

长期施肥条件下红壤有机碳化学结构与团聚体稳定性的关系

胡丹丹¹, 李 浩², 宋惠洁¹, 胡志华¹, 叶会财¹,
李大明¹, 余喜初¹, 万长艳¹, 柳开楼^{1*}

(1. 江西省红壤研究所 国家红壤改良工程技术研究中心, 江西 南昌 330046; 2. 河南科技学院资源与环境学院, 河南 新乡 453003)

摘要:【目的】红壤普遍存在团聚体结构较差和有机碳含量较低的问题, 土壤有机碳是影响土壤团聚体结构的重要指标, 但以往研究主要关注有机碳含量与团聚体的相关关系, 而对有机碳的化学结构如何调控团聚体结构则缺乏深入研究。

【方法】依托始于 1986 年的红壤旱地长期施肥试验, 选取不施肥 (CK)、施用氮磷肥 (NP)、施用氮磷钾肥 (NPK)、施用氮磷钾肥和猪粪 (NPKOM) 和单施猪粪 (OM) 五个处理。于 2019 年早玉米收获后采集 0~20 cm 土壤样品, 分析土壤有机碳含量、有机碳化学结构和团聚体组分等指标, 并进一步量化有机碳化学结构与团聚体平均重量直径的相关关系。【结果】结果表明: NPKOM 和 OM 处理的有机碳分别比 CK 增加了 51.63% 和 34.34%。与 CK 相比, NPKOM 处理的烷基碳、烷氧碳比例分别提高了 29.85% 和 21.54%, OM 处理的烷基碳、烷氧碳比例则分别比 CK 提高了 31.98% 和 28.81%。但是, NPKOM 和 OM 处理的芳香度分别比 CK 降低了 24.90% 和 25.19%, 而 NPKOM 和 OM 处理的脂族碳/芳香碳比值则分别比 CK 增加了 64.87% 和 73.34%。同时, 施肥处理 (NP、NPK、NPKOM 和 OM) 的团聚体平均重量直径 (*MWD*) 均显著高于 CK 处理。土壤有机碳和脂族碳/芳香碳比值均与 *MWD* 呈显著正相关关系, 但芳香度与 *MWD* 呈显著负相关关系。【结论】有机肥施用是改善红壤旱地有机碳化学结构的重要措施, 其施用提升了红壤旱地烷基碳/烷氧碳和脂族碳/芳香碳比值, 降低了土壤有机碳的芳香度, 从而促进了土壤有机碳的累积和团聚体平均重量直径的增加, 为红壤结构稳定奠定了基础。

关键词: 红壤; 土壤有机碳; 有机碳化学结构; 土壤团聚体

中图分类号: S156.6 文献标识码: A 文章编号: 0564-3945(2022)01-0152-08

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2020122902

胡丹丹, 李 浩, 宋惠洁, 胡志华, 叶会财, 李大明, 余喜初, 万长艳, 柳开楼. 长期施肥条件下红壤有机碳化学结构与团聚体稳定性的关系 [J]. 土壤通报, 2022, 53(1): 152-159

HU Dan-dan, LI Hao, SONG Hui-jie, HU Zhi-hua, YE Hui-cai, LI Da-ming, YU Xi-chu, WANG Chang-yan, LIU Kai-lou. The Relationship between Chemical Structure of Organic Carbon and Stability of Aggregates in Red Soils under Long-term Fertilization[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(1): 152-159

【研究意义】红壤是中国南方丘陵区重要的土壤类型, 但是, 受成土母质和高温高湿等气候因素的影响, 红壤普遍存在酸粘瘦板蚀等特点, 再加上不合理的开发利用, 从而严重制约了红壤生产力的发挥^[1]。作为土壤肥力的核心指标, 有机碳的含量水平对于红壤的培肥改良至关重要^[2]。因此, 提升红壤的有机碳含量是保障该地区作物生产力的关键。

【前人研究进展】大量研究表明, 通过施用有机肥等措施提升土壤有机碳含量是改良红壤的主要措施之一^[3-5], 潘艳斌等^[6]研究表明, 与常规施肥相比,

秸秆混匀与猪粪处理下土壤有机碳含量显著提高。土壤有机碳含量的增加也明显改善了红壤的团聚体结构^[7-10], 郑学博等^[11]研究发现, 土壤有机碳含量升高是 > 0.25 mm 机械稳定性和水稳定性团聚体含量增加的主要原因。同时, 团聚体组分中有机碳含量和周转速率进一步调控了土壤有机碳的积累和矿化^[12-13]。且土壤有机碳的组分等指标显著影响土壤有机碳的质量^[14-15], 从而可能驱动土壤团聚体发生变化。目前有许多研究分析了有机碳含量与团聚体的相关关系^[16], 前人研究表明, 土壤有机碳的物理和化学组

收稿日期: 2020-12-29; 修订日期: 2021-09-28

基金项目: 江西省自然科学基金 (20192BAB203022)、国家红壤改良工程技术研究中心开放基金 (2020NETRCRSI-9) 和湖南省教育厅优秀青年科研项目 (18B404) 资助

作者简介: 胡丹丹 (1994-), 女, 江西南昌人, 硕士, 研究实习员, 主要从事红壤改良与施肥技术研究。E-mail: danhcbwlh@163.com

*通讯作者: E-mail: liukailou@163.com

分的差异显著影响团聚体稳定性^[17], 外源新沉积有机碳的增加可以提高土壤大团聚体的稳定性^[4]。王迪等^[9]研究表明, 与其他组分相比, 颗粒有机碳与团聚体平均质量直径的相关性最好。刘哲等^[4]研究认为, 红壤旱地上大团聚体中的有机碳含量与团聚体稳定性呈极显著的相关关系。作为表征土壤有机碳质量的重要指标, 有机碳化学结构的变化与团聚体稳定性也存在密切联系。李娜等^[18]研究表明, 土壤中有有机碳的化学结构均表现为烷氧碳比例最高, 其次为烷基碳和芳香碳, 羧基碳比例最低。虽然大量研究已经探讨了团聚体组分中有有机碳化学结构的变化^[19-20], 但对于有机碳化学结构与团聚体的相关关系则主要为定性分析, 即配施有机肥处理下土壤有机碳化学结构中烷氧碳的增加主要是在大团聚体中, 羧基碳则主要在大团聚体和微团聚体中积聚^[20]。结合相关系数发现, 有机碳的化学结构与团聚体碳组分呈正相关或负相关关系^[21], 且烷基碳和烷氧基碳对土壤团聚体稳定性十分关键^[22], 在潮土上, 团聚体内烷基碳/烷氧碳比率与碳氮比呈显著负相关^[20]。而在温带草地土壤上, Zinaida 等^[23]研究表明, 烷氧碳与土壤团聚体平均重量直径存在显著的正相关关系。【**本研究切入点**】但是, 在热带农田土壤上, 关于土壤有机碳化学结构与团聚体稳定性的定量关系仍缺乏深入解析。因此, 本研究以有机碳化学结构为切入点, 针对有机碳含量较低的红壤旱地, 尝试量化土壤有机碳化学结构与团聚体平均重量直径的关系。【**拟解决的问题**】依托红壤旱地长期施肥定位试验, 选择长期不同施肥下有机碳含量差异较大的土壤, 以改善土壤团聚体结构为目标, 于 2019 年早玉米收获后采集耕层土壤 (0~20 cm) 样品, 分析了不同施肥处理下各处理的土壤有机碳含量和有机碳化学结构及团聚体组分等指标, 以期量化有机碳化学结构与团聚体的相关关系, 从而为红壤旱地的有机培肥提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

长期施肥试验位于江西省进贤县张公镇 (116°20' E, 28°15' N), 该地区属于亚热带季风气候, 年平均降雨量和温度分别为 1727 mm 和 17.7 °C。试验地土壤母质为第四纪红黏土。1986 年试验开始时耕层 (0~20 cm) 土壤 pH 为 6.0, 有机碳含量为

9.39 g kg⁻¹。种植制度为双季玉米, 早玉米生育期为 4 月至 7 月, 晚玉米生育期为 7 月至 11 月。

试验共设 10 个施肥处理, 每个处理 3 次重复, 小区随机排列, 小区面积为 22.22 m²。本研究选择了 5 个处理, 分别为: 不施肥 (CK), 施用氮磷肥 (NP, 每季玉米的 N 和 P₂O₅ 用量分别为 60 和 30 kg hm⁻²), 施用氮磷钾肥 (NPK, 每季玉米的 N、P₂O₅ 和 K₂O 用量分别为 60、30 和 60 kg hm⁻²), 施用氮磷钾肥和猪粪 (NPKOM, 每季玉米的 N、P₂O₅ 和 K₂O 用量分别为 60、30 和 60 kg hm⁻², 猪粪用量为 15000 kg hm⁻²), 单施猪粪 (OM, 每季玉米的猪粪用量为 15000 kg hm⁻²)。猪粪的含水量为 75%, 有机碳含量分别为 340 g kg⁻¹。氮磷钾肥种类为尿素、钙镁磷肥和氯化钾, 其中磷肥、钾肥和猪粪在玉米播种前作为基肥, 氮肥用量的 2/3 为基肥, 1/3 在玉米出苗后 30 d 作追肥施用。

1.2 样品采集与制备

于 2019 年早玉米收获后采集 0~20 cm 耕层的土样, 每个小区按五点法采样并混匀后自然风干, 其中一部分过 5 mm 筛, 用于测定土壤团聚体的稳定性, 剩下的部分过 2 mm 筛测定土壤有机碳含量及有机碳化学结构。

1.3 测定项目与统计方法

土壤有机碳采用 H₂SO₄-K₂Cr₂O₇ 外加热法^[24]。考虑到红壤旱地采集的土块大小不一, 颗粒均匀性较差, 采用干筛湿筛相结合的方法测定土壤团聚体分析^[7], 团聚体分级为 > 2 mm、1~2 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm、0.053~0.25 mm 和 < 0.053 mm, 并进一步计算了团聚体平均重量直径 (MWD) ^[6]。土壤有机碳化学结构采用 HF 处理并结合固态¹³C 核磁共振波谱用瑞士 Bruker AVANCE III 400 型核磁共振仪测定^[27]。在测定开始前参考 Li 等^[25]的方法对土样进行预处理。具体步骤如下: 称取 5 g 风干土样 (过 0.15 mm 筛) 到离心管中, 再加入 15 ml 0.1 mol L⁻¹ 盐酸后震荡 0.5 h, 然后在离心机上离心 10 min, 除去上清液, 重复 3 次。然后加入 50 ml 氢氟酸溶液继续震荡 1 h, 并离心 20 min, 除去上清液, 重复 5 次。最后, 采用蒸馏水将离心管中的残留样品清洗 3 次, 冷冻干燥上机测定。

不同有机碳化学结构的表征指标计算如下^[20]:

烷基碳/烷氧碳比值 = 烷基碳/烷氧碳

芳香度 (%) = (芳香碳 + 酚基碳) /
(烷基碳 + 烷氧碳 + 芳香碳) × 100

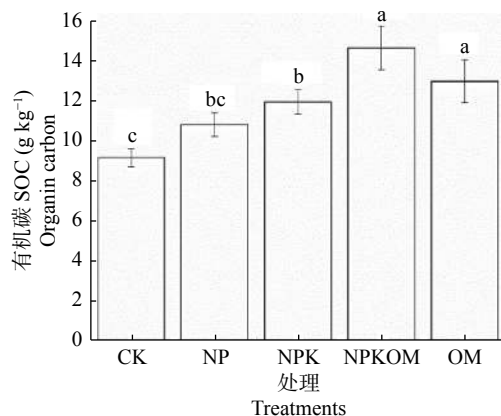
脂族碳/芳香碳比值=(烷基碳+烷氧碳)/芳香碳

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据处理, 采用 SAS 9.5 进行统计分析, 多重比较采用 Duncan 分析法; 作图采用 Origin 8.5。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳变化

不同施肥处理显著改变土壤有机碳含量(图 1)。与 CK 相比, NPK、NPKOM 和 OM 处理的土壤有机碳含量分别增加了 23.68%、51.63% 和 34.34%, 但 NP 处理则无显著提升。在所有处理中, NPKOM 处理的有机碳显著最高, OM 处理则略低于 NPKOM 处理, 但差异不显著; 且 NP 和 NPK 处理的有机碳也不存在显著差异。



注: 图中同一指标不同字母表示各处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

图 1 长期施肥处理下土壤有机碳的变化

Fig.1 Changes of soil organic carbon in long term fertilization treatments

2.2 土壤有机碳化学结构变化

不同施肥处理下, 土壤有机碳化学结构差异显著(图 2 和图 3)。在所有处理中, 烷氧碳的比例均显著高于其他碳组分。与 CK 相比, NPKOM 和 OM 处理的烷基碳比例分别提高了 29.85% 和 31.98%, 其烷氧碳的比例也增加了 21.54% 和 28.81%; 而 NPKOM 和 OM 处理的芳香碳和羧基碳比例则显著低于 CK。但是, NP 和 NPK 处理的烷基碳和烷氧碳则与 CK 无显著差异, 且 NP 处理的芳香碳和羧基碳也与 CK 无显著差异。不同于 NP 处理, NPK 处理的芳香碳比 CK 降低了 21.22%, 羧基碳则比 CK 增加了 25.34%。

通过图 4 发现, CK 和 NP 处理间的烷基碳/烷氧碳比值、芳香度和脂族碳/芳香碳比值均无显著差异。

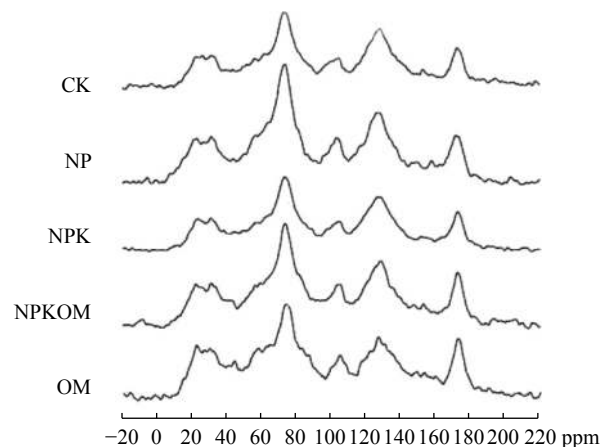


图 2 长期施肥处理下土壤有机碳¹³C 核磁共振图谱

Fig.2 ¹³C nuclear magnetic resonance spectra of soil organic carbon in long term fertilization treatments

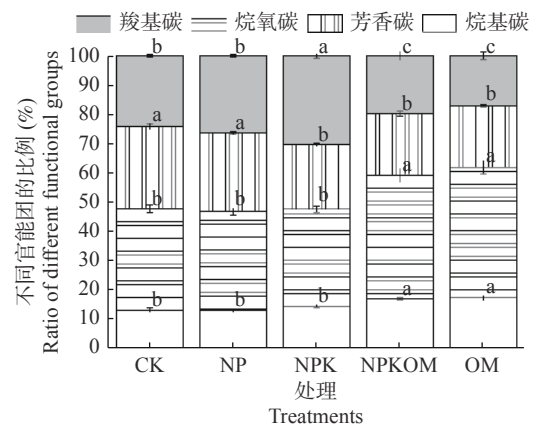


图 3 长期施肥处理下土壤有机碳化学结构

Fig.3 Chemical structure for soil organic carbon in long-term fertilization treatments

与 CK 相比, NPK 处理的烷基碳/烷氧碳比值增加了 15.93%, 而 NPKOM 和 OM 处理则与 CK 无显著差异。但是, 与 CK 相比, NPK、NPKOM 和 OM 处理的芳香度则分别降低了 21.22%、24.90% 和 25.19%, 脂族碳/芳香碳比值也分别提高了 26.41%、64.87% 和 73.34%。同时, NPK、NPKOM 和 OM 处理的烷基碳/烷氧碳比值和芳香度间无显著差异, 而脂族碳/芳香碳比值则表现出 NPKOM 和 OM 处理显著高于 NPK 处理。

2.3 土壤团聚体组分

在红壤旱地上, 团聚体组分比例的高低顺序为 0.053 ~ 0.25 mm 和 0.25 ~ 0.5 mm, 其次为 < 0.053 mm 和 0.5 ~ 1 mm, 而 1 ~ 2 mm 和 > 2 mm 较低(表 1)。在所有处理中, 0.25 ~ 0.5 mm 和 < 0.053 mm 无显著差异之外, 其余团聚体组分均差异显著, 与 CK 相比, NP 处理的 > 2 mm、1 ~ 2 mm、0.5 ~ 1 mm 和

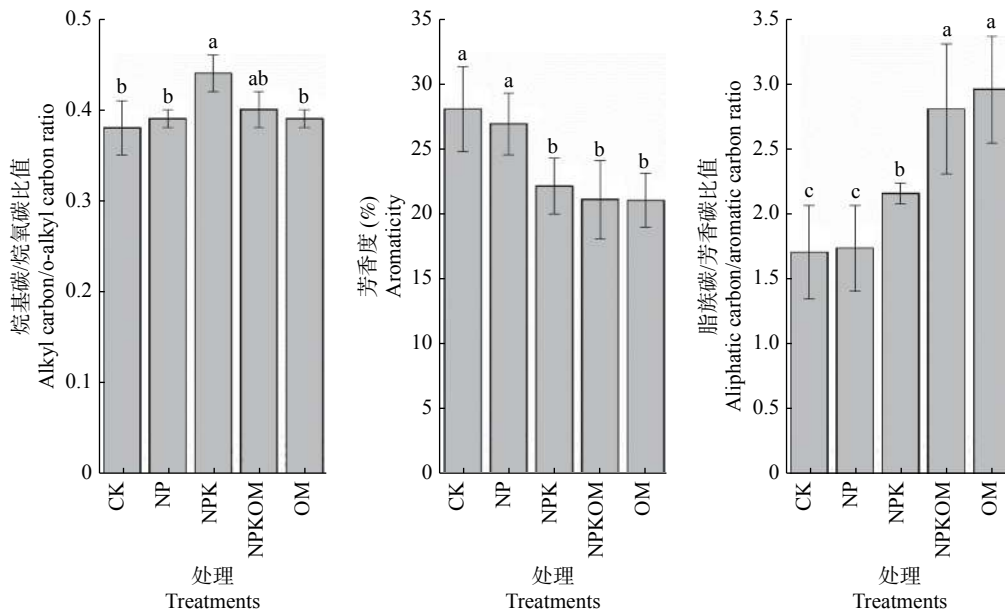


图 4 长期施肥处理下土壤有机碳化学结构指标

Fig.4 Indexes of chemical structure for soil organic carbon in long-term fertilization treatments

表 1 长期施肥处理下土壤团聚体组分变化

Table 1 Changes of soil aggregate composition in long-term fertilization

处理 Treatments	团聚体组分的比例 (%) Proportion of soil aggregate components						团聚体平均重量直径 (mm) MWD
	> 2 mm	1 ~ 2 mm	0.5 ~ 1 mm	0.25 ~ 0.5 mm	0.053 ~ 0.25 mm	< 0.053 mm	
CK	4.21 ± 0.54 cd	5.78 ± 1.13 b	10.51 ± 0.83 c	24.35 ± 1.47 a	39.91 ± 1.49 a	15.25 ± 1.75 a	0.33 ± 0.21 c
NP	3.39 ± 0.67 d	7.69 ± 1.88 ab	15.47 ± 3.00 bc	28.00 ± 7.79 a	30.40 ± 1.40 b	15.04 ± 5.07 a	0.40 ± 0.12 b
NPK	4.67 ± 0.49 c	6.62 ± 2.00 b	21.18 ± 5.88 ab	29.09 ± 1.10 a	24.46 ± 3.25 c	13.99 ± 3.12 a	0.42 ± 0.08 b
NPKOM	7.15 ± 0.43 a	11.02 ± 2.57 a	21.91 ± 4.68 a	25.34 ± 3.05 a	24.07 ± 1.20 c	10.51 ± 0.34 a	0.48 ± 0.02 a
OM	6.03 ± 0.23 b	9.32 ± 1.12 b	22.45 ± 2.33 a	23.67 ± 1.05 a	25.94 ± 0.87 c	12.59 ± 0.21 a	0.45 ± 0.04 ab

注: 表中同一列不同字母表示各处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

< 0.053 mm 团聚体组分的比例均无显著差异 (除了 0.053 ~ 0.25 mm), 而 NPKOM 处理的 > 2 mm、1 ~ 2 mm 和 0.5 ~ 1 mm 团聚体组分的比例则比 CK 处理增加了 69.80%、90.66% 和 108.53%, OM 处理的 > 2 mm、1 ~ 2 mm 和 0.5 ~ 1 mm 团聚体组分的比例比 CK 处理增加了 43.12%、61.31% 和 113.63%, 且 NPKOM 和 OM 处理也显著高于 NPK 处理。但 NPKOM 处理的 0.053 ~ 0.25 mm 团聚体组分的比例则比 CK 处理降低了 31.09%。

进一步计算表明, NP、NPK、NPKOM 和 OM 处理的团聚体平均重量直径 (MWD) 分别比 CK 增加了 19.01%、26.14%、44.11% 和 36.32%。各处理仍表现出 NPKOM 处理的 MWD 最高, 且 OM 处理与 NPKOM 无显著差异。但 NPK 和 NP 处理的 MWD 则显著低于 NPKOM 处理。

2.4 土壤团聚体与有机碳及化学结构的相关关系

在所有有机碳指标中, 除了烷基碳/烷氧碳比值

之外, 其他指标均与 MWD 存在显著的相关关系 ($P < 0.05$, 图 5)。拟合方程的斜率 (表 2) 表明, 当土壤有机碳增加 1 g kg^{-1} , MWD 可以提高 0.03 mm, 当脂族碳/芳香碳比值提高 1 个单位时, MWD 则提高 0.09 mm。但是, 不同于有机碳和脂族碳/芳香碳比值, 芳香度则与 MWD 呈显著负相关关系, 当芳香度增加 1%, MWD 降低了 0.02 mm。

3 讨论

3.1 长期施肥改变了红壤有机碳化学结构

与黑土和潮土等土壤类型相比, 红壤的有机碳含量普遍较低^[26]。因此, 提升有机碳含量的是红壤培肥改良的关键。大量研究表明, 长期配施有机肥是提高红壤有机碳含量的主要措施^[3-5,26], 且外源有机碳投入量与红壤耕层的有机碳储量变化速率之间存在显著的正相关关系^[5]。王雪芬等^[12]通过有机碳半衰期试验表明, 施用有机肥下土壤有机碳库更新加快,

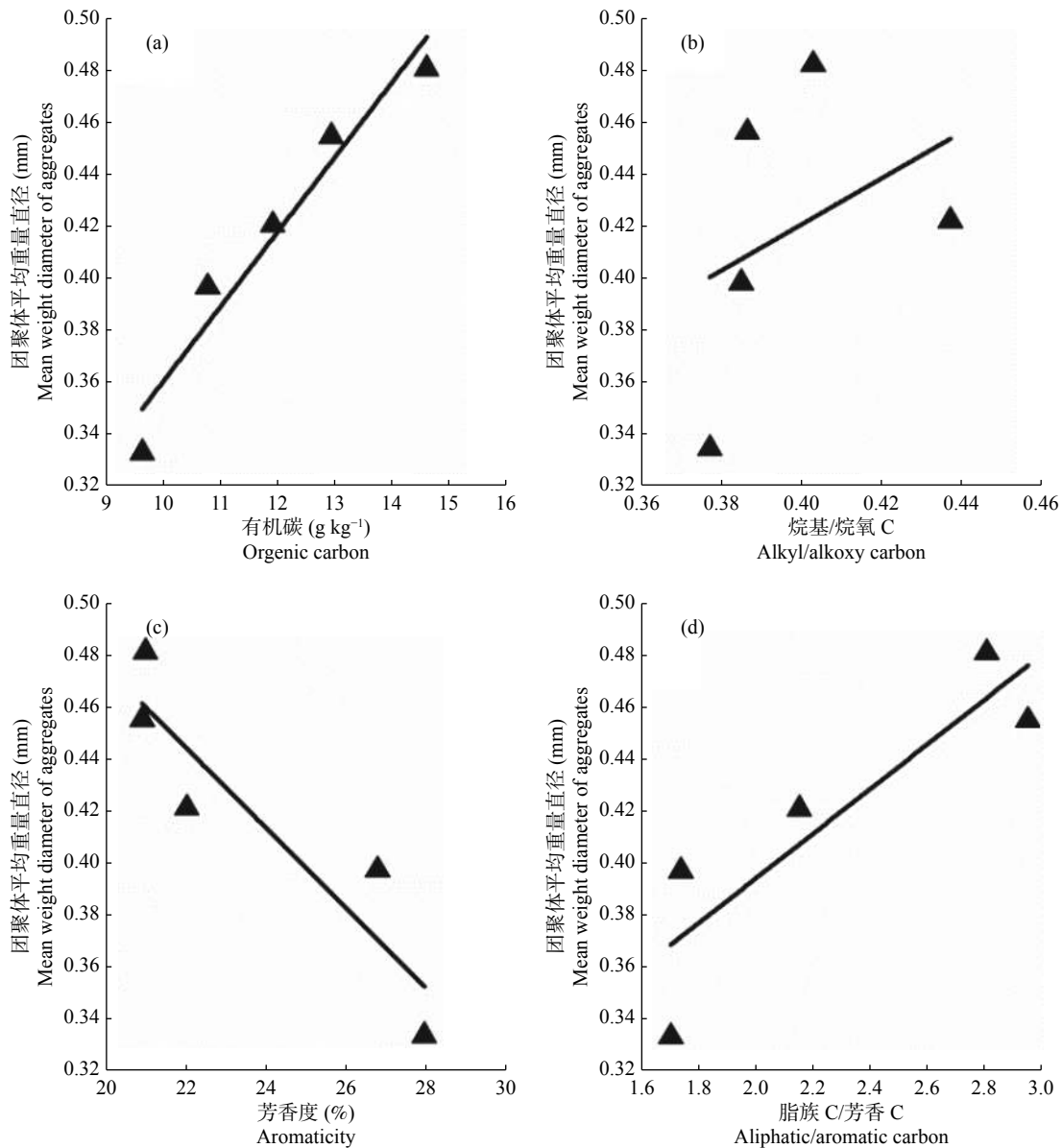


图 5 团聚体平均重量直径与有机碳指标的相关关系

Fig.5 The correlation between mean weight diameter of soil aggregates and organic carbon indexes

表 2 团聚体平均重量直径与有机碳指标的拟合方程

Table 2 Fitting equation of mean weight diameter of soil aggregates and organic carbon indexes

指标 Indexes	拟合方程 Fitting equation	R^2	P
有机碳 Organic carbon	$y = 0.0286x + 0.0744$	0.9427	0.0059
烷基碳/烷氧碳 Alkyl/alkoxy carbon	$y = 0.8806x + 0.0668$	0.1389	0.5366
芳香度 Aromaticity	$y = -0.0154x + 0.7827$	0.8381	0.0291
脂族碳/芳香碳 Aliphatic/aromatic carbon	$y = 0.0855x + 0.223$	0.7825	0.0462

从而显著提高了红壤有机碳库的周转速率。本研究也表明, 化肥配施有机肥和单施有机肥处理下土壤有机碳分别比不施肥处理提高了 51.63% 和 34.34%, 这充分说明有机肥配施对红壤有机碳含量具有显著的提升作用。

进一步解析土壤有机碳的化学结构发现, 与其

他有机碳结构相比, 所有处理均表现出烷氧碳的比例最高, 这与前人的研究结果相似^[14,18,26]。一般情况下, 烷基碳属于有机碳中较为稳定和难以分解的碳组分, 烷氧碳则属于相对容易分解的碳组分^[27-28], 同时, 芳香碳和芳香度的增加一般指示土壤有机物腐殖化程度较高, 从而不利于有机碳的积累, 而脂族

碳/芳香碳比值的提高则表征土壤有机质的脂族特性增强, 芳香性降低, 分子结构趋于简单化。本研究结果表明, 化肥配施有机肥和单施有机肥处理下烷基碳和烷氧碳所占比例均显著高于不施肥处理, 说明有机肥施用促进了红壤旱地中有机碳的烷基化程度, 进而导致难分解碳组分比例的提高。并显著提高了脂族碳/芳香碳比值, 说明长期施用有机肥导致土壤有机质的脂族特性增强, 芳香性降低, 分子结构趋于简单化, 与前人研究结果一致^[27]。

但是, 化肥配施有机肥和单施有机肥处理下芳香碳和羧基碳比例以及芳香度均显著低于不施肥处理, 从而进一步证明长期配施有机肥有利于有机碳的积累。本研究发现, 化肥配施有机肥和单施有机肥处理显著降低了大团聚体中芳香族碳的丰度, 但是, Yan 等^[14]研究表明, 不同施肥措施不会显著改变红壤的有机碳化学结构, 这可能是由于其在 4 月份采样, 该时期较多的雨水导致的水土流失^[29]可能影响了土壤样品的化学结构分析, 但具体原因还有待进一步分析。再加上不同时期的有机肥来源和成分也存在一定差异^[30-31], 因此, 关于长期施肥下红壤有机碳化学结构的研究还有待持续监测和分析。

3.2 长期施肥下红壤团聚体组分变化及其与有机碳化学结构的关系

团聚体的组成对土壤的结构稳定及其肥力的保持有重要作用, 一般情况下, 大粒径团聚体组分越多, 土壤团聚体稳定越高^[32]。赵红等^[33]研究发现, 施用有机肥可在提高土壤有机碳含量的同时, 改善土壤团聚体结构。本研究表明, 化肥配施有机肥和单施有机肥处理下红壤的 > 2 mm、1~2 mm 和 0.5~1 mm 团聚体组分的比例均得到显著提升。同时, 化肥配施有机肥和单施有机肥处理的团聚体平均重量直径分别比不施肥处理增加了 44.11% 和 36.32%, 这与前人研究结果基本一致^[10,14], 但增幅略有差异, 原因可能是不同年限的有机碳累积投入量不同造成的, 前人研究也表明, 较多有机碳含量有助于将中微团聚体胶结成大团聚体^[17]。有机碳含量对土壤团聚体的稳定具有重要作用, 与团聚体平均重量直径呈显著正相关关系, 有机肥的施用能够增加有机胶结物质, 从而提高多糖等微生物代谢产物的含量, 进而促进土壤团聚化程度^[17,34]。在本研究中, 除了土壤有机碳含量之外, 土壤有机碳化学结构中脂族碳/芳香碳比值等指标的提升有利于团聚体平均重量直径

的增加, 而芳香度的增加则降低了团聚体平均重量直径。Kubar 等^[21]研究进一步表明, 土壤有机碳化学结构的烷氧碳与 > 0.25 mm 团聚体比例存在显著的正相关关系。原因可能是长期不同施肥改变了土壤 pH 和全氮含量^[35], 诱导了土壤团聚体中参与碳循环的细菌群落组成和真菌基因的变化, 从而显著改变了土壤有机碳化学结构和团聚体稳定性^[36]。因此, 在红壤的培肥改良中, 建议优先选择对土壤脂族碳/芳香碳比值提升较为显著的有机肥种类, 从而有利于较好地改良土壤团聚体结构。同时, 本研究进一步明确了有机碳化学结构与团聚体平均重量直径的定量关系, 可以更为精准地指导红壤区的团聚体改良。但是, 由于红壤区域较为广泛, 其土壤初始理化条件差异较大^[37], 再加上多发的高温高湿多雨等气候因素, 关于土壤有机碳化学结构与团聚体平均重量直径的量化关系还有待进一步验证。

4 结论

在红壤旱地上, 长期配施有机肥处理增加了烷基碳/烷氧碳和脂族碳/芳香碳比值, 降低土壤有机碳的芳香度。同时, 土壤有机碳和脂族碳/芳香碳比值的提高有助于提升团聚体平均重量直径, 而芳香度的增加则会导致团聚体平均重量直径的降低。因此, 长期配施有机肥是改善红壤旱地有机碳化学结构的重要措施, 这表明, 在红壤旱地应大力推广有机无机肥配施技术, 从而同时实现改善土壤有机碳化学结构和提高团聚体稳定性的双重目标。

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, 2014, 33(24): 7615 - 7622.
- [2] 李忠佩, 刘明, 江春玉. 红壤典型区土壤中有有机质的分解、积累与分布特征研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(2): 220 - 228.
- [3] 李江舟, 代快, 张立猛, 等. 施用生物炭对云南烟区红壤团聚体组成及有机碳分布的影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(6): 2114 - 2120.
- [4] 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.
- [5] 柳开楼, 叶会财, 李大明, 等. 长期施肥下红壤旱地的固碳效率[J]. 土壤, 2017, 49(6): 1166 - 1171.
- [6] 潘艳斌, 朱巧红, 彭新华. 有机物料对红壤团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 209 - 214.
- [7] 柳开楼, 黄晶, 张会民, 等. 长期施肥对红壤旱地团聚体特性及不同组分钾素分配的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(2): 443 -

- 454.
- [8] 周 芸, 李永梅, 范茂攀, 等. 有机肥等氮替代化肥对红壤团聚体及玉米产量和品质的影响[J]. 作物杂志, 2019, (4): 125 – 132.
- [9] 王 迪, 吴新亮, 蔡崇法, 等. 长期培肥下红壤有机碳组成与团聚体稳定性的关系[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(1): 61 – 70.
- [10] Liu K L, Han T F, Huang J, et al. Response of soil aggregate-associated potassium to long-term fertilization in red soil[J]. *Geoderma*, 2019, 352: 160 – 170.
- [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] 王雪芬, 胡 锋, 彭新华, 等. 长期施肥对红壤不同有机碳库及其周转速率的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(5): 954 – 961.
- [13] Peng X, Yan X, Zhou H, et al. Assessing the contributions of sesquioxides and soil organic matter to aggregation in an Ultisol under long-term fertilization[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 146: 89 – 98.
- [14] Yan X, Zhou H, Zhu Q H, et al. Carbon sequestration efficiency in paddy soil and upland soil under long-term fertilization in southern China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2013, 130: 42 – 51.
- [15] 盛 明, 韩晓增, 龙静泓, 等. 中国不同地区土壤有机质特征比较研究[J]. 土壤与作物, 2019, 8(3): 320 – 330.
- [16] 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.
- [17] 窦 森, 李 凯, 关 松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. 土壤学报, 2011, 48(2): 412 – 418.
- [18] 李 娜, 盛 明, 尤孟阳, 等. 应用¹³C核磁共振技术研究土壤有机质化学结构进展[J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 796 – 812.
- [19] 郑凤君, 王 雪, 李生平, 等. 免耕覆盖下土壤水分、团聚体稳定性及其有机碳分布对小麦产量的协同效应[J]. 中国农业科学, 2021, 54(3): 596 – 607.
- [20] 郭素春, 郁红艳, 朱雪竹, 等. 长期施肥对潮土团聚体有机碳分子结构的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 922 – 930.
- [21] Kubar K A, Huang L, Xue B, et al. Straw management stabilizes the chemical composition of Soil Organic Carbon (SOC): the relationship with aggregate-associated C in a rice-rapeseed cropping system[J]. *Land Degradation Development*, 2021, 32: 851 – 866.
- [22] Ellerbrock R H, Gerke H H, Bachmann J, et al. Composition of organic matter fractions for explaining wettability of three forest soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69: 57 – 66.
- [23] Zinaida Artemyeva, Natalia Danchenko, Yury Kolyagin, Nataliya Kirillova, Boris Kogut, Chemical structure of soil organic matter and its role in aggregate formation in Haplic Chernozem under the contrasting land use variants, *Catena*, 2021, 204, 105403, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105403>.
- [24] 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.
- [25] Li D D, Liu K L, Huang Q H, et al. Different responses of soil carbon chemistry to fertilization regimes in the paddy soil and upland soil were mainly reflected by the opposite shifts of OCH and alkyl C[J]. *Geoderma*, 2021, 385: 114876.
- [26] He Y T, He X H, Xu M G, et al. Long-term fertilization increases soil organic carbon and alters its chemical composition in three wheat-maize cropping sites across central and south China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2018, 177: 79 – 87.
- [27] Dou S, Zhang J J, Li K. Effect of organic matter applications on ¹³C-NMR spectra of humic acids of soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2008, 59: 532 – 539.
- [28] Ussiri D A N, Johnson C E. Characterization of organic matter in a northern hardwood forest soil by ¹³C NMR spectroscopy and chemical methods[J]. *Geoderma*, 2003, 111: 123 – 149.
- [29] 黄尚书, 成艳红, 钟义军, 等. 水土保持措施对红壤缓坡地土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 468 – 476.
- [30] 李忠佩, 林心雄. 瘠薄红壤中有机物质的分解特征[J]. 生态学报, 2002, 22(8): 1224 – 1230.
- [31] Tirol-Padre A, Ladha J K, Regmi A P, et al. Organic Amendments Affect Soil Parameters in Two Long-Term Rice-Wheat Experiments[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(2): 442 – 452.
- [32] Barthes B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels[J]. *Catena*, 2002, 47(2): 133 – 149.
- [33] 赵 红, 袁培民, 吕贻忠, 等. 施用有机肥对土壤团聚体稳定性的影响[J]. 土壤, 2011, 43(2): 306 – 311.
- [34] Sodhi G P S, Beri V, Benbi D K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice-wheat system[J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 103(2): 412 – 418.
- [35] 柳开楼, 韩天富, 胡惠文, 等. 红壤旱地玉米开花期土壤酶活性对长期施肥的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1610 – 1618.
- [36] Duan Y, Chen L, Zhang J, et al. Long-term fertilisation reveals close associations between soil organic carbon composition and microbial traits at aggregate scales[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 306: 107169.
- [37] 周海燕, 徐明岗, 蔡泽江, 等. 湖南祁阳县土壤酸化主要驱动因素贡献解析[J]. 中国农业科学, 2019, 52(8): 1400 – 1412.

The Relationship between Chemical Structure of Organic Carbon and Stability of Aggregates in Red Soils under Long-term Fertilization

HU Dan-dan¹, LI Hao², SONG Hui-jie¹, HU Zhi-hua¹, YE Hui-cai¹,
LI Da-ming¹, YU Xi-chu¹, WANG Chang-yan¹, LIU Kai-lou^{1*}

(1. National Red Soil Improvement Engineering Technology Research Center, Jiangxi Institute of Red Soil, Nanchang 330046, China;

2. College of Resources and Environment Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China)

Abstract: [Objective] In general, it is poor structure and lower organic carbon content in red soil. Soil organic carbon (SOC) is the key indicator for affecting soil structure. However, lot of studies were focused on the relationship between SOC and aggregates. It was unknown that the regulation mechanism of SOC on aggregate. [Method] Based on the long-term experiment in red soil which started in 1986. Five treatments were selected: No fertilizers (CK); mineral nitrogen and phosphorus (NP); mineral nitrogen, phosphorus, and potassium (NPK); NPK plus pig manure (NPKOM); pig manure only (OM). Soil in 0-20 cm was sampled after early corn harvested in 2019. SOC content and its chemical structure, aggregate components were measured and analyzed. The correlation between the chemical structure of SOC and aggregates was further quantified. [Result] Compared with CK, SOC content under NPKOM and OM was increased by 51.63% and 34.34%, respectively; the proportion of alkyl carbon and alkoxy carbon in NPKOM was increased by 29.85% and 21.54%, respectively; they were increased by 31.98% and 28.81%, respectively, in OM. But the proportions of aromatic carbon and carboxyl carbon in NPKOM and OM were decreased. Compared with CK, the aromaticity of NPKOM and OM was reduced than CK by 24.90% and 25.19%, respectively. While, the aliphatic carbon and aromatic carbon ratio were increased by 64.87% and 73.34%. Meanwhile, the mean weight diameter (*MWD*) under all the treatments with fertilizer (NP, NPK, NPKOM and OM) was significantly higher than that under CK. SOC, aliphatic carbon, and aromatic carbon ratio were positive correlated with *MWD*, while the aromaticity was negative correlated with *MWD*. [Conclusion] Manure application was an optimum management to improve SOC chemical structure. The ratio of alkyl carbon and alkoxy carbon, aliphatic carbon and aromatic carbon were increased, but the aromaticity was reduced. Therefore, the soil structure was improved by SOC accumulation and *MWD* promotion.

Key words: Red soil; Soil organic carbon; Organic carbon chemical structure; Soil aggregates

[责任编辑: 韩春兰]