MWD 值、GMD 值较 T1 处理分别显著提高 5.49%、6.40%

($P < 0.05$);MWD 值、GMD 值、 $R_{0.25}$ 值较 T2 处理分别显著提高 6.08%、8.13%、5.42% ($P < 0.05$),与 T3、T4 处理相比均无显著性差异。T5 处理 D 值最

低,较 CK 处理显著降低 4.92% ($P < 0.05$),与其他处理相比均无显著性差异。T3 处理 MWD 值、GMD 值、 $R_{0.25}$ 值、 D 值与 T4 处理相比均无显著性差异。

表 2 不同处理土壤团聚体稳定性变化

处理	平均质量直径(mm)	几何平均直径(mm)	>0.250 mm 粒径团聚体含量(%)	分形维数
CK	1.75 ± 0.09c	1.18 ± 0.06d	76.82 ± 5.46b	2.64 ± 0.15a
T1	1.82 ± 0.12bc	1.25 ± 0.10bc	78.70 ± 6.91ab	2.58 ± 0.09ab
T2	1.81 ± 0.06bc	1.23 ± 0.12cd	77.84 ± 5.52b	2.61 ± 0.14ab
T3	1.85 ± 0.05ab	1.27 ± 0.09abc	80.59 ± 8.17ab	2.56 ± 0.12ab
T4	1.89 ± 0.08ab	1.30 ± 0.06ab	80.15 ± 7.09ab	2.54 ± 0.07ab
T5	1.92 ± 0.04a	1.33 ± 0.08a	82.06 ± 4.11a	2.51 ± 0.18b

2.3 化肥配施菌肥及改良基质对土壤有机碳含量的影响

不同施肥年限下各处理土壤有机碳含量变化如图 1 所示。施肥第 1 年(2020 年)时,与 CK 处理相比,不同施肥处理土壤有机碳含量均不同程度地提高,但各处理间均无显著性差异。施肥第 2 年(2021 年)时,与 CK 处理相比,T3、T4、T5 处理土壤有机碳含量分别显著提高 5.81%、5.15%、8.66% ($P < 0.05$),T1、T2 处理无显著性变化;T5 处理土壤有机碳含量较 T1 处理显著提高 7.60% ($P < 0.05$),与 T2、T3、T4 处理相比均无显著性差异。施肥第 3 年(2022 年)时,与 CK 处理相比,T2、T3、T4、T5 处理土壤有机碳含量分别显著提高 5.64%、9.28%、7.51%、13.37% ($P < 0.05$),T1 处理无显著性变化;T5 处理土壤有机碳含量最高,较 T1、T2、T4 处理分别显著提高 10.80%、7.32%、5.45% ($P < 0.05$),与 T3 处理相比均无显著性差异。T3、T4 处理土壤有机碳含量均显著高于 T1 处理 ($P < 0.05$),而与 T2 处理相比均无显著性差异。

表 3 所示。与 CK 处理相比,不同施肥处理均可提高 0.053 ~ 0.250、>0.250 ~ 2.000、>2.000 mm 粒径土壤团聚体有机碳含量,降低 <0.053 mm 粒径团聚体有机碳含量。其中,T3 处理 0.053 ~ 0.250 mm 粒径团聚体有机碳含量最高,较 CK 处理显著提高 9.59% ($P < 0.05$),较其他施肥处理提高 1.78% ~ 8.04%,显著高于 T1 处理 ($P < 0.05$)。T5 处理 >0.250 ~ 2.000、>2.000 mm 粒径团聚体有机碳含量均最高,较 CK 处理分别显著提高 12.55%、10.95% ($P < 0.05$),较其他施肥处理分别提高 3.73% ~ 9.93%、4.01% ~ 8.44%,其中 >0.250 ~ 2.000 mm 粒径团聚体有机碳显著高于 T1、T2 处理 ($P < 0.05$),>2.000 mm 粒径团聚体有机碳含量显著高于 T1、T2、T4 处理 ($P < 0.05$)。T5 处理 <0.053 mm 粒径团聚体有机碳含量,较 CK、T1 处理分别显著降低 6.48%、5.24% ($P < 0.05$),与 T2、T3、T4 处理相比均无显著性差异。

2.5 化肥配施菌肥及改良基质对土壤团聚体有机碳相对贡献率的影响

不同施肥处理土壤团聚体有机碳相对贡献率如图 2 所示。各处理土壤团聚体有机碳相对贡献率以 >2.000 mm 粒径为主,有机碳相对贡献率可达 53.95% ~ 61.92%;其次是 >0.250 ~ 2.000 mm 粒径,有机碳相对贡献率在 23.86% ~ 25.98%;0.053 ~ 0.250、<0.053 mm 粒径有机碳相对贡献率较低,分别在 8.98% ~ 12.33%、5.33% ~ 7.74%。与 CK 处理相比,不同施肥处理能够提高 >2.000 mm 粒径团聚体有机碳相对贡献率,降低 0.053 ~ 0.250、<0.053、>0.250 ~ 2.000 mm 粒径团聚体有机碳相对贡献率。其中 T5 处理以 >2.000 mm 粒径有机碳相对贡献率最高,较 CK 处理显著提高 14.77% ($P < 0.05$),较其他施肥处理显著提高 5.40% ~

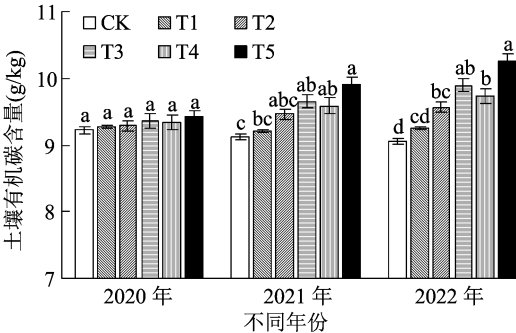


图 1 不同处理土壤有机碳含量变化

2.4 化肥配施菌肥及改良基质对土壤团聚体有机碳含量的影响

不同施肥处理土壤团聚体有机碳含量变化如

表 3 不同处理土壤团聚体有机碳含量的变化

处理	有机碳含量 (g/kg)			
	<0.053 mm 粒径	0.053 ~ 0.250 mm 粒径	>0.250 ~ 2.000 mm 粒径	>2.000 mm 粒径
CK	9.87 ± 0.56a	8.34 ± 0.59c	9.64 ± 0.38c	11.23 ± 0.71c
T1	9.74 ± 0.42a	8.46 ± 0.71bc	9.87 ± 0.61c	11.49 ± 0.76bc
T2	9.59 ± 0.71ab	8.79 ± 0.79ab	10.12 ± 0.70bc	11.57 ± 0.80bc
T3	9.46 ± 0.50ab	9.14 ± 0.55a	10.49 ± 0.59ab	11.98 ± 0.52ab
T4	9.50 ± 0.81ab	8.92 ± 0.39a	10.46 ± 0.51ab	11.86 ± 0.29b
T5	9.23 ± 0.66b	8.98 ± 0.46a	10.85 ± 0.63a	12.46 ± 0.43a

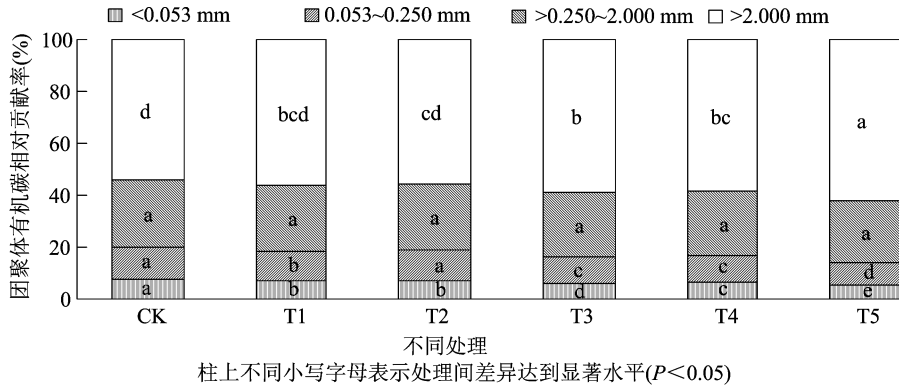


图2 不同处理土壤团聚体有机碳相对贡献率变化

10.79% ($P < 0.05$)。不同施肥处理 <0.053、0.053 ~ 0.250 mm 粒径团聚体有机碳相对贡献率较 CK 处理分别降低 8.27% ~ 31.14%、3.76% ~ 27.90%，除 T2 处理 0.053 ~ 0.250 mm 粒径有机碳相对贡献率与 CK 处理无显著性差异外，其他施肥处理 <0.053、0.053 ~ 0.250 mm 粒径有机碳相对贡献率均显著降低 ($P < 0.05$)。其中，T5 处理 <0.053、0.053 ~ 0.250 mm 粒径团聚体有机碳相对贡献率显著最低。各处理 >0.250 ~ 2.000 mm 粒径团聚体有机碳相对贡献率均无显著性差异。

2.6 化肥配施菌肥及改良基质对土壤微生物菌群结构的影响

不同施肥处理土壤微生物菌群结构变化如表 4 所示。与 CK 处理相比，不同施肥处理均可提高土壤细菌、放线菌、总菌量、革兰氏阴性菌生物量以及细菌/真菌比值，降低真菌生物量。其中 T5 处理细菌、放线菌生物量以及细菌/真菌比值均最高，较 CK 处理分别显著 ($P < 0.05$) 提高 6.81%、12.42%、15.79%，较其他施肥处理分别提高 1.62% ~ 4.39%、4.88% ~ 9.55%、3.94% ~ 9.09%，放线菌生物量显著高于 T1、T2、T3 处理 ($P < 0.05$)，细菌/真菌比值显著高于 T1、T2 处理 ($P < 0.05$)。T3、T5 处理革兰氏阳性菌均最高值，较 CK 处理显著提高

12.55% ($P < 0.05$)，较 T1、T2、T4 处理分别显著提高 9.35%、14.96%、7.60% ($P < 0.05$)。T3 处理 G+/G- 比值较 CK 处理显著提高 11.86% ($P < 0.05$)，较 T1、T2、T4 处理分别显著提高 13.79%、20.00%、11.86% ($P < 0.05$)，与 T5 处理相比无显著性差异。T5 处理真菌生物量最低，较 CK 处理显著降低 7.61% ($P < 0.05$)，与其他施肥处理相比无显著性差异。各处理总菌量、革兰氏阴性菌生物量均无显著性差异。

2.7 不同施肥措施条件下土壤团聚体有机碳相对贡献率与土壤团聚体稳定性指标的相关性分析

由表 5 可知，不同粒径团聚体有机碳相对贡献率与土壤团聚体稳定性存在一定的相关关系。其中 >2 mm 粒径团聚体有机碳相对贡献率与土壤团聚体 MWD 值、GMD 值、 $R_{0.25}$ 值呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$)，与 D 值呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$)；<0.053 mm 粒径团聚体有机碳相对贡献率与土壤团聚体 MWD 值、GMD 值、 $R_{0.25}$ 值呈显著负相关关系 ($P < 0.05$)，与 D 值呈显著正相关关系 ($P < 0.05$)；0.053 ~ 0.25、>0.25 ~ 2 mm 粒径团聚体有机碳相对贡献率与土壤团聚体 MWD 值、GMD 值、 $R_{0.25}$ 值、 D 值均呈无显著性相关关系。由此可见，合理施肥不仅能够明显促进大团聚体形成，提高土壤

表 4 不同处理土壤微生物菌群生物量变化

处理	细菌 (nmol/g)	真菌 (nmol/g)	放线菌 (nmol/g)	总菌量 (nmol/g)	革兰氏阳性菌 (nmol/g)	革兰氏阴性菌 (nmol/g)	革兰氏阳性菌/ 阴性菌	细菌/真菌
CK	6.46 ± 0.24b	5.65 ± 0.32a	4.59 ± 0.34c	16.70 ± 0.99a	2.39 ± 0.16bc	4.07 ± 0.21a	0.59 ± 0.05b	1.14 ± 0.08c
T1	6.73 ± 0.29ab	5.39 ± 0.24ab	4.82 ± 0.45b	16.94 ± 1.24a	2.46 ± 0.11b	4.27 ± 0.26a	0.58 ± 0.08b	1.25 ± 0.07b
T2	6.61 ± 0.41ab	5.48 ± 0.16ab	4.71 ± 0.27bc	16.80 ± 0.83a	2.34 ± 0.17c	4.27 ± 0.29a	0.55 ± 0.03c	1.21 ± 0.05b
T3	6.79 ± 0.29a	5.40 ± 0.30ab	4.89 ± 0.32b	17.08 ± 0.65a	2.69 ± 0.23a	4.10 ± 0.17a	0.66 ± 0.06a	1.26 ± 0.08ab
T4	6.74 ± 0.38ab	5.31 ± 0.43b	4.92 ± 0.41ab	16.97 ± 0.96a	2.50 ± 0.16b	4.24 ± 0.20a	0.59 ± 0.05b	1.27 ± 0.03ab
T5	6.90 ± 0.27a	5.22 ± 0.27b	5.16 ± 0.28a	17.28 ± 1.08a	2.69 ± 0.21a	4.21 ± 0.32a	0.64 ± 0.06a	1.32 ± 0.06a

表 5 土壤团聚体有机碳相对贡献率与团聚体稳定性的相关性分析

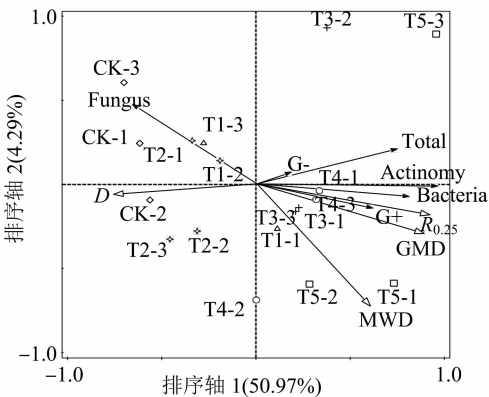
项目	相关系数			
	平均质量直径	几何平均直径	>0.25 mm 粒径团聚体	分形维数
<0.053 mm 贡献率	-0.83 *	-0.83 *	-0.84 *	0.80 *
0.053 ~0.250 mm 贡献率	-0.68	-0.69	-0.66	0.73
>0.250 ~2.000 mm 贡献率	-0.65	-0.63	-0.50	0.63
>2.000 mm 贡献率	0.97 **	0.96 **	0.90 **	-0.95 **

注：* 表示显著相关($P < 0.05$)，** 表示极显著相关($P < 0.01$)。

团聚体 MWD 值、GMD 值、 $R_{0.25}$ 值,降低 D 值,提升土壤团聚体稳定性,还有利于提高大团聚体有机碳的相对贡献率。

2.8 土壤微生物区系与土壤团聚体稳定性的冗余分析

为进一步分析土壤微生物群落结构与土壤团聚体之间的相关关系,利用土壤微生物群落菌群结构与土壤团聚体稳定性指标进行冗余分析(RDA)。结果表明,图 3 能够在排序轴 1、轴 2 累积变量 55.26% 水平上解释不同施肥措施条件下土壤团聚体稳定性变化对土壤微生物菌群结构变化的影响。图中各空间处理点较为分散,表明不同施肥处理土壤团聚体稳定性变化对土壤微生物菌群结构的影响不同。从表征各指标的空心箭夹角关系可知,土壤细菌、放线菌、总菌量、革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌与 MWD 值、GMD 值、 $R_{0.25}$ 值呈正相关关系,与 D 值呈负相关关系;土壤真菌和革兰氏阴性菌与 D 值呈正相关关系,与 MWD 值、GMD 值、 $R_{0.25}$ 值呈负相关关系。而从表 6 可知, $R_{0.25}$ 值的结解释度为 43.2%,贡献度为 76.4%,远高于其他稳定性指标。说明不同施肥措施条件下大粒径团聚体的变化是引起土壤微生物菌群结构变化的主要因素,且影响是极显著的($P = 0.002$)。由此说明,土壤微生物菌群结构与土壤团聚体变化密切相关。



图中 Bacteria、Fungus、Actinomy、Total、G+、G-表示土壤细菌、真菌、放线菌、总菌量、革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌；MWD、GMD、 $R_{0.25}$ 、 D 表示土壤团聚体平均质量直径、几何平均直径、>0.250 mm 粒径团聚体、分形维数；CK1、CK2、CK3 表示 CK 处理 3 个重复点，其他处理点以此类推

图3 土壤微生物群落菌群结构与土壤团聚体稳定性指标的冗余(RDA)分析

表 6 冗余分析中的正向选择结果

指标	解释度 (%)	贡献度 (%)	假设性 - F 值	P 值
$R_{0.25}$ 值	43.2	76.4	12.2	0.002
D 值	6.1	10.8	1.8	0.148
MWD 值	5.2	9.2	1.6	0.568
GMD 值	2.1	3.6	0.6	0.568

3 讨论

不同粒径土壤团聚体对土壤养分供应、生物活

性具有不同的作用,且不同粒径团聚体比例对土壤孔隙度有较大的影响^[1]。土壤团聚体 MWD、GMD、 $R_{0.25}$ 值、 D 值是表征土壤团聚体稳定性的重要指标,其中 MWD、GMD、 $R_{0.25}$ 值越大,大粒径团聚体含量越高,团聚体稳定性越强,而 D 值越小,土壤团聚体结构越稳定^[29]。本研究中,不同施肥处理均可提高 >2.000 mm 粒径团聚体含量以及团聚体 MWD 值、GMD 值、 $R_{0.25}$ 值,降低 D 值,其中,70% 化肥配施 30% 微生物菌肥及改良基质处理表现突出。这是因为外源有机物进入土壤后,一方面可以直接吸附较小团聚体形成较大粒径团聚体;另一方面微生物菌肥及改良基质的摄入,能够改良土壤透气状况,提高土壤生物学活性,促进土壤有机碳转化与形成,进而促使有机碳吸附较小颗粒形成较大团聚体,进而提高土壤团聚体稳定性。而 50% 化肥配施 50% 微生物菌肥处理土壤团聚体组成及稳定性与单施化肥处理相比差异不明显。这可能是化肥减量过多,氮素含量较少,从而加速土壤有机碳降解,抵消外源有机物带来的促进作用,所以未表现出明显差异^[2]。

土壤有机碳是土壤团聚体形成的基础物质,也是土壤微生物生命活动所需碳源和能量的主要来源^[30-31]。团聚体是土壤微生物活动的主要场所,其生命代谢活动主要发生在团聚体内^[32-33]。本研究中,施肥能够提高 0.053 ~ 0.250、 $>0.250 \sim 2.000$ 、 >2.000 mm 粒径土壤团聚体有机碳含量,降低 <0.053 mm 粒径团聚体有机碳含量。其中,70% 化肥配施 30% 微生物菌肥及土壤改良基质处理土壤有机碳含量明显高于其他施肥处理。结合团聚体组成及稳定性分析可知,微生物菌肥及改良基质能够促进大粒径团聚体形成,而大粒径团聚体通常是由小粒径团聚体通过碳量高的非稳性胶结剂胶结而成。因此,大粒径团聚体比小粒径团聚体含有更多的有机碳,进而提高大粒径团聚体有机碳的相对贡献率^[34]。

本研究中,与对照处理相比,化肥减量配施微生物菌肥处理均可提高土壤细菌、放线菌、总菌量、革兰氏阴性菌生物量以及细菌/真菌比值,降低真菌生物量。其中,70% 化肥配施 30% 微生物菌肥及土壤改良基质处理表现突出。这是因为外源有机物的摄入能补充土壤碳源,使得以某类碳源为主的微生物代谢活动加强。而土壤改良基质进入土壤后,利用自身疏松特点,能够提高土壤透气性,改善

土壤微生态环境,提高微生物代谢活性。土壤微生物活性的提高可以促进大粒径团聚体的形成,进而提升有机碳转化与固定速率,增加有机碳累积。相关性分析表明,大粒径团聚体有机碳相对贡献率与土壤团聚体稳定性有极显著的相关关系。而冗余分析表明,大粒径团聚体的变化是引起土壤微生物菌群结构变化的主要因素。由此可知,合理施肥不仅能够明显促进大粒径团聚体形成,提高土壤团聚体稳定性,还能够提高土壤团聚体有机碳含量,改善土壤菌群结构。

4 结论

化肥减量配施微生物菌肥及土壤改良基质能够促进土壤大粒径团聚体形成,提高 MWD 值、GMD 值、 $R_{0.25}$ 值,降低 D 值;能够提高 0.053 ~ 0.250、 $>0.250 \sim 2.000$ 、 >2.000 mm 粒径团聚体有机碳含量及 >2.000 mm 粒径团聚体有机碳相对贡献率;能够改善土壤微生物菌群结构,降低有害真菌比例。相关分析表明,土壤团聚体有机碳贡献率及微生物菌群结构变化与土壤团聚体稳定性具有紧密的关系。在本试验条件下,70% 化肥配施 30% 微生物菌肥及土壤改良基质处理表现最优。

参考文献:

- [1] 惠超,杨卫君,宋世龙,等. 生物炭施用对麦田土壤团聚体机械稳定性及春小麦产量的影响[J]. 土壤通报,2022,53(2):349-355.
- [2] 张久明,匡恩俊,刘亦丹,等. 有机肥替代不同比例化肥对土壤有机碳组分的影响[J]. 麦类作物学报,2021,41(12):1534-1540.
- [3] 王立光,叶春雷,陈军,等. 胡麻/小麦间作与胡麻-小麦轮作对土壤理化特性及胡麻生长的影响[J]. 中国农业科技导报,2021,23(12):161-171.
- [4] 陈延华,王乐,张淑香,等. 长期施肥下褐土生产力的演变及其影响因素[J]. 植物营养与肥料学报,2018,24(6):1445-1455.
- [5] 陈光荣,王立明,杨如萍,等. 西北灌区薯/豆连续套作对系统产量及土壤肥力的影响[J]. 草业学报,2017,26(10):46-55.
- [6] 平怀香,崔建宇,陈硕,等. 施肥对农田土壤碳氮磷化学计量特征及相关酶活变化的影响[J]. 华北农学报,2022,37(1):112-120.
- [7] 杨尚东,李荣坦,谭宏伟,等. 长期单施化肥和有机无机配合条件下红壤蔗区土壤生物学性状及细菌多样性差异[J]. 植物营养与肥料学报,2016,22(4):1024-1030.
- [8] 李建欣,葛桂民,申爱民. 菌渣有机肥对设施土壤微生物、酶活性及黄瓜品质和产量的影响[J]. 中国瓜菜,2022,35(8):57-61.
- [9] 姜利红,谢桂先,刘强,等. 有机无机肥配施对双季稻田土壤微生物和碳库的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),

- 2018,44(3):295–300.
- [10] 赖金平,姚锋先,徐丽红,等. 有机液肥对赣南脐橙园土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. 中国土壤与肥料,2022(6):16–24.
- [11] 张勇,徐智,邓亚琴,等. 有机类肥料部分替代化肥条件下新垦红壤团聚体变化特征及其与土壤养分供应的关系[J]. 西南农业学报,2021,34(12):2685–2690.
- [12] 孟庆英,杨晓贺,姚亮亮,等. 秸秆与微生物菌肥配施对盐碱稻田土壤团聚体及真菌群落多样性的影响[J]. 黑龙江农业科学,2022(8):25–30.
- [13] 高鸣慧,李娜,彭靖,等. 秸秆和生物炭还田对棕壤团聚体分布及有机碳含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(11):1978–1986.
- [14] 陈国靖,蔡进军,马璠,等. 宁夏黄土丘陵区典型林草植被类型对土壤水稳性团聚体的影响[J]. 水土保持研究,2018,25(5):49–53,60.
- [15] 李娟,韩霁昌,陈超,等. 黄土高原丘陵沟壑区土地利用方式对土壤团聚体特征的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(1):248–253,259.
- [16] 孙雪,张玉铭,张丽娟,等. 长期添加外源有机物料对华北农田土壤团聚体有机碳组分的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文),2021,29(8):1384–1396.
- [17] 徐国鑫,王子芳,高明,等. 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响[J]. 环境科学,2018,39(1):355–362.
- [18] 张维理,Kolbe H,张认连. 土壤有机碳作用及转化机制研究进展[J]. 中国农业科学,2020,53(2):317–331.
- [19] 刘靛. 有机物料对复垦土壤有机碳含量及微生物活性的影响[D]. 太原:山西大学,2017:2–3.
- [20] 潘全良. 施用生物炭和炭基肥对棕壤有机碳碳组分和活性的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2016:5–6.
- [21] 傅敏,郝敏敏,胡恒宇,等. 土壤有机碳和微生物群落结构对多年不同耕作方式与秸秆还田的响应[J]. 应用生态学报,2019,30(9):3183–3194.
- [22] 武杞蔓,刘朋宇,张颖,等. 微生物菌肥对番茄生长、品质及糖代谢相关酶的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(24):125–130.
- [23] 武杞蔓,张金梅,李明莹,等. 有益微生物菌肥对农作物的作用机制研究进展[J]. 生物技术通报,2021,37(5):221–230.
- [24] 宋时丽,吴昊,黄鹏伟,等. 秸秆还田土壤改良培肥基质和复合菌剂配施对土壤生态的影响[J]. 生态学报,2021,41(11):4562–4576.
- [25] 陈超,宓文海,居静,等. 长期不同施肥模式对中低产黄泥田土壤团聚体组成及碳组分的影响[J]. 华北农学报,2022,37(3):168–174.
- [26] 孙丰豪,潘付艳,张志春,等. 生物质炭配比施肥对栗钙土团聚体有机碳含量及其氧化稳定性的影响[J]. 青海大学学报,2021,39(2):42–48.
- [27] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000.
- [28] 李明,李忠佩,刘明,等. 不同秸秆生物炭对红壤性水稻土养分及微生物群落结构的影响[J]. 中国农业科学,2015,48(7):1361–1369.
- [29] 朱秋丽,王纯,严锦华,等. 施加秸秆与废弃物对茉莉园土壤团聚体及碳氮磷含量的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(4):191–197.
- [30] 王翠丽,王军强,陈亮,等. 不同耕作方式对绿洲区农田土壤团聚体中微生物生物量碳、氮含量的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(12):246–251.
- [31] 张伟明,陈温福,孟军,等. 东北地区秸秆生物炭利用潜力、产业模式及发展战略研究[J]. 中国农业科学,2019,52(14):2406–2424.
- [32] 李孝梅,李永梅,乌达木,等. 玉米间作大豆、萝卜对红壤不同粒径水稳性团聚体碳氮分布的影响[J]. 中国土壤与肥料,2022(1):104–111.
- [33] 朱建彬,郭相平,谢毅,等. 秸秆隔层还田及水氮管理对设施土壤团聚体及固碳特征的影响[J]. 江苏农业学报,2021,37(3):632–638.
- [34] 张秀芝,李强,高洪军,等. 长期施肥对黑土水稳性团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J]. 中国农业科学,2020,53(6):1214–1223.
- (上接第 236 页)
- [17] 张爽. 低温纤维素降解菌的筛选及其玉米秸秆降解效果研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2018:7–19.
- [18] 杨耀刚,田瑞华. 金属离子及表面活性剂对土著菌产纤维素酶的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(24):366–369.
- [19] 孔华忠. 中国真菌志[M]. 北京:科学出版社,2009:272–273.
- [20] Li D P, Feng L, Liu K R, et al. Optimization of cold-active CMCase production by psychrotrophic *Sphingomonas* sp. FLX-7 from the cold region of China[J]. Cellulose,2016,23(2):1335–1347.
- [21] 郭晓威,王秀然,解长睿,等. 木质素降解菌株的分离及其降解玉米秸秆过程中产酶特点[J]. 微生物学报,2017,57(12):1806–1816.
- [22] Al-balawi T H A, Wood A L, Solis I A, et al. *Anoxybacillus* sp. strain UARK-01, a new thermophilic soil bacterium with hyperthermostable alkaline laccase activity [J]. Current Microbiology,2017,74(6):762–771.
- [23] 洪培,疏义林,柯丽霞. 金属离子对平菇和杏鲍菇纤维素酶活性的影响[J]. 安徽农业科学,2015,43(26):59–60,66.
- [24] Rattanaporn K, Tantayotai P, Phusantisampan T, et al. Organic acid pretreatment of oil palm trunk: effect on enzymatic saccharification and ethanol production[J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2018,41:467–477.
- [25] 郝道玉,周源,龚萍,等. 耐高温纤维素降解菌株的筛选、鉴定及其酶活力的测定[J]. 试验研究,2022,19:69–73.
- [26] 易旻,杨玉婷,李梦霖,等. 一株耐高温纤维素降解菌的分离筛选及鉴定[J]. 吉首大学学报(自然科学版),2017,38(4):72–76.
- [27] 张秧,艾为党,靳向丹,等. 3种菌剂对小麦秸秆好氧堆肥降解效果比较[J]. 环境工程学报,2021,15(2):701–716.
- [28] 刘心吾,张威,马玲玲,等. 耐高温木质纤维素降解菌株的分离筛选、鉴定及降解工艺的研究[J]. 中国农学通报,2020,36(21):118–125.