

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

孙雪, 张玉铭, 张丽娟, 胡春胜, 董文旭, 李晓欣, 王玉英, 刘秀萍, 邢力, 韩建

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.210380>

(向下翻页, 阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[有机培肥与耕作方式对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳组分的影响](#)

Effects of organic fertilization and tillage method on soil aggregates and organic carbon fractions in a wheat–rice system
中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(3): 405–412 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190617>

[生物炭及秸秆长期施用对紫色土坡耕地土壤团聚体有机碳的影响](#)

Effect of long-term application of biochar and straw on soil organic carbon in purple soil aggregates of sloping uplands
中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(1): 96–103 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190614>

[玉米残体分解对不同肥力棕壤团聚体组成及有机碳分布的影响](#)

Effects of maize residue decomposition on aggregate composition and organic carbon distribution of different fertilities Brown soils
中国生态农业学报. 2018, 26(7): 1029–1037 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.171087>

[长期不同施肥方式对华北地区温室和农田土壤团聚体形成特征的影响](#)

Effect of long-term fertilization on soil aggregate formation in greenhouse and farmland conditions in the North China Plain
中国生态农业学报. 2017, 25(8): 1119–1128 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.161060>

[不同耕作措施下旱作农田土壤团聚体中有机碳和全氮分布特征](#)

Distribution characteristics of organic carbon and total nitrogen in dry farmland soil aggregates under different tillage methods in the Loess Plateau of central Gansu Province
中国生态农业学报. 2015(3): 276–284 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.140863>

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.210380

孙雪, 张玉铭, 张丽娟, 胡春胜, 董文旭, 李晓欣, 王玉英, 刘秀萍, 邢力, 韩建. 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

SUN X, ZHANG Y M, ZHANG L J, HU C S, DONG W X, LI X X, WANG Y Y, LIU X P, XING L, HAN J. Effects of long-term exogenous organic material addition on the organic carbon composition of soil aggregates in farmlands of North China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(8): 1384–1396

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*

孙雪^{1,2}, 张玉铭^{1**}, 张丽娟², 胡春胜¹, 董文旭¹, 李晓欣¹,
王玉英¹, 刘秀萍¹, 邢力^{1,2}, 韩建^{1,2}

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/河北省土壤生态学重点实验室/中国科学院农业水资源重点实验室 石家庄 050022; 2. 河北农业大学资源与环境科学学院 保定 071000)

摘要: 土壤有机碳和团聚体对土壤肥力、作物产量、农业和环境发挥着重要作用, 是土壤肥力的核心和可持续农业的基础。本研究依托中国科学院栾城农业生态系统试验站 18 年野外长期有机质物料和矿质肥料配施试验, 开展不同施肥模式对土壤团聚体组成以及各组分有机碳在团聚体中分布影响的研究, 为阐明不同农业管理措施下土壤有机碳的物理保护机制提供依据。试验共设 6 个处理: 对照(CK)、单施秸秆(S)、单施有机粪肥(M)、单施化肥(NPK)、化肥配施秸秆(SNPK)和化肥配施有机粪肥(MNPK)。利用干筛法将全土筛分为大团聚体(>2 mm)、小团聚体(0.25~2 mm)和微团聚体(<0.25 mm) 3 种粒径团聚体, 分别测定不同处理下全土及 3 种粒径团聚体中总有机碳(TOC)、可溶性有机碳(DOC)、酸解活性有机碳(AC)、惰性有机碳(ROC)和易氧化有机碳(LOC)含量。结果表明: 施肥对土壤团聚体分布及稳定性有显著影响, SNPK 显著提高了粒径>0.25 mm 团聚体含量和团聚体稳定性; DOC 和 ROC 含量与粒径>2 mm 团聚体含量显著正相关, 其对促进大团聚体形成至关重要。不同施肥处理下土壤团聚体各有机碳组分含量存在差异, 与传统的单独施用化肥处理(NPK)相比, SNPK 和 MNPK 均显著提高了全土和团聚体各组分有机碳含量, SNPK 对土壤有机碳的提升效果优于 MNPK。各有机碳组分在团聚体中的含量均为小团聚体>大团聚体>微团聚体, 其中, 70%以上的各组分有机碳来自于粒径>0.25 mm 的团聚体。在施用化肥基础上增施有机肥(MNPK)和实施秸秆还田(SNPK)提高了 LOC 在 TOC 中的占比, 使 LOC/TOC 由 CK 的 11.94% 分别增加到 14.95% 和 15.70%。MNPK 利于 LOC 保存在大团聚体中, 提高了土壤供肥能力; 而 SNPK 促进了 LOC 向较小粒径团聚体迁移, 增强了其在团聚体中的稳定性, 提高了土壤的保肥能力。由此可见, 长期实施有机无机肥料配合可以提高土壤碳储量和稳定性, 这为全面实施秸秆还田的基础上推行有机粪肥部分替代化肥的养管理策略提供了理论依据。

关键词: 长期施肥; 土壤团聚体; 有机碳组分; 化肥; 秸秆; 有机粪肥

中图分类号: S153; S154.36

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Effects of long-term exogenous organic material addition on the organic carbon

* 国家重点研发计划项目(2016YFD0300808, 2016YFD0200307)、河北省重点研发计划项目(19226438D)和国家自然科学基金项目(41571291)资助

** 通信作者: 张玉铭, 主要研究方向为农田生态系统养分循环与平衡及其环境效应。E-mail: ymzhang@sjziam.ac.cn
孙雪, 主要从事农田生态系统养分循环研究。E-mail: sunxue1901@163.com

收稿日期: 2020-09-10 接受日期: 2020-12-20

* This study was supported by the National Key R&D Program of China (2016YFD0300808, 2016YFD0200307), the Key R&D Program of Hebei Province (19226438D) and the National Natural Science Foundation of China (41571291).

** Corresponding author, E-mail: ymzhang@sjziam.ac.cn
Received Sep. 10, 2020; accepted Dec. 20, 2020

composition of soil aggregates in farmlands of North China*

SUN Xue^{1,2}, ZHANG Yuming^{1**}, ZHANG Lijuan², HU Chunsheng¹, DONG Wenxu¹, LI Xiaoxin¹,
WANG Yuying¹, LIU Xiuping¹, XING Li^{1,2}, HAN Jian^{1,2}

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Hebei Key Laboratory of Soil Ecology / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China)

Abstract: Soil organic carbon and aggregates play an important role in soil fertility, crop yield, and the farmland environment, all of which are key components for sustainable agriculture. A wild long-term organic material and mineral fertilizer field experiment was initiated in 2003 at the Luancheng Agroecosystem Experimental Station of the Chinese Academy of Sciences. The experiment sought to investigate how different fertilization patterns affect the soil aggregate composition and the levels of organic carbon in the aggregates to better understand how different agricultural management practices serve as physical protection mechanisms. There were six treatments: no fertilization (i.e., conventional, CK), straw application alone (S), organic manure application alone (M), mineral fertilizer application (NPK), NPK plus straw (SNPK), and NPK plus organic manure (MNPK). The contents of total organic carbon (TOC), soluble organic carbon (DOC), acidolytic active organic carbon (AC), resistant organic carbon (ROC), and labile organic carbon (LOC) were examined within the aggregate fractions, including the total soil, large aggregates (>2 mm), small aggregates (0.25–2 mm), and microaggregates (<0.25 mm). The results showed that fertilization had a significant effect on the distribution and stability of soil aggregates. SNPK significantly increased the amount of >0.25 mm aggregates. The contents of DOC and ROC were positively correlated with the amount of large aggregates and promoted the formation of large aggregates. Compared with NPK, SNPK and MNPK significantly increased the contents of SOC components in the aggregate fractions, and SNPK addition improved the SOC content compared to MNPK. In the aggregate fractions, the content of each organic carbon component was in the order of small aggregates > large aggregates > microaggregates, and more than 70% of the organic carbon came from the >0.25 mm aggregates. The LOC/TOC ratio in the MNPK and SNPK treatments increased to 14.95% and 15.70%, respectively, which was 11.94% under CK treatment. MNPK was conducive to LOC storage in large aggregates, which improved the soil fertilizer supply capacity; while SNPK promoted LOC migration to the small-sized aggregates, enhanced its stability in the aggregates, and improved the soil fertilizer retention capacity. In conclusion, long-term organic and inorganic fertilizer combined application improved soil carbon storage and stability. The study provides a theoretical basis for a nutrient management strategy with partial substitution of chemical fertilizer by organic manure and straw.

Keywords: Long-term fertilization; Soil aggregates; Organic carbon fractions; Chemical fertilizers; Straw; Organic manure

土壤有机碳是土壤养分循环和营养供应的核心物质, 是土壤肥力的核心和可持续农业的基础^[1], 也是全球碳循环的重要组成部分, 明确土壤有机碳库的组成特征是认知和理解碳循环过程的重要基础^[2]。土壤团聚体是土壤结构的基本单元, 是土壤中物质和能量转化与代谢的场所, 其数量和质量直接影响着土壤有机碳转化与固持以及土壤其他功能的发挥, 对协调土壤肥力状况、改善土壤耕性等具有重要作用。通常, 土壤有机碳含量和团聚体组成被作为衡量土壤肥力水平的重要指标^[3-4]。由于土壤有机碳和团聚体对土壤肥力、作物产量、农业和环境的重要作用, 探索土壤中有机碳组成及其在团聚体中的分布与迁移转化特征一直是科学研究的热点领域。

土壤有机碳是动植物和微生物残体在各个阶段降解物质的混合物, 对增强土壤颗粒团聚性、促进团粒结构的形成具有重要作用, 有机碳的组成直接影

响土壤团聚体的数量和大小分布及其稳定性。添加到农田的外源有机物料在土壤生物, 特别是土壤微生物作用下产生的土壤腐殖质可以促进土壤团粒结构的形成^[3-4]。20 世纪末, 人们对土壤有机碳的研究主要集中在不同化学结构有机物质在土壤中的功能, 认为形成土壤团粒结构的基础物质为土壤有机物质分解和腐殖化后产生的化学结构复杂的长链物质; 而近年来中欧一些学者相关研究则表明有机物质经分解和腐殖化后生成的短链化合物才是形成土壤团粒结构的基础物质^[1]。土壤有机碳作为土壤团聚体形成的重要胶结物质, 其对土壤团聚体的结构稳定有显著影响; 同时, 土壤团聚体也是土壤有机碳稳定性的主要影响因子, 团聚体的团聚作用被认为是土壤有机碳固定的核心机制。保存于不同粒级团聚体中的有机碳对土壤的供肥和保肥能力贡献不同, 存在于大团聚体中的有机碳易于被微生物分解转化, 在

提高土壤供肥能力方面发挥重要作用;封存于土壤微团聚体中的有机碳具有较高的稳定性,很难被分解转化,对提高土壤的保肥能力发挥着重要作用。因此,研究土壤团聚体及有机碳分布和稳定性的变化特征,对改善土壤结构及提高土壤肥力具有重要意义。

外源有机物料是土壤有机碳的重要来源,能增加团聚体的团聚性能,促进团聚体的团聚化及其稳定性。李江涛等^[5]研究了施用畜禽粪便和化肥对土壤团聚体稳定性和活性有机碳库的影响,发现施用畜禽粪便有利于提高土壤中总有机碳含量及土壤团聚体稳定性,土壤活性有机碳是团聚体形成与稳定过程中重要影响因素。农田管理措施包括耕作方式、种植模式和施肥以及秸秆还田也是影响土壤有机碳固定的主要因素^[2-4]。白怡婧等^[6]发现小麦(*Triticum aestivum*)绿肥-玉米(*Zea mays*)轮作模式对土壤团聚体的形成、稳定以及有机碳含量的提高具有促进作用。王碧胜等^[7]证实传统耕作模式下土壤有机碳和团聚体受秸秆还田的影响最大。林欣欣等^[8]探讨了不同利用方式下秸秆还田对黑土肥力的影响,生物炭可以提高土壤总有机碳和胡敏素的积累,秸秆有利于胡敏酸的形成。马凡凡^[9]对比不同有机肥替代模式下水稻(*Oryza sativa*)-小麦产量以及土壤中氮磷含量,得出猪粪可以提高作物产量和养分含量,秸秆可以降低养分流失量的结论。田慎重等^[10]研究了改变耕作方式和实施秸秆还田对土壤团聚体碳库的影响,结果表明,土壤耕作和秸秆还田是驱动团聚体更新周转的主要外部因素,旋耕转深松配合秸秆还田促进了耕层土壤团聚体的形成和稳定,提高了土壤团聚体碳库和对有机碳的贡献。不同的耕作方式、秸秆还田与有机粪肥施用等可显著影响土壤团聚体数量、稳定性等团聚体特征,从而对土壤团聚状况及有机碳固定速率产生显著影响。因此,了解长期添加不同类型外源有机物料下土壤团聚体碳库特征对阐明有机碳周转机制及碳固定潜力具有重要意义。

华北平原是中国典型的小麦-玉米两熟区,也是我国重要的粮食生产基地之一,在保障国家粮食安全方面具有重要作用。农民为了追求高产,盲目过量施用化肥现象严重,粮食过度依赖化肥的问题日益凸显,由此引发了土壤质量退化、资源利用效率低下等问题。充分发挥有机物料的培肥改土作用,是改善土壤结构、持续提升土壤产能和资源效率的关键。本研究依托中国科学院栾城农业生态系统

试验站有机养分循环再利用长期定位试验,研究长期秸秆还田与施用有机粪肥对土壤团聚体组成及其稳定性、不同组分有机碳在团聚体中的分布特征,揭示有机碳的物理保护机制,为制定地力培育和提升土壤固碳潜能的农业管理措施提供理论依据,对本区域农业绿色可持续发展具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于河北省石家庄市栾城区中国科学院栾城农业生态系统试验站(37.88°N, 114.68°E)。地处冀中平原西部,属暖温带大陆性半湿润季风气候,年平均气温 12.8℃、降水量 474.0 mm、无霜期 205 d。供试土壤类型为潮褐土。代表华北平原高产农业生态类型,种植制度为冬小麦-夏玉米轮作制。

1.2 试验设计与样品采集

本试验基于 2001 年开始的有机养分循环再利用长期定位试验。试验伊始,土壤基本理化性状为:有机质 16.5 g·kg⁻¹,全氮 0.916 g·kg⁻¹,有效磷 6.37 mg·kg⁻¹,有效钾 137 g·kg⁻¹,碱解氮 99 g·kg⁻¹。试验共设置 6 个处理,每个处理重复 3 次。每小区面积为 120 m²。(1)对照:不施肥无秸秆还田处理(CK);(2)单施有机粪肥(M):将每年 80%的收获产品经饲喂猪过腹通过圈肥方式返还农田,施用量为风干猪圈肥 245 kg·hm⁻²;(3)单施化肥(NPK):每年施用 N 300 kg·hm⁻²、P₂O₅ 120 kg·hm⁻²、K₂O 75 kg·hm⁻²;(4)化肥配施有机粪肥(MNPK):在单施化肥基础上,每年 80%的收获农产品饲喂猪过腹还田,可折算为施用 308 kg·hm⁻² 风干猪圈肥;(5)化肥配施秸秆(SNPK):在单施化肥基础上,将收获的秸秆全部还田;单施秸秆(S):不施用任何肥料,每年将收获的秸秆全量粉碎还田。对于施用有机粪肥的各处理,每个处理对应 1 个猪圈,每个猪圈内 1 头猪,于每年的小麦播种前 1~2 个月进行饲喂试验,施肥时 1 个猪圈的粪肥平分于 3 个重复小区。将每个处理收获玉米和小麦籽实的 80%和相似比例的秸秆分别喂猪垫圈并堆腐制成猪圈肥,在此期间不饲喂供试猪其他饲料。粪肥全部于小麦播种前作为底肥施用。对于秸秆还田处理,小麦、玉米两季秸秆全部还田,玉米秸秆粉碎旋耕还田,小麦秸秆覆盖还田。化肥氮和钾小麦季和玉米季各施用全年用量的 1/2,其中,小麦季钾肥全部用于底肥,氮肥底肥和拔节期追肥各占当季用量的 1/2;玉米季氮钾肥全部于大喇叭口期施用;全年的磷肥全部于小麦底肥施用,玉米季

利用前茬作物的磷肥后效。

于 2019 年 9 月玉米收获后在各小区内按照 S 型五点采样法采集 0~20 cm 原状土样 2 kg。

1.3 样品测定

1.3.1 土壤非水稳性团聚体分级

将取回的原状土样自然风干至土壤含水量 8% 左右时除去土壤中的杂质, 结合 Six 等^[11]物理分组法, 利用干筛法进行团聚体分级。称取 100 g 风干土样, 放于直径 20 cm、高度 5 cm、由上到下孔径分别为 2 mm 和 0.25 mm 的振荡套筛上, 底层安放底盒, 顶部加盖, 用振荡式筛分仪在 200 次·min⁻¹ 下震荡 2 min。筛分完全后, 从上部依次取筛, 将各级网筛上的土样分别收集称重, 得到 >2 mm、0.25~2 mm 和 <0.25 mm 粒级的土壤团聚体样品及其质量。

将筛分后的各粒级团聚体土壤分别粉碎后过 0.25 mm 筛, 用于有机碳组分分析。

1.3.2 土壤有机碳测定

1.3.2.1 土壤总有机碳

准确称取 1 g 上述不同粒级团聚体土壤样品(精确到 0.0001 g), 放入 50 mL 小烧杯中。同时称取并记录烧杯和无碳滤纸的质量(精确到 0.0001 g)。烧杯中加入 10 mL 2 mol·L⁻¹ 的 HCl, 室温放置 24 h, 期间搅拌 3~5 次。然后用蒸馏水对酸化的土壤样品淋洗, 将样品洗至中性(用硝酸银检测, 无氯离子即可)。将滤纸放入烧杯中, 在 55 ℃ 下烘干 24 h, 取出, 称重, 记录烘干后滤纸和样品的总量。酸化完全后, 包样 2 mg, 用稳定性同位素质谱仪(DELTA V PIUS Isotope Ratio MS)测定土壤中总有机碳含量。

1.3.2.2 可溶性有机碳

称取 20 g 上述不同粒级团聚体土壤样品, 用 40 mL 0.5 mol·L⁻¹ 硫酸钾提取后, 浸提液经 0.45 μm 滤膜进行抽滤, 滤液在碳氮分析仪(Vario TOC SELECT)上测定。

1.3.2.3 惰性有机碳

准确称取 1 g 上述不同粒级团聚体土壤样品(精确到 0.0001 g), 放入 50 mL 小烧杯中。同时称取并记录烧杯和无碳滤纸的质量(精确到 0.0001 g)。烧杯中加入 10 mL 6 mol·L⁻¹ 的 HCl, 放置于 116 ℃ 烘箱中, 培养 18 h, 培养期间每小时搅拌一次, 确保土壤完全被酸化。培养完成后, 用蒸馏水对酸化的样品淋洗, 将土壤样品洗至中性(用硝酸银检测, 无氯离子即可)。将滤纸放入烧杯中, 55 ℃ 下烘干 24 h, 取出, 称重, 记录烘干后滤纸和样品的总量。包样 2 mg, 用稳定性同位素质谱仪(DELTA V PIUS Isotope Ra-

tio MS)测定惰性有机碳含量。

1.3.2.4 酸解活性有机碳

酸水解有机碳由酸解活性有机碳组分和惰性有机碳组分组成, 酸解活性有机碳为总有机碳量减去惰性有机碳量^[10]。

1.3.2.5 易氧化有机碳

称取各粒级团聚体过 0.25 mm 筛且约含 15 mg 碳的土壤样品, 放入带塑料旋盖的 50 mL 离心管中, 以不加土样为空白; 加入 25 mL 浓度为 333 mmol·L⁻¹ KMnO₄, 25 ℃ 下常规振荡 1 h, 然后在 2000 r·min⁻¹ 下离心 5 min, 取上清液, 并按 1:250 用去离子水稀释至 250 mL 容量瓶中, 用分光光度计 565 nm 下测定稀释样品的吸光值(A)。通过不含土壤样品的空白与待测样品的吸光值之差, 在 KMnO₄-A 的标准曲线上计算出 KMnO₄ 浓度变化, 进而计算被氧化的碳量。根据假设, 氧化过程中高锰酸钾浓度变化 1 mmol·L⁻¹ 消耗 0.75 mmol·L⁻¹ 或 9 mg 碳。其中能被 333 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 氧化的碳是活性有机碳, 不能被氧化的碳为非活性有机碳。

1.4 相关参数计算

选取平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、>0.25 mm 粒级团聚体含量($R_{0.25}$)和分形维数(D)作为土壤团聚体稳定性的评价指标^[12]。其计算公式如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^n (\bar{X}_i \times W_i) \quad (1)$$

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n M_i \times \ln \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \right] \quad (2)$$

$$R_{0.25} = M_{>0.25} / M_t \quad (3)$$

$$D = 3 - \frac{\lg \left[\frac{W(\delta < \bar{X}_i)}{W_t} \right]}{\lg \left(\frac{\bar{X}_i}{X_{\max}} \right)} \quad (4)$$

式中: \bar{X}_i 为 i 粒级团聚体平均直径, W_i 为 i 粒级团聚体重量所占的比例, M_i 为 i 粒级团聚体的重量, M_t 为土壤团聚体总重量, $W(\delta < \bar{X}_i)$ 为土粒直径 < \bar{X}_i 的土壤颗粒累计重量, W_t 为土粒的重量之和, X_{\max} 为最大粒径的平均直径。

利用土壤团聚体中各有机碳组分的富集系数和贡献率分析有机碳在不同粒级团聚体中的转移和储存状况。计算公式为:

碳富集系数(enrichment coefficient)=该粒级团聚体碳含量/土壤碳含量 (5)

碳贡献率(contributing rate)=该粒级团聚体碳含

量×该粒级团聚体含量/土壤碳含量×100% (6)

1.5 数据统计分析方法

采用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 软件处理数据并绘图。

2 结果与分析

2.1 添加外源有机物料对土壤团聚体分布及其稳定性的影响

不同肥料管理措施下, 土壤团聚体的组成存在显著差异。由表 1 可知, 与 CK 处理相比, 各施肥处理均显著增加了 >2 mm 粒级团聚体含量 ($P<0.05$), 减少了 <0.25 mm 粒级团聚体含量 ($P<0.05$)。M 处理对 >2 mm 粒级团聚体的提升效果较优, SNPK 处理对 <0.25 mm 粒级团聚体的降低作用最明显。但 SNPK 处理和 MNPK 处理的 0.25~2 mm 粒级团聚体的含量与 CK 无明显差异。

MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 常作为反映土壤团聚体大小分布状况的指标, 且与土壤团聚体稳定性具有一致性, 其值越大, 大团聚体含量越高, 团聚体越稳定^[13]。由表 2 可知, 与 CK 处理相比, 各施肥处理下土壤团聚体 MWD、GMD、 $R_{0.25}$ 和 D 均有显著差异 ($P<0.05$)。两个单一施肥处理 (S 和 M) 下, 仅 MWD 有显著差异 ($P<0.05$), 表明单一施肥模式下, 土壤团聚体的稳定性不会因为肥料种类的不同而呈现明显的差异。与 NPK 处理相比, SNPK 处理的土壤团聚体 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 分别提高 3.17%、6.12% 和 4.04%, D 降低 2.02%, 两个处理间各指标均表现出显著性差异 ($P<0.05$), 表明施用化肥情况下实施秸秆还田显著提高土壤团聚体稳定性的同时, 增加了 >0.25 mm 粒级团聚体在土壤中的占比。与 NPK 相比, MNPK 处理 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 有所降低而 D 有所增加, 表明施用化肥基础上增施有

机粪肥对土壤团聚体稳定性并无改善效果。比较 SNPK 和 MNPK 不难看出, 施用化肥基础上实施秸秆还田较施用有机粪肥显著提高了团聚体的 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$, 并显著降低了 D 值。土壤团聚体分形维数 D 越小, 说明土壤团聚体结构稳定性越强。所以, 施用化肥基础上实施秸秆还田土壤团聚体结构稳定性最强。

表 1 长期不同施肥处理下各粒级土壤非水稳性团聚体百分含量

处理 Treatment	fertilization treatments			%
	>2 mm	0.25~2 mm	<0.25 mm	
CK	34.50±0.34e	38.88±0.70a	26.62±0.42a	
S	40.27±0.72b	36.45±0.42c	23.27±0.92c	
M	42.64±0.36a	34.50±0.17d	22.86±0.24c	
NPK	38.63±0.06c	37.61±0.53b	23.76±0.59bc	
SNPK	40.55±0.28b	38.77±0.84a	20.68±0.57d	
MNPK	36.87±0.84d	38.27±0.22ab	24.86±0.80b	

CK: 不施肥无秸秆还田; M: 单施有机粪肥; NPK: 单施化肥; MNPK: 化肥配施有机粪肥; SNPK: 化肥配施秸秆; SCK: 单施秸秆。数据为 3 次重复的平均值加减标准误。同列不同小写字母表示 $P<0.05$ 水平差异显著。CK: no fertilizer without organic materials; M: single application of organic manure; NPK: application of chemical fertilizers; MNPK: combined application of chemical fertilizers and organic manure; SNPK: combined application of chemical fertilizers and straw; SCK: single application of straws. Values are means±S.E. ($n=3$). Different lowercase letters within a column indicate significant differences at $P<0.05$.

2.2 添加外源有机物料对土壤总有机碳的影响

图 1 给出了长期添加不同外源有机物料下土壤有机碳 (TOC) 含量及其在团聚体中的分布特征。结果表明, 与 CK 相比, 秸秆还田情况下无论施用化肥与否均可显著提高 TOC 含量, 而在施用有机粪肥时,

表 2 不同长期施肥处理下土壤非水稳性团聚体的稳定性
Table 2 Stability of soil non-water-stable aggregates under different long-term fertilization treatments

处理 Treatment	平均重量直径(MWD) Mean weight diameter (mm)	几何平均直径(GMD) Geometric mean diameter (mm)	>0.25 mm 粒级团聚体含量($R_{0.25}$) Content of aggregates >0.25 mm (%)	分形维数(D) Fraction dimension
CK	1.19±0.003e	0.92±0.005e	73.38±0.421d	2.52±0.006a
S	1.27±0.014b	1.00±0.018bc	76.73±0.920b	2.47±0.014c
M	1.30±0.005a	1.02±0.006bc	77.14±0.243b	2.47±0.004c
NPK	1.26±0.006c	0.98±0.009c	76.24±0.593bc	2.48±0.009bc
SNPK	1.30±0.003a	1.04±0.007a	79.32±0.568a	2.43±0.010d
MNPK	1.23±0.014d	0.96±0.016d	75.14±0.797c	2.50±0.012b

CK: 不施肥无有机物料还田; M: 单施有机粪肥; NPK: 单施化肥; MNPK: 化肥配施有机粪肥; SNPK: 化肥配施秸秆; SCK: 单施秸秆。数据为 3 次重复的平均值加减标准误。同列不同小写字母表示 $P<0.05$ 水平差异显著。CK: no fertilizer without organic materials; M: single application of organic manure; NPK: application of chemical fertilizers; MNPK: combined application of chemical fertilizers and organic manure; SNPK: combined application of chemical fertilizers and straw; SCK: single application of straws. Values are means±S.E. ($n=3$). Different lowercase letters within a column indicate significant differences at $P<0.05$.

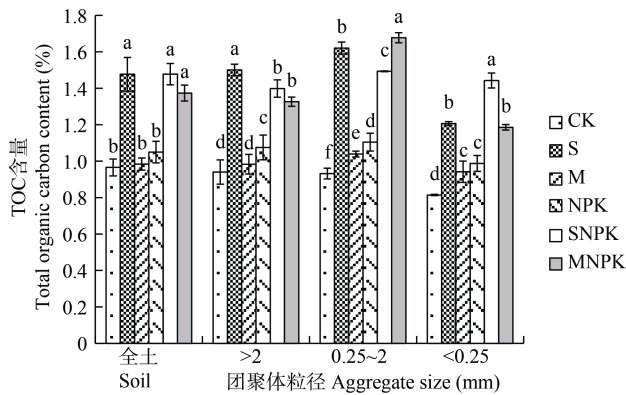


图 1 长期不同施肥处理下土壤非水稳性团聚体总有机碳(TOC)含量

Fig. 1 Total organic carbon contents of soil non-water-stable aggregates with different sizes under different long-term fertilization treatments

CK: 不施肥无有机物料还田; M: 单施有机粪肥; NPK: 单施化肥; MNPK: 化肥配施有机粪肥; SNPK: 化肥配施秸秆; SCK: 单施秸秆。数据为 3 次重复的平均值加减标准误。不同小写字母表示同一粒径不同处理间 $P < 0.05$ 水平差异显著。CK: no fertilizer without organic materials; M: single application of organic manure; NPK: application of chemical fertilizers; MNPK: combined application of chemical fertilizers and organic manure; SNPK: combined application of chemical fertilizers and straw; SCK: single application of straws. Values are means \pm S.E. ($n=3$). Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments for the same aggregate size at $P < 0.05$.

只有与化肥配施方可显著提高 TOC 含量($P < 0.05$), 单独施用有机粪肥及只施用化肥均未能显著提高 TOC 含量; S、SNPK、MNPK 3 个处理间 TOC 含量无显著差异($P > 0.05$), 由高到低的顺序为 $SNPK \approx S > MNPK > NPK > M > CK$ (图 2)。不同肥料管理措施影响了 TOC 在团聚体中的分布, 与对照 CK 处理相比, 除单独施用有机粪肥(M)处理在大团聚体(>2 mm)中未能显著提高 TOC 含量外, 各施肥处理和秸秆还田处理均显著促进了各粒级团聚体中 TOC 含量的增加($P < 0.05$)。单独实施秸秆还田(S)使更多的有机碳保存在粒径 >0.25 mm 的团聚体中; 而秸秆还田情况下施用化肥(SNPK)促进了有机碳向较小粒径团聚体中迁移, 使更多的有机碳被保护在粒级较小的团聚体中, 提高了有机碳在土壤中的稳定性和土壤固碳能力。比较 NPK 和 SNPK、MNPK 不难看出, 在配施化肥的情况下, 无论是作物秸秆还是有机粪肥作为外源碳源, 均能显著提高各粒级团聚体中 TOC 含量($P < 0.05$), MNPK 对 0.25~2 mm 小团聚体中 TOC 的提升效果更为显著, 而 SNPK 对 <0.25 mm 微团聚体中 TOC 提升效果更佳。

2.3 添加外源有机物料对土壤有机碳组分的影响

土壤有机碳的化学分组方法通常基于土壤有机碳在各种提取剂中的溶解性、氧化性不同把有机碳

分为活性和稳定性两个组分^[10]。目前土壤有机碳的化学组分主要依据化学溶剂的不同提取出可溶性有机碳、酸水解有机碳和易氧化有机碳等^[10]。

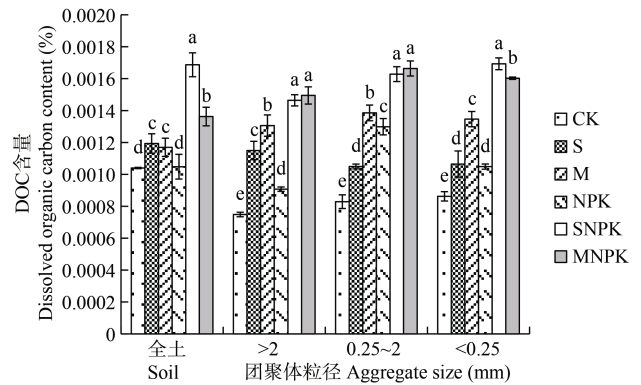


图 2 长期不同施肥处理下土壤非水稳性团聚体可溶性有机碳(DOC)含量

Fig. 2 Dissolved organic carbon contents of soil non-water-stable aggregates with different sizes under different long-term fertilization treatments

CK: 不施肥无有机物料还田; M: 单施有机粪肥; NPK: 单施化肥; MNPK: 化肥配施有机粪肥; SNPK: 化肥配施秸秆; SCK: 单施秸秆。数据为 3 次重复的平均值加减标准误。不同小写字母表示同一粒径不同处理间 $P < 0.05$ 水平差异显著。CK: no fertilizer without organic materials; M: single application of organic manure; NPK: application of chemical fertilizers; MNPK: combined application of chemical fertilizers and organic manure; SNPK: combined application of chemical fertilizers and straw; SCK: single application of straws. Values are means \pm S.E. ($n=3$). Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments for the same aggregate size at $P < 0.05$.

2.3.1 添加外源有机物料对土壤可溶性有机碳的影响

土壤可溶性有机碳(DOC)是指可以通过 $0.45 \mu\text{m}$ 孔径滤膜的大小和结构不一的有机分子^[12]。其主要组分为碳水化合物、蛋白质、长链脂肪族化合物以及大分子的腐殖质^[13]。DOC 在土壤总有机碳中所占比例较小, 一般不作为衡量土壤有机碳质量的重要指标。但是其作为土壤中微生物生长的主要能源, 在提供土壤养分方面起着重要作用^[14]。

图 2 给出了长期添加不同外源有机物料下土壤 DOC 含量及其在团聚体中的分布特征。结果表明, 外源有机物料的添加均能显著提高土壤 DOC 含量($P < 0.05$)。施用单一有机物料(S 和 M)两处理间土壤 DOC 含量无明显差异, 但在施用化肥基础上实施秸秆还田和施用有机粪肥差异显著($P < 0.05$), 与 MNPK 相比, SNPK 处理效果最好。这说明外源有机物料的添加可以提高土壤 DOC 含量, 从而为土壤微生物提供充足的能源物质, 提高土壤微生物活性, 促进土壤养分的周转。不同施肥模式下, DOC 在团聚体间的分布也有所差异。施肥均显著提高了各粒级团聚体中 DOC 含量, 有机无机配施更有利于

DOC 的提升, 施用化肥情况下实施秸秆还田较施用有机粪肥更有利于提高微团聚体中 DOC 含量。

2.3.2 添加外源有机物料对土壤酸水解有机碳的影响

酸水解有机碳分为活性有机碳库和惰性有机碳库两大碳库, 其中活性有机碳库(酸解 AC)的组成主要为碳水化合物, 虽然其含量仅占总有机碳的 10%~20%, 却是微生物生存所需的主要能源和碳源, 亦是参与土壤团聚体形成的重要成分, 在土壤有机碳和土壤性质研究中占据着重要地位^[10]。由图 3 可知, 除单独施用有机粪肥外, 其他施肥处理对土壤酸解 AC 含量均有提升作用。单独实施秸秆还田时更有利于促进酸解 AC 在粒径>0.25 mm 团聚体中积累。与 CK 相比, S 处理下>2 mm 大团聚体中酸解 AC 含量提高了 126.34%, 0.25~2 mm 小团聚体中含量提高了 208.23%, <0.25 mm 的微团聚体中提高了 113.09%, 差异均达显著水平($P<0.05$); 相比 SNPK 而言, S 处理在大团聚体和小团聚体中酸解 AC 含量分别增加 35.72%和 44.47%($P<0.05$), 而在微团聚体中则降低了 6.47%($P>0.05$)。这表明, 秸秆还田情况下施用化肥降低了粒径>0.25 mm 团聚体中酸解 AC 含量, 却提升了粒径<0.25 mm 微团聚体中酸解 AC 含量, 换言之, 化肥的施用促进了酸解 AC 向微团聚体中的迁移与积累。而单独施用有机粪肥, 不仅未能提高酸解 AC 含量, 还促进了土壤酸解 AC 的降解, 较常年不施肥的 CK 处理, 全土中降低 48.49%, 大团聚体和小团聚体中分别降低 46.70%和 21.72%($P<0.05$); 微团聚体中两个处理的酸解 AC 含量基本相同, 这表明土壤中减少的这部分活性有机碳主要源于粒径>0.25 mm 团聚体中活性有机碳的进一步降解。有机无机配合的两个处理(SNPK 和 MNPK)与单独施用化肥的 NPK 处理相比, 均显著提高了全土和各粒径团聚体中的酸解 AC 含量($P<0.05$), 除 0.25~2 mm 的小团聚体中以 MNPK 高于 SNPK 外, 其他粒径团聚体和全土中均以 SNPK 高于 MNPK。总体而言, 无论是单独添加外源有机物料还是配合施用化肥, 长期实施秸秆还田较施用有机粪肥更有利于提升全土和各粒径团聚体中活性有机碳含量, 从而为土壤中微生物的生存创造良好的能源环境, 有助于促进土壤团聚体的形成。

惰性有机碳(ROC)是土壤有机碳库中相对难分解、较稳定的部分, 主要包括木质素、腐殖质、多酚及被保护的多糖等^[15-16], 其含量越高越有利于土壤有机碳的积累, ROC 主要贡献于碳库储存。由图 4 可知, 全土中 ROC 含量由多到少的顺序是:

M>MNPK>SNPK>S>CK>NPK, 总体来看, 以粪肥作为有机物料较秸秆更有利于促进惰性有机碳的

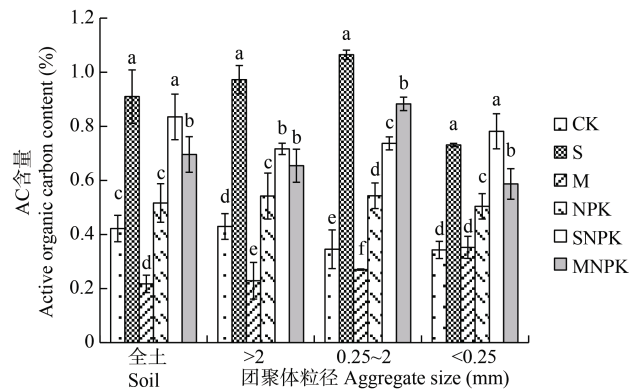


图 3 长期不同施肥处理下土壤非水稳性团聚体酸水解活性有机碳(AC)含量

Fig. 3 Active organic carbon contents of soil non-water-stable aggregates with different sizes under different long-term fertilization treatments

CK: 不施肥无有机物料还田; M: 单施有机粪肥; NPK: 单施化肥; MNPK: 化肥配施有机粪肥; SNPK: 化肥配施秸秆; SCK: 单施秸秆。数据为 3 次重复的平均值加减标准误。不同小写字母表示同一粒径不同处理间 $P<0.05$ 水平差异显著。CK: no fertilizer without organic materials; M: single application of organic manure; NPK: application of chemical fertilizers; MNPK: combined application of chemical fertilizers and organic manure; SNPK: combined application of chemical fertilizers and straw; SCK: single application of straws. Values are means±S.E. ($n=3$). Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments for the same aggregate size at $P<0.05$.

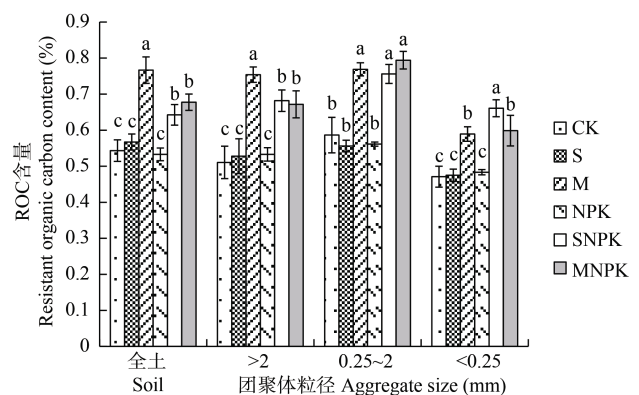


图 4 不同长期施肥处理下土壤非水稳性团聚体惰性有机碳(ROC)含量

Fig. 4 Resistant organic carbon contents of soil non-water-stable aggregates with different sizes under different long-term fertilization treatments

CK: 不施肥无有机物料还田; M: 单施有机粪肥; NPK: 单施化肥; MNPK: 化肥配施有机粪肥; SNPK: 化肥配施秸秆; SCK: 单施秸秆。数据为 3 次重复的平均值加减标准误。不同小写字母表示同一粒径不同处理间 $P<0.05$ 水平差异显著。CK: no fertilizer without organic materials; M: single application of organic manure; NPK: application of chemical fertilizers; MNPK: combined application of chemical fertilizers and organic manure; SNPK: combined application of chemical fertilizers and straw; SCK: single application of straws. Values are means±S.E. ($n=3$). Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments for the same aggregate size at $P<0.05$.

积累。不施肥(CK)、单施秸秆(S)及单施化肥(NPK)处理难分解 ROC 含量均显著低于单施有机粪肥(M)、秸秆配施化肥(SNPK)和有机粪肥配施化肥(MNPK)处理($P<0.05$), 且以 NPK 处理惰性有机碳含量最低。从 ROC 在团聚体中的分布情况可以看出, 各粒级团聚体中均表现为 CK、S、NPK 的 ROC 含量显著低于 M、MNPK 和 SNPK($P<0.05$)。这表明单独施用化肥情况下, 作物根系和凋落物归还输入土壤的碳不足以维持输入与输出的平衡, 而作物根系生长过程中激发了微生物对土壤有机质分解, 加速了土壤碳的降解与释放, 很难使 ROC 得到积累。由此可见, 实行有机无机结合很有必要, 通过实施秸秆还田和有机粪肥部分替代化肥可促进 ROC 积累, 提高土壤的固碳保肥能力。

2.3.3 添加外源有机物料对土壤易氧化有机碳的影响

土壤有机碳含量是容量指标, 不足以全面反映土壤质量的内在变化^[17]。因此, 能被 $333 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ KMnO_4 氧化^[18]的易氧化有机碳(LOC)便被引进作为土壤有机质的活性指标^[19]。LOC 周转时间较短, 与土壤养分的供应和作物生长密切相关, 是植物营养的主要来源^[20], 可以用来指示土壤有机质的早期变化^[21]。本研究表明, 18 年有机粪肥的施用和秸秆还田促进土壤 LOC 的转化与积累(图 5), 增加了 LOC 在 TOC 中的占比, 对比图 5 和图 1 可知, 在施用化肥基础上增施有机粪肥(MNPK)和实施秸秆还田(SNPK)使 LOC/TOC 由 CK 的 11.94% 分别增加到 14.95% 和 15.70%, 对提高土壤供肥能力起到了积极作用; 而单独施用化肥(NPK)有降低土壤 LOC 含量的趋势。从 LOC 在不同粒级团聚体中分布可以看出, 小团聚体中的 LOC 含量高于微团聚体和大团聚体。添加外源有机物料对不同粒级团聚体中 LOC 含量均有显著的提高作用($P<0.05$) (图 5), 以化肥与有机物料配合施用 LOC 增加更为显著, 不同粒级团聚体中增幅存在差异, 大团聚体中 MNPK>SNPK, 小团聚体中 SNPK>MNPK, 微团聚体中二者 LOC 含量基本相当。这表明, 施用化肥基础上增施有机粪肥利于 LOC 保存在大团聚体中, 提高了土壤供肥能力, 而实施秸秆还田(SNPK)则促进了 LOC 向较小粒径团聚体迁移, 可提高土壤的保肥能力。这为提倡有机无机养分配合施用, 特别是近年来全面实施秸秆还田的基础上推行有机粪肥部分替代化肥的施肥策略提供了理论依据。

2.4 土壤各粒级团聚体中碳的富集系数

土壤有机碳富集系数(EC)表示特定粒径土壤团聚体土壤有机碳含量与全土有机碳含量的比

值^[22], 代表着不同粒级团聚体土壤对有机碳固持与保持能力^[23]。当 $\text{EC}>1$ 时, 该粒级团聚体土壤中有有机碳处于积累状态; 当 $\text{EC}<1$ 时, 该粒级团聚体土壤中有有机碳则进入优先分解状态或向其他粒级库发生了迁移。

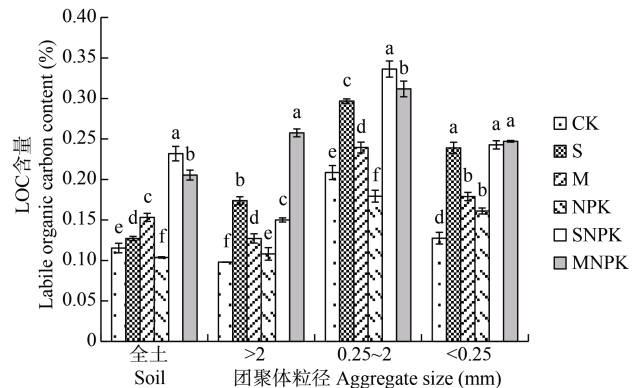


图 5 不同长期施肥处理下土壤非水稳性团聚体易氧化有机碳(LOC)含量

Fig. 5 Labile organic carbon contents of soil non-water-stable aggregates with different sizes under different long-term fertilization treatments

CK: 不施肥无有机物料还田; M: 单施有机粪肥; NPK: 单施化肥; MNPK: 化肥配施有机粪肥; SNPK: 化肥配施秸秆; SCK: 单施秸秆。数据为 3 次重复的平均值加减标准误。不同小写字母表示同一粒径不同处理间 $P<0.05$ 水平差异显著。CK: no fertilizer without organic materials; M: single application of organic manure; NPK: application of chemical fertilizers; MNPK: combined application of chemical fertilizers and organic manure; SNPK: combined application of chemical fertilizers and straw; SCK: single application of straws. Values are means \pm S.E. ($n=3$). Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments for the same aggregate size at $P<0.05$.

图 6 给出了不同施肥模式下土壤团聚体中各组分有机碳的富集系数。对于 TOC 来说(图 6A), 各处理微团聚体中 EC 均小于 1, 表明处于微团聚体中的有机碳向其他粒级库发生了迁移; 而对于 CK 处理, 各粒级团聚体中的 EC 亦均小于 1, 这表明长期缺乏外源有机物料的输入, 各粒级团聚体中有有机碳均处于分解消耗状态; 对于各施肥和秸秆还田处理, 在小团聚体中 EC 均大于 1, 表明增加外源投入, 均促进了有机碳在小团聚体中的积累; 而在大团聚体中, 单一施肥处理(NPK、S、M)EC 均大于 1, 而有机无机配合处理(SMPK、MNPK)其 EC 均小于 1, 说明营养均衡供应情况下利于土壤微生物活性提高, 促进了大团聚体中有有机碳的分解转化。对 DOC 而言(图 6B), 由于受到添加的外源有机物料组成成分的影响, 两个有机粪肥处理(M、MNPK)各粒级团聚体中的 EC 均大于 1, 而其他施肥处理的 EC 在各粒级团聚体中的表现不一, 这说明施用有机粪肥易于促进 DOC 在团聚体中积累。酸解 AC 中(图 6C), 各处理

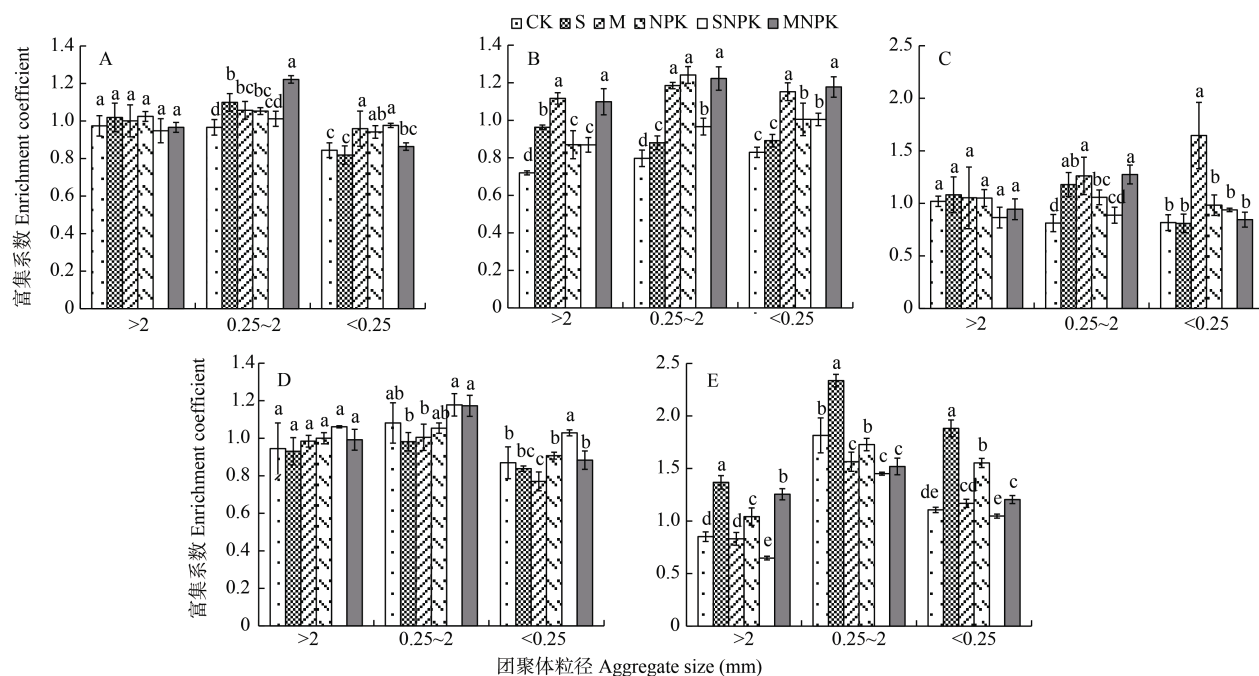


图 6 不同长期施肥处理下土壤非水稳性团聚体总有机碳(A)、可溶性有机碳(B)、酸水解有机碳(C)、惰性有机碳(D)和易氧化有机碳(E)富集系数

Fig. 6 Enrichment coefficients of total organic carbon (A), dissolved organic carbon (B), active organic carbon (C), resistant organic carbon (D) and labile organic carbon (E) in soil non-water-stable aggregates with different sizes under different long-term fertilization treatments

CK: 不施肥无有机物料还田; M: 单施有机粪肥; NPK: 单施化肥; MNPK: 化肥配施有机粪肥; SNPK: 化肥配施秸秆; SCK: 单施秸秆。数据为 3 次重复的平均值加减标准误。不同小写字母表示同一粒径不同处理间 $P < 0.05$ 水平差异显著。CK: no fertilizer without organic materials; M: single application of organic manure; NPK: application of chemical fertilizers; MNPK: combined application of chemical fertilizers and organic manure; SNPK: combined application of chemical fertilizers and straw; SCK: single application of straws. Values are means \pm S.E. ($n=3$). Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments for the same aggregate size at $P < 0.05$.

大团聚体 EC 无显著性差异, 只有 SNPK 和 MNPK 处理下呈现优先分解状态; 各施肥处理对小团聚体的 EC 影响表现不同, CK 和 SNPK 处理 $EC < 1$, 其他处理 EC 值均 > 1 , 以 M 和 MNPK 的富集效果最好; 微团聚体内仅 M 处理呈积累状态。ROC 方面(图 6D), 在小团聚体中各处理均表现为积累状态, 而在大团聚体和微团聚体中, 多数处理的 $EC < 1$, ROC 处于优先分解状态; 纵观各处理, 只有 SNPK 在各团聚体中的 EC 值均 > 1 , 其他处理或在大团聚体或在微团聚体中表现出处于优先分解状态。至于 LOC(图 6E), 在小团聚体和微团聚体中各处理的 EC 尽管存在显著性差异, 但其值均 > 1 , 均表现出积累状态; 而大团聚体内各处理 EC 差异不仅显著, 且表现不一, 这说明施肥对 LOC 的影响首先作用于大团聚体。

2.5 土壤各粒级团聚体中碳的贡献率

不同粒级团聚体对土壤有机碳的贡献率可以直观地反映有机碳在团聚体中的分布。如图 7 所示, > 0.25 mm 团聚体的各组分有机碳贡献率可达 74% 以上, 表明土壤中各组分有机碳主要分布在大团聚体

和小团聚体中。比较单独添加有机物料和有机物料配合化肥施用可以看出, S 和 M 处理 > 2 mm 团聚体中各组分有机碳(LOC 除外)贡献率均超过 0.25~2 mm 团聚体, 而 SNPK 和 MNPK 处理各组分有机碳的贡献率均为小团聚体大于大团聚体。这表明, 有机物料单独施用有利于有机碳组分固持在大团聚体中, 有机无机配施模式则有利于有机碳向小团聚体中迁移, 在提高团聚体有机碳含量的同时, 也增强了其在团聚体中的稳定性。

2.6 土壤有机碳组分与不同粒级团聚体含量的关系

不同粒径间土壤团聚体含量与其各组分有机碳含量存在一定的相关关系。从表 3 可知, > 2 mm 团聚体含量与其 DOC 和 ROC 含量显著正相关($P < 0.05$), 0.25~2 mm 团聚体含量与各组分有机碳无显著性关系, < 0.25 mm 团聚体含量与其酸解 AC 含量极显著负相关($P < 0.01$), 与 DOC、ROC 和 LOC 含量呈显著负相关($P < 0.05$) (表 3)。这表明土壤中 DOC 和 ROC 含量的增加对大团聚体的形成有显著的促进作用, 各组分有机碳含量的增高有利于减少微团聚体在土壤中的占比。

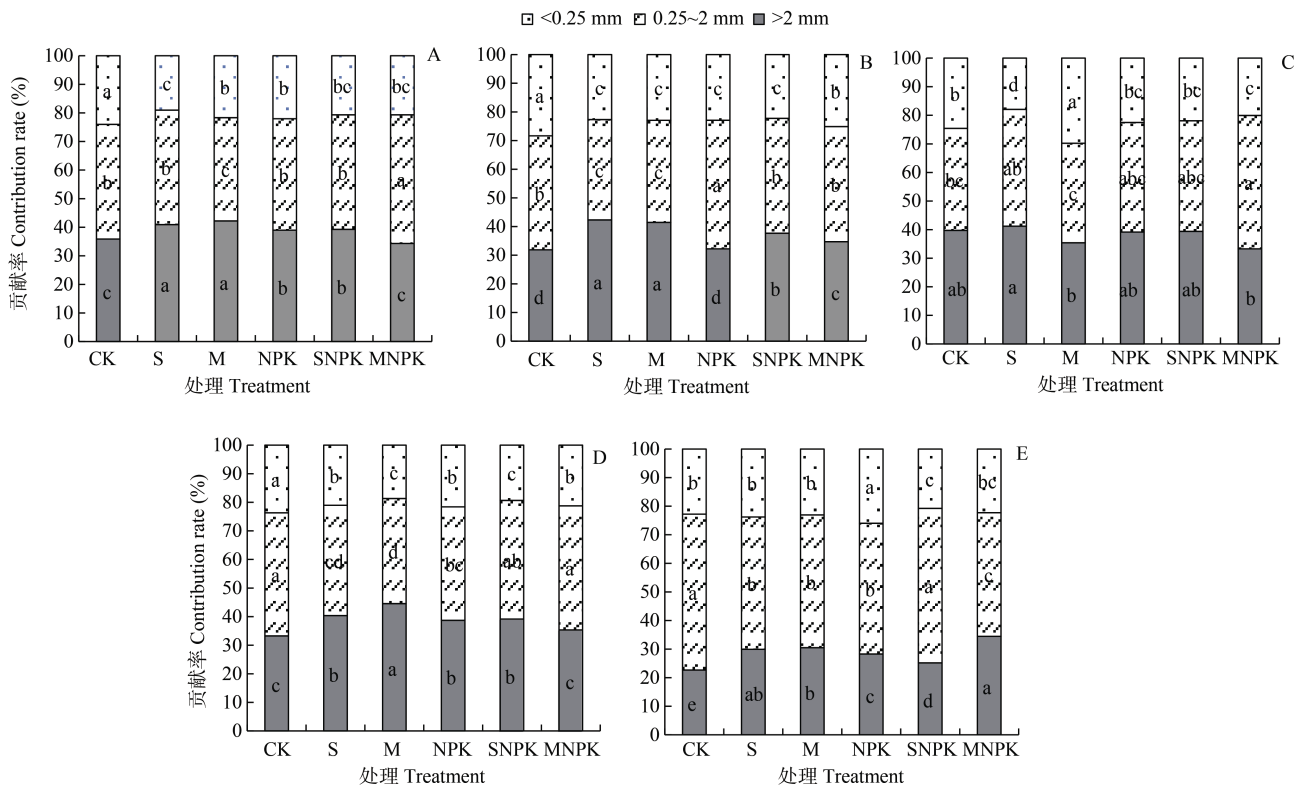


图 7 不同长期施肥处理下不同粒径土壤非水稳性团聚体总有机碳(A)、可溶性有机碳(B)、酸水解有机碳(C)、惰性有机碳(D)和易氧化有机碳(E)的贡献率

Fig. 7 Contributions of total organic carbon (A), dissolved organic carbon (B), active organic carbon (C), resistant organic carbon (D) and labile organic carbon (E) in soil non-water-stable aggregates with different sizes under different long-term fertilization treatments

CK: 不施肥无有机物料还田; M: 单施有机粪肥; NPK: 单施化肥; MNPK: 化肥配施有机粪肥; SNPK: 化肥配施秸秆; SCK: 单施秸秆。数据为 3 次重复的平均值加减标准误。不同小写字母表示同一粒径不同处理间 $P < 0.05$ 水平差异显著。CK: no fertilizer without organic materials; M: single application of organic manure; NPK: application of chemical fertilizers; MNPK: combined application of chemical fertilizers and organic manure; SNPK: combined application of chemical fertilizers and straw; SCK: single application of straws. Values are means±S.E. ($n=3$). Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments for the same aggregate size at $P < 0.05$.

表 3 土壤非水稳性团聚体组成(y)与各有机碳组分含量(X)的关系

Table 3 Relationship between soil organic carbon content (y) and contents of non-water-stable aggregates with different sizes (X)

团聚体粒径 Aggregate size (mm)	相关系数 Correlation coefficient				回归方程 Equation of regression	R^2
	DOC/A	AC/B	ROC/C	LOC/D		
>2	0.546*	-0.002	0.589*	-0.082	$y=40.897X_A+2.920X_B+10.869X_C+10.723X_D$	0.762
0.25~2	0.195	0.263	0.107	0.372	$y=32.958X_A+4.138X_B+13.533X_C+22.191X_D$	-0.035
<0.25	-0.503*	-0.596**	-0.500*	-0.493*	$y=41.112X_A+3.980X_B+13.590X_C+19.147X_D$	0.400

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$. DOC: 土壤可溶性有机碳; AC: 酸水解有机碳; ROC: 惰性有机碳; LOC: 易氧化有机碳。DOC: dissolved organic carbon; AC: active organic carbon; ROC: resistant organic carbon; LOC: labile organic carbon.

3 讨论与结论

土壤有机碳是土壤团聚体形成过程中主要的胶结物质之一^[24], 团聚体的分布和稳定性又影响着土壤有机碳的分解与转化^[5]。本研究中, 外源有机物料可以促进<0.25 mm 团聚体形成更大的团聚体, 这与尚应妮等^[25]研究结果一致。这是因为有机物料进入土壤后, 一方面可以直接成为团聚体形成过程中的

核心, 吸附土壤中细小的颗粒^[26]; 另一方面, 外源有机物料的添加直接提高了土壤中有有机碳的含量, 有机碳作为胶结物质, 可以有效地促进团聚体的形成^[24]。有机物料的加入也可以增强土壤中微生物活性, 真菌菌丝的生长使得细小颗粒被缠绕形成团聚体^[27]。各粒径团聚体间各有机碳组分含量普遍为: 小团聚体>大团聚体>微团聚体。有学者^[28]认为出现该现象是因为大团聚体相对于其他粒径团聚体稳定性

较低,且其有机碳含量不容易达到平衡。但 Six 等^[11]提出的团聚体发育模型主张:较大粒径团聚体是由游离的小团聚体与临时性胶结剂(植物根、真菌菌丝等)黏结而成;此外,较大粒径团聚体的结构能对其中的有机碳及其组分起到更好的保护作用,土壤有机碳含量应随着粒径的减小而降低。亦有文献^[29]报道,与细粒级土壤颗粒结合的土壤有机质存在“阈值”,当向土壤添加外源有机物料引起全土中有机碳的增加会增加细粒级土壤有机质,当有机碳含量接近饱和^[30],土壤中的碳会在较大粒级团聚体中储存,从而使较大粒级团聚体的有机碳富集因子提高。

肥料的施用增强了土壤的固碳供碳能力。有机粪肥使得团聚体中 DOC 状态由优先分解转化为积累状态,减少了土壤可溶性碳的损失。秸秆使大团聚体和微团聚体中 ROC 不断累积,在保证对作物供给的同时,增强了土壤的固氮能力。这是由于秸秆及有机粪肥组成成分不同,尤其是 C/N 不同。与秸秆相比,有机粪肥的 C/N 较低,适宜于 C/N 较低的细菌生存(细菌 C/N 为 3~5),为土壤提供了分解更彻底的养分,使更多的 DOC 在土壤中积累,这也是本研究中 M 和 MNPK 两个处理各粒级团聚体中 DOC 的富集因子 EC 均大于 1 的主要原因。而秸秆 C/N 比较高,且主要由木质素、纤维素和半纤维素等物质构成,很难被微生物降解,这是秸秆还田处理 ROC 不断累积的主要原因。而李新华等^[31]认为秸秆在地表的覆盖使得土壤表面径流减弱、土壤温度升高,比粪肥更有利于土壤 DOC 的积累。本试验还发现,经过 18 年长期还田后,团聚体内部分有机碳各处理 EC 间无显著差异。主要原因是经过长时间的积累和转化,土壤团聚体中部分有机碳达到饱和水平。有研究显示,秸秆还田后一年内 50% 秸秆会被矿化、分解,20~30 年内,几乎所有施入农田的营养性有机碳都会降解^[1]。也有一些基于长期定位试验的结果显示,当土壤中有有机碳含量较高时,随着外源有机碳投入量的增加,土壤有机碳含量并没有出现显著增多的现象,而是保持在一个特定值范围内^[32-35]。

此外,将同一粒径团聚体中不同有机碳组分的组成比例与该粒径团聚体含量进行综合考虑,可以全面地反映各有机碳组分在团聚体中对土壤有机碳的贡献率^[36]。王碧胜等^[37]通过试验发现,秸秆的添加可以显著地提高 0.25~2 mm 团聚体有机碳的贡献率,这与本研究的 SNPK 和 MNPK 两处理的结果一致,而本研究中的只添加外源有机物料(S 和 M)却增加了大团聚体对有机碳的贡献率。本试验还发现秸秆和有机粪肥的施用降低了大团聚体对土壤 LOC 的

贡献率,有机-无机混施模式各粒径团聚体有机碳组分的贡献率与 CK 趋势一致。各有机碳组分与团聚体形成之间也存在着一定的线性关系,有机碳含量的提高可以促进较小粒径团聚体形成大粒径团聚体,DOC 和 ROC 对大团聚体的形成至关重要,但酸解 AC 和 LOC 对大团聚体的形成无显著性影响,各组分有机碳对小团聚体的形成有一定促进作用,但其促进效果未达到统计学上的显著水平,而各组分有机碳在减少微团聚体含量方面发挥着重要作用。

本研究表明,秸秆和有机粪肥的施用可以促进大团聚体的形成,提高各有机碳组分的含量,增强有机碳组分在团聚体中的富集能力。施用化肥基础上增施有机粪肥利于易氧化有机碳在大团聚体中的保存,提高了土壤供肥能力,而实施秸秆还田(SNPK)则促进了易氧化有机碳向较小粒径团聚体迁移,提高了有机碳稳定性和土壤的保肥能力。对比单一施肥处理(S, M 和 NPK),有机-无机配施(MNPK 和 SNPK)提高了团聚体有机碳组分的贡献率。因此,践行有机无机结合、实施秸秆还田和有机粪肥部分替代化肥很有必要。在长期秸秆还田措施下实施有机粪肥部分替代化肥可发挥秸秆和有机粪肥的双重作用,不仅可以促进土壤团聚体的形成和稳定,也可以增强土壤和团聚体的固碳供碳能力。

参考文献 References

- [1] 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
ZHANG W L, KOLBE H, ZHANG R L. Research progress of SOC functions and transformation mechanisms[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(2): 317-331
- [2] 殷丹, 李欢, 徐江兵, 等. 长期配施秸秆与猪粪的红壤旱地有机碳库组成特征[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1259-1269
YIN D, LI H, XU J B, et al. Composition characteristics of organic carbon pool in upland red soil under long-term application of straw and pig manure[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1259-1269
- [3] 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
XU G X, WANG Z F, GAO M, et al. Effects of straw and biochar return in soil on soil aggregate and carbon sequestration[J]. Environmental Science, 2018, 39(1): 355-362
- [4] SIMONETTI G, FRANCIOSO O, NARDI S, et al. Characterization of humic carbon in soil aggregates in a long-term experiment with manure and mineral fertilization[J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76(3): 880-890
- [5] 李江涛, 钟晓兰, 赵其国. 畜禽粪便施用对稻麦轮作土壤质量的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(10): 2837-2845
LI J T, ZHONG X L, ZHAO Q G. Enhancement of soil quality in a rice-wheat rotation after long-term application of

- poultry litter and livestock manure[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(10): 2837–2845
- [6] 白怡婧, 刘彦伶, 李渝, 等. 长期不同轮作模式对黄壤团聚体组成及有机碳的影响[J]. *土壤*, 2021, 53(1): 161–167
BAI Y J, LIU Y L, LI Y, et al. Effects of different long-term rotation patterns on aggregate composition and organic carbon in yellow soil[J]. *Soils*, 2021, 53(1): 161–167
- [7] 王碧胜, 于维水, 武雪萍, 等. 不同耕作措施下添加秸秆对土壤有机碳及其相关因素的影响[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(6): 1176–1187
WANG B S, YU W S, WU X P, et al. Effects of straw addition on soil organic carbon and related factors under different tillage practices[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(6): 1176–1187
- [8] 林欣欣, 刘思佳, 关松, 等. 不同秸秆利用方式对黑土团聚体及其腐殖物质的影响[J/OL]. *吉林农业大学学报*, 2021, doi:10.13327/j.jjlau.2020.55784
LIN X X, LIU S J, GUAN S, et al. Effects of different utilization methods of straw on aggregates and humic substance in black soil[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2021, doi:10.13327/j.jjlau.2020.55784
- [9] 马凡凡. 有机肥替代对稻-麦产量、土壤肥力及农田氮磷流失的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019
MA F F. Effects of organic fertilizer replacement on rice-wheat yield, soil fertility and nitrogen and phosphorus loss from farmland[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019
- [10] 田慎重, 王瑜, 张玉凤, 等. 旋耕深松和秸秆还田增加农田土壤团聚体碳库[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(24): 133–140
TIAN S Z, WANG Y, ZHANG Y F, et al. Residue returning with subsoiling replacing rotary tillage improving aggregate and associated carbon[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(24): 133–140
- [11] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(5): 1367–1377
- [12] MOORE T R, DE SOUZA W, KOPRIVNIAK J F. Controls on the sorption of dissolved organic carbon by soils[J]. *Soil Science*, 1992, 154(2): 120–129
- [13] 胡海清, 陆昕, 孙龙. 土壤活性有机碳分组及测定方法[J]. *森林工程*, 2012, 28(5): 18–22
HU H Q, LU X, SUN L. Research review on soil active organic carbon fractionation and analytical methods[J]. *Forest Engineering*, 2012, 28(5): 18–22
- [14] 汪伟, 杨玉盛, 陈光水, 等. 罗浮栲天然林土壤可溶性有机碳的剖面分布及季节变化[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(6): 924–928
WANG W, YANG Y S, CHEN G S, et al. Profile distribution and seasonal variation of soil dissolved organic carbon in natural *Castanopsis fabric* forest in subtropical China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(6): 924–928
- [15] PARTON W J, SCHIMEL D S, COLE C V, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51(5): 1173–1179
- [16] 余健, 房莉, 卞正富, 等. 土壤碳库构成研究进展[J]. *生态学报*, 2014, 34(17): 4829–4838
YU J, FANG L, BIAN Z F, et al. A review of the composition of soil carbon pool[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(17): 4829–4838
- [17] 张璐, 张文菊, 徐明岗, 等. 长期施肥对中国 3 种典型农田土壤活性有机碳库变化的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(5): 1646–1655
ZHANG L, ZHANG W J, XU M G, et al. Effects of long-term fertilization on change of labile organic carbon in three typical upland soils of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(5): 1646–1655
- [18] LEFROY R D B, BLAIR G J, STRONG W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ^{13}C natural isotope abundance[J]. *Plant and Soil*, 1993, 155/156(1): 399–402
- [19] BIEDERBECK V O, JANZEN H H, CAMPBELL C A, et al. Labile soil organic matter as influenced by cropping practices in an arid environment[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(12): 1647–1656
- [20] 徐明岗, 于荣, 王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化[J]. *土壤学报*, 2006, 43(5): 723–729
XU M G, YU R, WANG B R. Labile organic matter and carbon management index in red soil under long-term fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5): 723–729
- [21] BLAIR G J, LEFROY R, LISLE L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459
- [22] 杨少红. 土地利用变化对土壤有机碳和土壤呼吸的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2006
YANG S H. The effects of land use change on the soil organic carbon and the soil respiration[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2006
- [23] 徐香茹, 骆坤, 周宝库, 等. 长期施肥条件下黑土有机碳、氮组分的分配与富集特征[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(7): 1961–1968
XU X R, LUO K, ZHOU B K, et al. Distribution and enrichment characteristics of organic carbon and total nitrogen in mollisols under long-term fertilization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(7): 1961–1968
- [24] 刘哲, 韩霖昌, 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
LIU Z, HAN J C, SUN Z H, et al. Effects of fresh carbon on distribution and stability of aggregates and organic carbon in red soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(6): 2351–2359
- [25] 尚妮妮, 胡斐南, 赵世伟, 等. 不同胶结物质对黄绵土团聚体形成的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 204–208, 239
SHANG Y N, HU F N, ZHAO S W, et al. Effects of cementing materials on the formation of loessial soil aggregates[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017,

- 31(2): 204–208, 239
- [26] 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
- [27] ZHANG X F, XIN X L, ZHU A N, et al. Linking macroaggregation to soil microbial community and organic carbon accumulation under different tillage and residue managements[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 178: 99–107
- [28] 曾鹏宇. 长期施用猪粪对稻麦轮作土壤团聚体及有机碳组分的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2017
- ZENG P Y. The effect of long-term application with pig manure on soil aggregate and organic carbon components in rice-wheat rotation[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2017
- [29] JAN H. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles[J]. *Plant and Soil*, 1997, 191: 77–87
- [30] CARTER M, ANGERS D, GREGORICH E. Characterizing organic matter retention for surface soils in eastern Canada using density and particle size fraction[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2003, 83(1): 11–23
- [31] 李新华, 郭洪海, 朱振林, 等. 不同秸秆还田模式对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(9): 130–135
- LI X H, GUO H H, ZHU Z L, et al. Effects of different straw return modes on contents of soil organic carbon and fractions of soil active carbon[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(9): 130–135
- [32] CAMPBELL C A, ZENTNER R P, BOWREN K E, et al. Effect of crop rotations and fertilization on soil organic matter and some biochemical properties of a thick Black Chernozem[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1991, 71(3): 377–387
- [33] GULDE S, CHUNG H, AMELUNG W, et al. Soil carbon saturation controls labile and stable carbon pool dynamics[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(3): 605–612
- [34] SOLBERG E, NYBORG M, IZAIRRALDE R, et al. Carbon storage in soils under continuous cereal grain cropping: N fertilizer and straw[J]. *Management of Carbon Sequestration in Soil*, 1998, 16: 235–254
- [35] STEWART C E, PAUSTIAN K, CONANT R T, et al. Soil carbon saturation: Evaluation and corroboration by long-term incubations[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(7): 1741–1750
- [36] SARKER J R, SINGH B P, COWIE A L, et al. Agricultural management practices impacted carbon and nutrient concentrations in soil aggregates, with minimal influence on aggregate stability and total carbon and nutrient stocks in contrasting soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 178: 209–223
- [37] 王碧胜, 于维水, 武雪萍, 等. 添加玉米秸秆对旱作土壤团聚体及其有机碳含量的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(9): 1553–1563
- WANG B S, YU W S, WU X P, et al. Effect of straw addition on the formation of aggregates and accumulation of organic carbon in dryland soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(9): 1553–1563