

陈雪冬,刘雪龙,吴孔阳,等.丛枝菌根真菌和生物炭联合施用对土壤有机碳组分及团聚体的影响[J].江苏农业科学,2022,50(14):245-249.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.14.035

丛枝菌根真菌和生物炭联合施用对土壤有机碳组分及团聚体的影响

陈雪冬,刘雪龙,吴孔阳,唐琳,李俊

(洛阳师范学院生命科学学院,河南洛阳 471934)

摘要:为明确 AM 真菌与生物炭联合施用对农田土壤有机碳组分及团聚体的影响,设计室内盆栽试验,以灭菌的农田土壤为基质,种植玉米幼苗,接种 AM 真菌并配施不同裂解温度(300、400、500 ℃)制备的玉米秸秆生物炭,分析不同生物炭和 AM 真菌处理对玉米植株生长、土壤有机碳组分和团聚体结构的影响。结果表明,与未接菌未加生物炭的对照组相比,接种 AM 真菌并配施 300、400、500 ℃ 生物炭均能够显著增加玉米的株高,而且接种 AM 真菌配施 300 ℃ 生物炭能显著增加玉米的地径,达 8.86 mm。单施生物炭能够显著提高土壤总有机碳含量,施用 300、400、500 ℃ 生物炭可分别提高土壤总有机碳含量 76.3%、97.0%、86.0%,而且接种 AM 真菌配施 300 ℃ 生物炭能够显著增加土壤可溶性有机碳含量(283.02 mg/kg),但 AM 真菌和 500 ℃ 生物炭配施会降低土壤易氧化有机碳含量(0.723 g/kg)。AM 真菌和生物炭联合施用对中等粒径土壤团聚体的影响作用并不显著,但单独接种 AM 真菌能够促进土壤大团聚体 >4 000 μm 和 >2 000~4 000 μm 的形成。

关键词:AM 真菌;生物炭;玉米生长;土壤结构;有机碳;团聚体

中图分类号:S153.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)14-0245-05

土壤有机碳是土壤质量的核心,不仅影响土壤质量和功能,而且对全球气候变化也有重要作用。土壤活性有机碳是指土壤中稳定性差、周转速率快、易矿化分解、易受微生物影响的那部分碳素,主要包括可溶性有机碳、易氧化态有机碳等,其变化可以表征土壤固碳能力^[1]。土壤团聚体是土壤结构的基本单位,由土壤颗粒胶结形成,团聚体的形成可以限制土壤微生物的活动,引起微生物与有机碳的空间隔离,从而提高土壤有机碳的稳定性^[2-3]。

生物炭是由废弃的生物质残体在高温限氧情况下热裂解而产生的高度芳香化物质^[4],制备工艺简单,且原材料来源丰富,是一种环境友好型材料,具有含碳丰富、孔隙发达、表面积大、吸附能力强等突出优势^[5],能够与土壤颗粒形成团聚体,避免土壤微生物的分解,长时间留存在土壤中,长期施用可增强土壤贮碳功能。

丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza,简称 AM)真菌是一类分布广泛的土壤微生物,几乎存在于所有的陆地生态系统中^[6]。AM 真菌具有丰富的外延菌丝,包含 20%~30% 的微生物生物量,相当于 15% 的土壤有机碳库^[7],而且 AM 真菌可以通过丰富的菌丝网络将土壤缠绕在一起,使土壤颗粒按照一定的规律进行排列,提高土壤团聚体稳定性。此外,AM 真菌菌丝会分泌球囊霉素,球囊霉素储存的碳可以在土壤中保留长达 12~22 年之久,而且球囊霉素是形成土壤团聚体的重要黏合剂,可以加速土壤团聚过程,提高土壤有机碳的稳定^[8]。目前许多研究已证实 AM 真菌和生物炭能提高土壤有机碳含量,但二者联合作用的研究仍然较少,尤其是 AM 真菌与生物炭配施对土壤活性碳组分和土壤结构的影响尚不明确。因此,为了探明 AM 真菌与生物炭联合施用对土壤有机碳和土壤结构的影响,本研究设计了盆栽试验研究不同温度制备的秸秆生物炭与 AM 真菌配施对土壤有机碳组分及团聚体分布的影响,以为菌根技术和生物炭的联合应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2019 年 4—7 月在洛阳师范学院生命科

收稿日期:2021-08-28

基金项目:河南省教育厅高等学校重点科研项目(编号:20A180018);河南省科技攻关项目(编号:20210231060);洛阳师范学院国家级项目培育基金(编号:2019-PYJJ-008);教育部产学研协同育人项目(编号:202101228068)。

作者简介:陈雪冬(1989—),女,河南济源人,讲师,主要从事微生物生态研究。E-mail:chenxuedong1224@163.com。

学学院科研温室进行。

土壤:选取郊外无污染的玉米农田,采集 0 ~ 20 cm 土壤,除去生物残体、石块等杂物,充分混合后取足量土壤带回实验室,鲜土粉碎后过 5 mm 筛,装袋保存。

菌种:以玉米为宿主,选用笔者所在研究室保存的根内根生囊霉(*Rhizophagus intraradices*)菌种进行繁殖,60 d 后收集其孢子、菌丝体和侵染根段,制备为接种菌剂,装袋保存。

生物炭:生物炭购自南京智融联科技有限公司,由玉米秸秆经过不同温度(300、400、500 ℃)制备而成。

玉米:选饱满程度相似的玉米种子,表面消毒后,萌发备用。

1.2 试验设计

将供试土壤经高温高压灭菌冷却后,各取 1.0 kg 土壤装入塑料花盆中(直径 21 cm,高 12 cm),试验设生物炭(不添加,添加 300、400、500 ℃生物炭)和 AM 真菌(不接种、接种)2 个因素,共 8 个处理,其中每种生物炭的添加量为 3%,与土壤混匀。向需要接菌的土壤中添加 30 g 菌剂,不需接种的土壤添加等量灭菌菌剂和 10 mL 菌剂过滤液,使土壤中的其他微生物组成一致,然后将萌发的玉米种子撒在花盆中间,每个处理 5 盆重复,之后按常规育苗管理。

1.3 生物炭比表面积的测定

利用比表面分析仪(V - Sorb2800P,北京)测定不同温度制备的生物炭的比表面积。

1.4 玉米生长指标的测定

待玉米生长 3 个月后,拍照记录玉米植株的生长状况,使用长直尺测量玉米植株的株高并记录,使用游标卡尺测定玉米植株的地径并记录。

1.5 土壤有机碳及活性碳组分的测定

土壤总有机碳含量采用重铬酸钾 - 浓硫酸外加热法测定^[9];土壤可溶性有机碳含量采用冷水浸提后用 TOC 仪测定^[10];土壤易氧化有机碳含量采用 333 mmol/L 高锰酸钾氧化法测定^[11]。

1.6 土壤团聚体组成的测定

称取适量的风干土样,利用 8411 型电动振筛机进行土壤颗粒的筛分,筛分后得到 6 个粒径土壤颗粒(f1: > 4 000 μm; f2: > 2 000 ~ 4 000 μm; f3: > 1 000 ~ 2 000 μm; f4: > 250 ~ 1 000 μm; f5: 58 ~ 250 μm; f6: < 58 μm),对各粒径范围土壤质量进行

称量,计算该土壤样品中土壤团聚体组成。

1.7 统计分析

利用 SPSS 22.0 分析不同生物炭和 AM 真菌处理后的玉米生长、有机碳组分及团聚体的差异,利用 Origin 9.0 作图。

2 结果与分析

2.1 不同温度制备的生物炭的比表面积比较

对不同温度制备的玉米秸秆生物炭的比表面积进行表征,从表 1 可以看出,400 ℃热裂解制备的玉米秸秆生物炭的比表面积最大,为 6.88 m²/g; 300 ℃制备的生物炭比表面积最小,为 1.13 m²/g; 而 500 ℃制备的生物炭比表面积介于二者之间,为 4.83 m²/g。

表 1 不同温度制备的玉米秸秆生物炭的比表面积

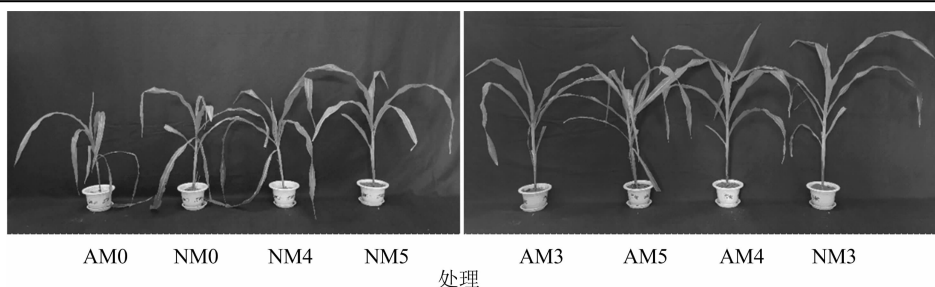
生物炭	比表面积 (m ² /g)
BC - 300	1.13
BC - 400	6.88
BC - 500	4.83

2.2 不同处理对玉米幼苗生长的影响

从图 1 可以看出,同时添加生物炭和接种 AM 真菌处理下的玉米生长状况整体上要优于单接种 AM 真菌或单添加 400、500 ℃生物炭处理。通过双因素交互分析,结果发现 AM 真菌和生物炭联合处理能够显著影响玉米的株高,二者交互作用达到了显著水平。在不接菌的情况下,单独添加 300、500 ℃生物炭对玉米株高有促进作用,但 400 ℃生物炭作用效果不明显。在接菌处理下,同时添加 300、400、500 ℃生物炭对玉米的株高均有显著的促进作用(图 2 - a)。此外,生物炭对玉米地径具有显著影响,但 AM 真菌对玉米地径的影响并不显著。与单接种 AM 真菌相比,同时添加 300 ℃生物炭处理下的玉米地径有显著改善(图 2 - b)。

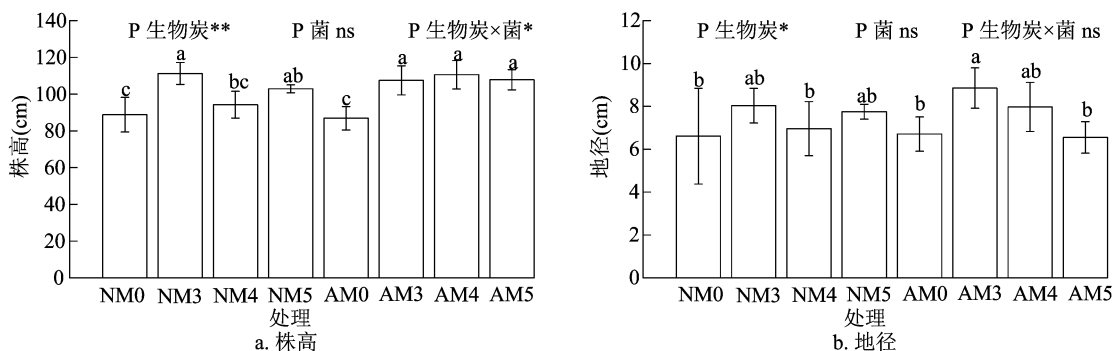
2.3 不同温度生物炭和 AM 真菌联合处理对土壤有机碳及活性碳组分的影响

通过双因素交互分析,结果发现生物炭对土壤总有机碳、可溶性有机碳、易氧化有机碳含量均有极显著影响,而 AM 真菌主要对易氧化有机碳含量有极显著影响,生物炭和 AM 真菌对可溶性有机碳含量的交互影响达到显著水平。具体而言,添加生物炭后土壤总有机碳含量要显著高于未添加生物炭



AM0—空白对照; NM3—不接种 AM 真菌, 添加 300 ℃ 生物炭; NM4—不接种 AM 真菌, 添加 400 ℃ 生物炭; NM5—不接种 AM 真菌, 添加 500 ℃ 生物炭; AM5—接种 AM 真菌, 添加 500 ℃ 生物炭; AM0—接种 AM 真菌, 不添加生物炭; AM3—接种 AM 真菌, 添加 300 ℃ 生物炭; AM4—接种 AM 真菌, 添加 400 ℃ 生物炭。图 2、图 3、表 2 同

图1 不同生物炭和 AM 真菌施用后玉米幼苗的生长状况



不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$); *, ** 分别表示在 0.05、0.01 水平显著。图 3 同

图2 不同生物炭和 AM 真菌施用对玉米株高和地径的影响

处理(图 3-a);未接种 AM 真菌的情况下,添加生物炭对土壤可溶性有机碳影响并不大,但接种 AM 真菌的条件下,添加 300 ℃ 生物炭能显著提高土壤可溶性碳含量(图 3-b);接种 AM 真菌并添加 300 ℃ 生物炭能显著提高土壤易氧化有机碳含量,但接种 AM 真菌并添加 500 ℃ 生物炭反而会降低土壤易氧化有机碳含量(图 3-c)。

2.4 不同温度生物炭和 AM 真菌联合处理对土壤团聚体组成的影响

从表 2 可看出,生物炭和 AM 真菌处理对中等粒径的土壤团聚体($> 1\,000 \sim 2\,000 \mu\text{m}$ 和 $> 250 \sim 1\,000 \mu\text{m}$)影响并不显著,但单独接种 AM 真菌能够显著增加大团聚体($> 4\,000 \mu\text{m}$ 和 $> 2\,000 \sim 4\,000 \mu\text{m}$)的比例,减少微团聚体($58 \sim 250 \mu\text{m}$ 和 $< 58 \mu\text{m}$)的比例,而且接种 AM 真菌添加 400 ℃ 生物炭处理下的 $58 \mu\text{m}$ 以下微团聚体比例有所降低。

3 讨论与结论

3.1 生物炭和 AM 真菌联合作用对玉米生长的影响

AM 真菌可以侵染玉米根系,帮助玉米吸收养分,进而促进玉米幼苗的生长,生物炭具有丰富的

比表面积和发达的孔隙结构,可以为 AM 真菌提供生长发育的场所^[12],也有利于其他根际微生物的生存繁衍,二者联用既可以有效改善土壤微生态环境,又能提高土壤理化性质,活化土壤养分,促进作物生长。本研究也发现 AM 真菌与生物炭联合施用可显著增加玉米的株高和地径,这与刘先良等的研究结果^[13]是一致的。目前多数研究已证实生物炭的施加具有良好的增产作用^[14-15],但实际施用效果仍然与生物炭的原料、制备温度等有关,本研究中施用 300 ℃ 生物炭的玉米幼苗生长状况要优于 400、500 ℃ 生物炭,说明高温制备的生物炭可能会阻碍植物的生长,这与 Yang 等的结果^[13]是一致的。此外,本研究还发现生物炭和 AM 真菌联合处理下,生物炭对玉米生长的影响作用要显著大于 AM 真菌,这与 Liu 等的研究结果^[16]是一致的,主要是由于生物炭本身有丰富的碳含量,还含有一定数量的氮、磷、钾等大量元素及其他一些微量元素,可以为植物的生长发育提供直接的营养来源,宿主植物养分充足的情况下对 AM 真菌的依赖性有所减弱。

3.2 生物炭和 AM 真菌联合作用对土壤有机碳及其活性组分的影响

本研究结果表明,施加生物炭处理能显著提高

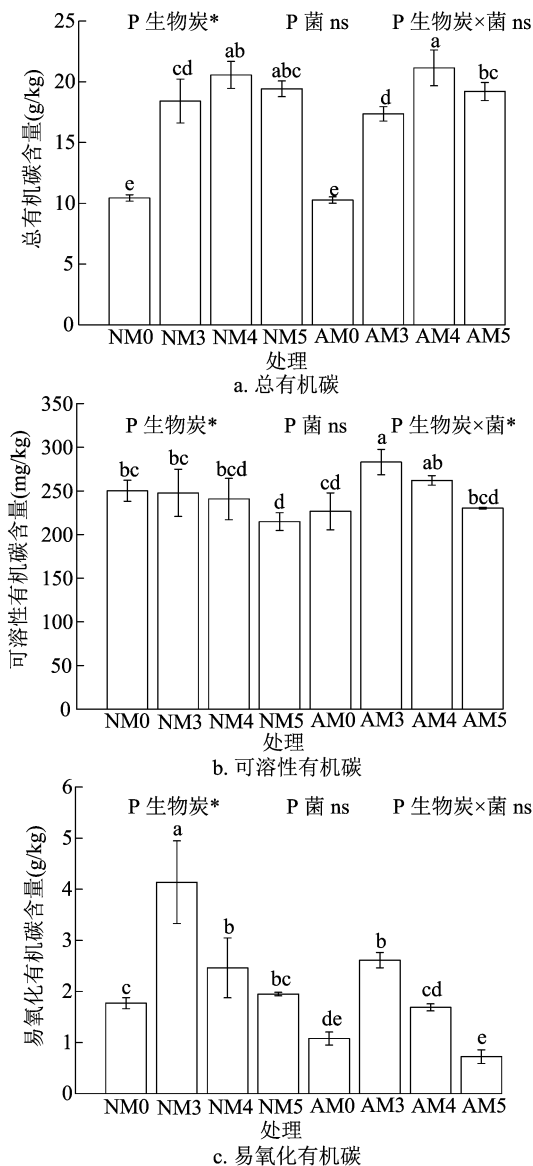


图3 不同温度生物炭和 AM 真菌对土壤有机碳及活性碳组分的影响

有机材料,施加生物炭相当于直接输入了外源有机碳,有利于土壤固碳。生物炭与 AM 真菌联合施用对土壤活性碳也有显著影响,但单独施加生物炭并未改变土壤可溶性有机碳含量,而接种 AM 真菌同时添加 300 ℃ 生物炭却显著增加了土壤可溶性有机碳,这主要是因为可溶性有机碳主要来源于植物凋落物、微生物活动、根系分泌物以及施肥等途径^[17],生物炭所含碳是高度芳香化的惰性碳,生物稳定性很强,难以被土壤微生物分解转化为可溶性碳,而 AM 真菌的存在可以引起根际激发效应^[18],增强土壤微生物活性,促进根系分泌物的增加,引起土壤中难溶物质的活化与分解,因而会增加土壤可溶性碳含量。此外,本研究还发现单施 300、400 ℃ 生物炭、接种 AM 真菌配施 300 ℃ 生物炭较空白处理均显著增加了土壤易氧化有机碳的含量,易氧化有机碳是容易被微生物分解矿化的有机碳,由于生物炭结构疏松,孔隙发达,施用后能够增加土壤含氧量,促进植物根系生长,增加根系分泌物,同时也为微生物的繁殖提供了有利场所^[19],因此能够促进土壤本底碳的矿化^[20],这与已有的研究结果^[19,21-22]是一致的,但是接种 AM 真菌配施 500 ℃ 生物炭却会明显降低土壤易氧化碳,这可能是由于 500 ℃ 制备的秸秆生物炭表面的活性官能团基本上被去除,主要以稳定的高度芳香化碳结构物质为主,更适用于碳的封存^[23]。

3.3 生物炭和 AM 真菌联合作用对土壤团聚体的影响

本研究发现接种 AM 真菌可以促进土壤团聚体的形成,这与相关研究结果^[24-25]是一致的,因为 AM 真菌能够分泌球囊霉素和菌丝分泌物,可以增加土壤黏结和团聚,但是 AM 真菌与生物炭配施后

表 2 不同温度生物炭和 AM 真菌处理下的土壤团聚体分布

处理	土壤团聚体分布比例 (%)					
	>4 000 μm	>2 000 ~4 000 μm	>1 000 ~2 000 μm	>250 ~1 000 μm	58 ~250 μm	<58 μm
NM0	6.90b	4.97b	14.75	39.53	27.68a	6.17ab
NM3	7.00b	4.94b	13.42	38.94	29.63a	6.08ab
NM4	7.60b	4.75b	16.55	36.93	26.39a	7.78ab
NM5	5.52b	3.19b	13.24	38.07	31.40a	8.57a
AM0	21.34a	10.50a	15.25	34.44	16.16b	2.31c
AM3	5.43b	3.31b	12.71	38.57	31.71a	8.28a
AM4	5.70b	4.73b	15.39	42.26	27.05a	4.87c
AM5	6.23b	3.89b	18.87	37.32	27.87a	5.82ab
P 值	<0.001	<0.001	0.173	0.220	<0.001	0.002

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

大团聚体的比例却减少,微团聚体比例反而增加,说明生物炭与 AM 真菌联合作用并不利于土壤大团聚体的形成。由于生物炭具有偏碱性、疏松多孔等特征,目前多数研究报道施用生物炭能够提高土壤大团聚体的形成和结构稳定性^[26-27],但也有学者认为,生物炭并不能像其他有机物料一样提高土壤团聚体的稳定性^[28],本研究也发现施用生物炭对土壤团聚体的分布影响并不显著,说明生物炭对土壤团聚体的作用效果会受到材料来源、土壤类型、施用量等多种因素的影响。

AM 真菌和生物炭联合作用能够促进玉米植株的生长,显著提高农田土壤总有机碳含量。对土壤活性碳组分而言,AM 真菌和 300 ℃ 生物炭配施能提高土壤可溶性有机碳和易氧化有机碳含量,促进土壤活性碳转化,而 AM 真菌和 500 ℃ 生物炭配施反而会降低土壤易氧化有机碳含量。但是 AM 真菌和生物炭联合作用并不利于土壤大团聚体的形成,单接种 AM 真菌可以提高土壤结构的稳定性。

参考文献:

- [1] 杨丽霞,潘剑君. 土壤活性有机碳库测定方法研究进展[J]. 土壤通报,2004,35(4):502-506.
- [2] 张磊,柳璇,韩俊杰,等. 生物炭对土壤团聚体及结合态碳库影响研究进展[J]. 山东农业科学,2016,48(9):157-161.
- [3] Blanco-Canqui H, Lal R. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates[J]. Critical Reviews in Plant Sciences,2004,23(6):481-504.
- [4] Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, et al. The 'Terra preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics[J]. Naturwissenschaften,2001,88(1):37-41.
- [5] Novak J M, Busscher W J, Laird D L, et al. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil[J]. Soil Science,2009,174(2):105-112.
- [6] 刘润进,陈应龙. 菌根学[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [7] Wilson G W T, Rice C W, Rillig M C, et al. Soil aggregation and carbon sequestration are tightly correlated with the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi: results from long-term field experiments[J]. Ecology Letters,2009,12(5):452-461.
- [8] He J D, Chi G G, Zou Y N, et al. Contribution of glomalin-related soil proteins to soil organic carbon in trifoliate orange[J]. Applied Soil Ecology,2020,154:103592.
- [9] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.
- [10] Haynes R J. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand[J]. Soil Biology and Biochemistry,2000,32(2):211-219.
- [11] 沈宏,曹志洪,胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J]. 生态学杂志,1999,18(3):33-39.
- [12] 李茜,贾春雷,胡晨浩,等. 井窖式小苗移栽方式对重庆地区烤烟生长和产质量的影响[J]. 南方农业学报,2015,46(6):991-995.
- [13] Yang Q, Ravnskov S, Neumann Andersen M. Nutrient uptake and growth of potato: arbuscular mycorrhiza symbiosis interacts with quality and quantity of amended biochars[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science,2020,183(2):220-232.
- [14] Jeffery S, Verheijen F G A, van der Velde M, et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment,2011,144(1):175-187.
- [15] Giotfno D, Darley-Usmar V, Zhang J H. Autophagy as an essential cellular antioxidant pathway in neurodegenerative disease[J]. Redox Biology,2014,2(1):82-90.
- [16] Liu M H, Che Y Y, Wang L Q, et al. Rice straw biochar and phosphorus inputs have more positive effects on the yield and nutrient uptake of *Lolium multiflorum* than arbuscular mycorrhizal fungi in acidic Cd-contaminated soils[J]. Chemosphere,2019,235:32-39.
- [17] 李学斌,李月飞,陈林,等. 宁夏荒漠草原不同土地利用方式对土壤活性有机碳的影响[J]. 北方园艺,2021(1):91-99.
- [18] Pausch J, Zhu B, Kuzyakov Y, et al. Plant inter-species effects on rhizosphere priming of soil organic matter decomposition[J]. Soil Biology and Biochemistry,2013,57:91-99.
- [19] 王月玲,周凤,张帆,等. 施用生物炭对土壤呼吸以及土壤有机碳组分的影响[J]. 环境科学研究,2017,30(6):920-928.
- [20] Yin Y F, He X H, Gao R, et al. Effects of rice straw and its biochar addition on soil labile carbon and soil organic carbon[J]. Journal of Integrative Agriculture,2014,13(3):491-498.
- [21] 乔丹丹. 生物质炭配施秸秆和有机肥对黄褐土团聚体和有机碳组分的影响[D]. 郑州:河南农业大学,2018.
- [22] 魏夏新,熊俊芬,李涛,等. 有机物料还田对双季稻田土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 应用生态学报,2020,31(7):2373-2380.
- [23] 韦思业. 不同生物质原料和制备温度对生物炭物理化学特征的影响[D]. 广州:中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所),2017.
- [24] 彭思利,申鸿,袁俊吉,等. 丛枝菌根真菌对中性紫色土土壤团聚体特征的影响[J]. 生态学报,2011,31(2):498-505.
- [25] Morris E K, Morris D J P, Vogt S, et al. Visualizing the dynamics of soil aggregation as affected by arbuscular mycorrhizal fungi[J]. The ISME Journal,2019,13(7):1639-1646.
- [26] 代文才,钱盛,高明,等. 施用生物质灰渣对柑橘园土壤团聚体及有机碳分布的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(2):260-265,271.
- [27] 高敬尧,王宏燕,许毛毛,等. 生物炭施入对农田土壤及作物生长影响的研究进展[J]. 江苏农业科学,2016,44(10):10-15.
- [28] 叶丽丽,王翠红,周虎,等. 添加生物质黑炭对红壤结构稳定性的影响[J]. 土壤,2012,44(1):62-66.