

DOI: 10.11689/sc.2023032801

冯浩亮, 韩晓增, 陆欣春, 等. 有机培肥影响土壤团聚体形成与稳定的研究进展[J]. 土壤与作物, 2023, 12 (4): 393–400.

FENG H L, HAN X Z, LU X C, et al. Research progress on the formation and stability of soil aggregates by organic fertilization[J]. Soils and Crops, 2023, 12 (4): 393–400.

# 有机培肥影响土壤团聚体形成与稳定的研究进展

冯浩亮<sup>1,2</sup>, 韩晓增<sup>1</sup>, 陆欣春<sup>1</sup>, 陈旭<sup>1</sup>, 严君<sup>1</sup>, 邹文秀<sup>1</sup>

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 黑龙江哈尔滨 150081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 土壤团聚体是土壤生态系统中重要的组成部分, 它的形成与稳定过程影响着土壤的物理、化学以及生物学性质, 对于土壤结构形成、养分赋存状态也有着重要影响。长期有机培肥能够提高土壤有机质含量, 通过为土壤团聚体的形成提供胶结物质, 进而促进其形成与稳定过程, 是土壤肥力提高和土壤结构改良的重要途径之一。为阐明有机培肥措施对于土壤团聚体形成与稳定机制的影响, 本文总结了土壤团聚体结构稳定性、固碳、养分赋存以及微生物变化对该措施响应, 讨论了有机培肥措施与团聚体不同过程之间的联系。长期有机培肥措施能够加快团聚体形成周期, 增强团聚体稳定性, 增加团聚体养分赋存的总量, 提高养分有效性。土壤团聚体形成与稳定过程、机制及养分赋集过程的微生物驱动机制仍缺乏研究, 在未来的研究中建议加强多尺度、多要素耦合研究, 揭示团聚体对土壤有机培肥响应的过程与机理。

**关键词:** 有机培肥; 土壤团聚体; 形成机制; 稳定机制; 土壤养分

中图分类号: S152.4

文献标识码: A

## Research progress on the formation and stability of soil aggregates by organic fertilization

FENG Haoliang<sup>1,2</sup>, HAN Xiaozeng<sup>1</sup>, LU Xinchun<sup>1</sup>, CHEN Xu<sup>1</sup>, YAN Jun<sup>1</sup>, ZOU Wenxiu<sup>1</sup>

(1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Soil aggregates are important components of the soil ecosystem. The formation and stabilization of soil aggregates affect the physical, chemical, and biological properties of soil; and play an important role in the formation of soil structure nutrients occurrence as well. Long-term application of organic fertilizer can increase soil organic matter content, provide cementing materials for the formation of soil aggregates, and promote the formation and stability of soil aggregates; which is one of the important ways to improve soil fertility and soil structure. To elucidate the effects of organic fertilizer on the formation and stabilization mechanism of soil aggregates, the responses of soil aggregate structural stability, carbon sequestration, nutrient occurrence, and microbial changes to these practices were summarized, and the relationships between organic fertilizer and different aggregate processes were discussed. Long-term organic fertilizer can accelerate the formation cycle of aggregates, enhance the stability of aggregates, increase the total amount of nutrients in aggregates, and improve nutrient availability. The process and mechanism of soil aggregate formation and stabilization as well as the microbial driving mechanism of the nutrient accumulation process are still lack in research. Future investigation should strengthen multi-scale and multi-factor coupling studies in revealing the process mechanisms of soil aggregates under organic fertilizer application.

**Key words:** organic fertilizer; soil aggregates; formation mechanisms; stabilization mechanisms; soil nutrient

## 0 引言

肥料作为农业生产中必不可少的一环, 一直受到农业科技工作者的重视, 有关施肥制度的研究使我们

收稿日期: 2023-03-28; 修回日期: 2023-09-14.

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 A 类 (XDA28070100); 国家重点研发计划 (2022YFD1500100); 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系资助 (CARS-04); 中国科学院区域发展青年学者项目 (2022-027)。

第一作者简介: 冯浩亮 (1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤物理研究. E-mail: fenghaoliang@iga.ac.cn.

通信作者: 邹文秀 (1982-), 女, 研究员, 主要从事土壤肥力研究. E-mail: zouwenxiu@iga.ac.cn.

认识到有机肥的优势和对于培肥土壤的重要性。研究表明,有机肥具有养分含量全面、有机质含量高且肥效持久的优点,从环境保护和可持续发展的角度来说更符合现代农业的需求。从土壤自身的角度,良好的土壤结构是保证土壤肥力的关键,在此基础上提升土壤养分含量更加有助于肥力的高效利用,维持农业生产力。而土壤团聚体就是保证土壤结构的基本指标,其粒径分布与稳定性影响土壤中水分、气体、养分的运输和储存,同时为微生物提供生境。长期施用有机肥能够提高土壤有机质含量,改善土壤结构。为探究有机培肥对于土壤团聚体形成与稳定的影响(图1),本文从有机培肥途径对于土壤团聚体结构、稳定性、固碳、养分赋存以及微生物的影响层面,总结现有研究存在的不足与局限,为今后土壤团聚体对有机培肥措施响应方面的研究提供引导。

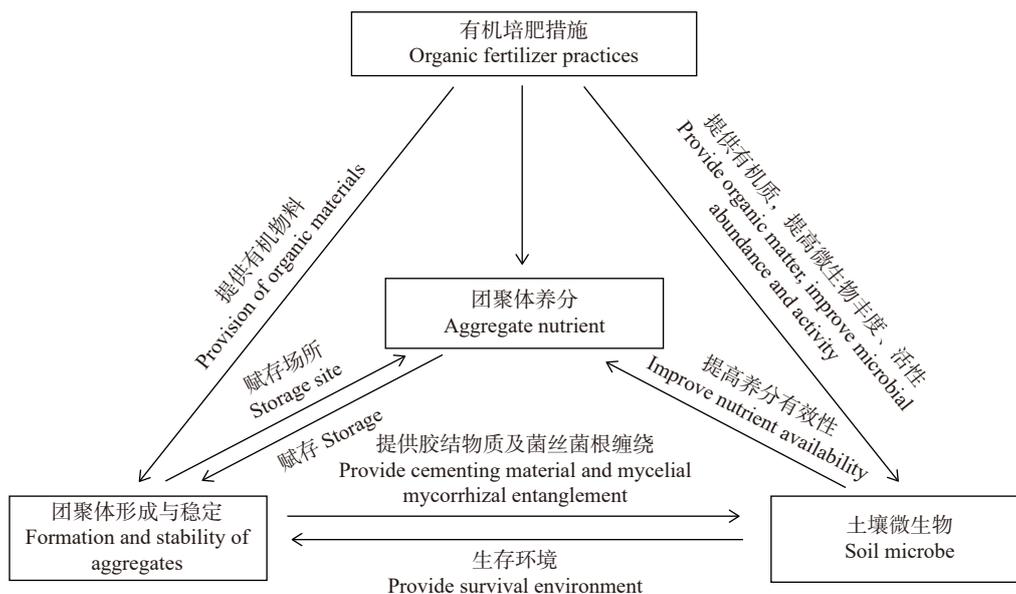


图1 有机培肥措施-土壤团聚体相关关系图

Fig. 1 Organic fertilization - soil aggregate correlation diagram

## 1 土壤团聚体研究现状

土壤团聚体是土壤颗粒经过胶结作用形成的个体,是土壤结构的基本单元。土壤团聚体被认为是土壤结构稳定性的替代指标,并且在调节土壤水肥气热以及存储表土有机质方面起着至关重要的作用<sup>[1-2]</sup>。在土壤团聚体形成的研究过程中,Oades等<sup>[3]</sup>于1984年提出的团聚体聚合层次理论模型被广泛接受,即在土壤中首先通过真菌菌丝和根系的作用将较大的游离的初级颗粒连接在一起形成大团聚体,其次在大团聚体中心形成微团聚体的核心。根系和菌丝作为暂时的结合剂会在大团聚体内被分解并作为组分参与形成微团聚体。土壤团聚体稳定性指团聚体抵抗外力或内部环境变化而保持其原有形态的能力,主要包括机械稳定性和水稳定性,除此之外还有力学稳定性、化学稳定性、生物稳定性和酸碱稳定性。其中,有机质是微团聚体形成过程中的主要粘合剂,根系和真菌菌丝在微团聚体结合成为大团聚体中起着重要的作用。大团聚体的稳定性与根和菌丝的生长及分解速率密切相关,微团聚体的稳定性和团聚性能与土壤有机质的含量密切相关<sup>[4]</sup>。

长期施用有机肥能够为土壤提供全面的营养元素,并影响土壤团聚体形成与稳定过程,改善土壤环境<sup>[5]</sup>。研究表明,在团聚体周转的过程中土壤生物发挥着重要的调节作用<sup>[6]</sup>,有机培肥实验结果显示:虽然由于母质及环境等因素差异,不同土壤间增加有机质组成与含量有较为显著的差异,但是整体来说增加了土壤各粒级团聚体的有机碳、全氮含量和碳氮比等,并且能够提高土壤微生物多样性及相关微生物类群丰度和酶活性<sup>[7]</sup>。

## 2 有机培肥对土壤团聚体的影响

### 2.1 有机培肥对土壤团聚体形成和结构的影响

关于土壤团聚体形成, 早期较为经典的理论包括 1967 年 Edwards 和 Bremner<sup>[8]</sup> 提出的微团聚体理论, 该理论指出土壤有机物、黏土矿物和多价阳离子在微团聚体形成过程中起到关键作用。两人又在 1964 与 1965 年分别提出了微团聚体之间的弱结合是形成大团聚体的基础; 吸附和沉淀作用是团聚体形成过程中的关键作用<sup>[9-10]</sup>。与前文提到的团聚体聚合层次理论模型等围绕团聚体形成的五大相关因素(土壤动物、土壤微生物、根系、无机结合剂、环境变量)进行研究。直到 2004 年 Six 等<sup>[11]</sup> 对这些因素进行了量化研究, 通过建立模型说明了土壤扰动对于团聚体周转过程的影响。在团聚体形成的过程中, 无论是分解有机物料和微生物分泌物等与矿质颗粒形成大团聚体的过程, 还是微团聚体在有机物的参与下重新形成大团聚体的过程, 新鲜的有机物质输入都是必不可少的。有机培肥措施通过增加土壤中有机质含量, 在降解过程中提高微生物丰度、分泌物及残骸, 在促进团聚体形成的过程中起到了至关重要的作用。有结果显示, 在黄土高原有机培肥实验中, 绿肥对于促进团聚体的形成贡献最大, 秸秆次之<sup>[12]</sup>。在红壤地区的研究结果显示, 油菜秸秆还田可以促进大团聚体的形成且效果持久, 猪粪有机肥也能达到相似的效果但是过程不够持久<sup>[13]</sup>。时至今日, 随着研究技术的进步, 对于团聚体的研究提升到了微观领域, 如利用 CT 扫描技术等纳米尺度观测技术分析团聚体微结构及其元素含量<sup>[14]</sup>; 利用电镜扫描技术观察不同还田方式对与团聚体微观结构<sup>[15]</sup> 等。

土壤中养分的积累与水、气、热交换过程的强度和速率很大程度上决定于土壤结构的好坏, 而团聚体结构作为评价土壤结构的关键性指标, 其结构是否良好对于土壤肥力具有意义重大<sup>[16-17]</sup>。对于有机培肥措施下团聚体结构的变化, 研究表明施用有机肥提高了土壤有机质含量, 使胶结物质增加, 进而增加大团聚体数量<sup>[18]</sup>。已有对团聚体结构的研究主要集中在水稳性团聚体与机械稳定性团聚体。郭蓉等<sup>[19]</sup> 研究发现长期施用有机肥增加了 > 2 mm、1 ~ 2 mm、0.5 ~ 1 mm 水稳性团聚体的含量, 但是显著降低了 0.25 ~ 0.5 mm 水稳性团聚体含量。有学者得到相似的结论<sup>[20]</sup>, 大粒径水稳性团聚体的增加, 相应的减少了 < 0.25 mm 水稳性团聚体以及粘沙粒的含量, 提高了土壤的平均重量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD), 提高了土壤团聚体的稳定性。

土壤团聚体中的固体和孔隙的组合提供了许多微小位点, 这些位点相互连接形成的孔隙通道为物质的储存和运输提供便利<sup>[6]</sup>。孔隙结构作为土壤结构最重要的一环, 能够真实的反应土壤结构状况, 其数量、大小、分布和空间构型等因素不仅影响了养分的运输和储存等过程, 也决定了土壤生物运动和“生活”的场所<sup>[21]</sup>。如李文昭等<sup>[22]</sup> 研究了有机培肥措施下红壤团聚体的孔隙结构变化, 发现孔隙数量增多并呈现出明显的复杂多孔结构; 同时有机培肥对比其他施肥措施, 其团聚体比表面积、孔隙度、连通性也是最佳, 既有利于孔隙间的物质运移, 也有利与土壤保水保肥。王伟鹏<sup>[23]</sup>、邱琛<sup>[14]</sup> 等在褐土和黑土的研究中得到了相似的研究结果, 进一步证明了增施有机肥对团聚体结构的形成具有正向影响。

### 2.2 有机培肥对于土壤团聚体稳定性的影响

土壤团聚体作为土壤最基本的结构单元, 是土壤养分储存的场所以及微生物生境。有机培肥能够提高土壤有机碳积累, 并促进土壤团聚体的形成, 提高其稳定性<sup>[24]</sup>。已有研究表明, 在旱作农田土壤长期施用有机肥能够显著增加土壤的机械稳定性团聚体、水稳性团聚体以及有机质含量, 并且能够直接促进 0.5 ~ 1 mm 水稳性团聚体的形成<sup>[25]</sup>。在我国红壤地区研究发现长期施用有机肥能够增加 > 5 mm 机械稳定性团聚体含量 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量与土壤有机质含量极显著正相关关系。研究结果表明, 在单施化肥基础上施加有机肥有利于红壤大团聚体的形成, 且能增加其稳定性<sup>[26]</sup>。刘振东等<sup>[27]</sup> 关于华北褐土的粪肥配施化肥的研究中, 关于团聚体不同组分的变化也得到相似的结果, 粪肥配施化肥能显著提高水稳性团聚体的分布以及其平均重量直径和几何平均直径。关于我国黑土区, 有学者的研究显示长期施用有机肥能够

作为胶结剂增加大团聚体的含量,同时能够提高微生物活性,促进真菌、根系的生长,从而在大团聚体内部形成微粒有机质,增加团聚体的稳定性,并且随着有机肥施用量的增加效果更佳<sup>[28]</sup>。

有机培肥措施能够增加土壤中有机质含量,使团聚体胶结物增多,此外还可以影响土壤微生物的活动。虽然有研究表明过量施用有机肥会导致土壤质量下降,不利于团聚体的形成与稳定<sup>[29]</sup>,但是有机培肥措施想要达到促进土壤团聚体形成与稳定的效果需要累计足够的年限,这一结论有较多试验结果的支持。

### 2.3 有机培肥对土壤团聚体固碳的影响

在团聚体形成过程的研究中,关于土壤的碳固存机制,Six等<sup>[30-31]</sup>提出了保护土壤碳库的三种模式,分别为通过微团聚体实现的物理保护型;粉粒与黏粒结合的化学稳定型;以及形成难降解的土壤有机质的生化稳定型。施肥作为促进土壤团聚体形成的重要手段,有着直接增加土壤有机质含量与间接的改善土壤内部环境等作用,对于土壤团聚体固碳作用的十分重要的意义<sup>[32]</sup>。团聚体是有机碳在土壤中的形成、转化的载体,有机碳反过来作用于团聚体形成的过程中,可以提升团聚体聚合的强度。

适宜的耕作方式对于团聚体固碳也有着积极的作用。有机培肥搭配适宜耕作方式对于华北平原土壤团聚体固碳的影响研究结果显示,免耕秸秆覆盖条件下有利于表层土壤大团聚体的形成,能够显著增加土壤大团聚体有机碳的含量,并且降低有机碳的矿化,增加土壤固碳量<sup>[33]</sup>。其他学者也得到相似的结果,在有机培肥措施下能够提高团聚体内的有机碳含量,并增加其矿化度<sup>[34]</sup>。苗淑杰等<sup>[35]</sup>在东北地区的研究表明:施用有机肥一方面增加土壤有机碳含量,另一方面促进土壤中1~2 mm大团聚体与0.25~0.053 mm微团聚体的形成,而这两个粒级团聚体对于黑土有机碳的保护作用最大。在关于棕壤的研究中,试验证明了大团聚体含量和固碳量与施加有机肥措施存在正向响应<sup>[5]</sup>。在红壤区域的研究中发现,长期施有机肥在提升土壤总有机碳含量的同时,能够显著提高土壤团聚体内的轻组有机碳、粗颗粒有机碳、细颗粒有机碳和矿物结合态有机碳含量<sup>[36]</sup>。

### 2.4 有机培肥对于土壤团聚体养分赋存的影响

通过有机培肥的方式提高土壤中有机质的含量,可以促进有机质与矿质颗粒结合形成聚合物,进而促进土壤团聚体形成,同时还可以将土壤有机碳储存其中,避免其流失和造成气候变化。为了更好的研究团聚体中碳含量的变化,Blair等<sup>[37]</sup>在1995年提出了土壤碳库管理指数(CPMI)这一概念,用于确定自然或人为管理状态土壤碳的状态和变化率。后来有学者根据该方法提出了土壤氮库和磷库管理指数,用于体现土壤中相应养分赋存状态和含量。应用管理指数这一方法,不仅能够直观的反映出外界条件变化对于养分总量的影响,还能够体现出该养分不同组分的质量变化。针对于不同粒级团聚体的养分赋存以及对于土壤肥力贡献,研究结果显示有机培肥的方式可以增加土壤各级团聚体的有机碳、易氧化碳等不同组分碳的含量,从而使碳库管理指数的增加。在有关团聚体氮库与磷库的研究中,施加有机肥在使碳库增加的同时,能够增加氮库总量,促进团聚体中氮含量的增加,使微团聚体中碱解氮含量增加,更利于作物吸收,还能够增加团聚体中全磷、速效磷的含量,提高了磷元素的活化系数<sup>[38]</sup>。

此外还有通过计算各级团聚体养分的贡献率以及活化度的方法来表征团聚体养分赋存状态的研究,如李新悦等<sup>[39]</sup>进行长期秸秆还田试验得出结论,秸秆还田一方面有利于大团聚体的形成,另一方面为大团聚体提供了氮磷钾元素,不仅提高了整体养分含量,而且提高了养分的有效性。在土壤养分保持和供给方面,有长期定位试验结果表明,有机培肥搭配化肥的措施增加了<5 mm的各级团聚体含量,能够明显改善土壤结构,提升土壤肥力。在保持土壤肥力方面,大团聚体能够储存更多的全C、全N、全P,能够实现保肥的效果。在增加速效养分含量方面,有机培肥措施下土壤养分更多的向小粒级团聚体聚集,更加有利于养分的供给<sup>[2]</sup>。同时有研究表明,有机培肥措施不仅能够改善土壤养分状况,还能够提升土壤微生物学特性,证明了有机培肥对于提高土壤养分有效性具有显著效果<sup>[40]</sup>。有学者对不同施肥条件下的团聚体微生物量碳氮变化进行总结:有机培肥措施代替单施化肥能够提高土壤微生物量碳、氮,在一定条件下,有机物输入越多,土壤微生物量越高,但与团聚体筛分方法、农田管理措施、土地类型等因素密切相关<sup>[41]</sup>。团聚体的形成包含着诸多机制,长期施加有机肥可以提高各级团聚体养分的含量及养分有效性,但是有机养分

与有效养分的转化、养分在不同粒级团聚体是如何实现分配和周转以及上述过程对于环境变化的响应等问题<sup>[20]</sup>仍需要进一步探索。

## 2.5 有机培肥下土壤团聚体形成与稳定的微生物驱动机制

在土壤团聚体形成过程中, 微生物对于微团聚体和大团聚体的作用机制不同<sup>[42]</sup>。微团聚体的形成主要依靠细菌分泌胶结物质, 并分解有机物形成有机-无机产物, 与土壤颗粒结合形成团聚体。研究发现在土壤中的碳水化合物主要以微生物分泌的多糖形式存在, 多糖在团聚体形成、稳定过程中发挥着重要的粘连作用, 是该过程中重要的胶结剂<sup>[43]</sup>。微生物分解有机质产生的多糖、多糖醛酸、氨基酸等能够附着在土壤颗粒上增加团聚体的粘附性; 在大团聚体形成过程中, 微团聚体在松结合态有机物和多糖以及微生物分泌物等共同作用下结合形成大团聚体。在以上过程中, 微生物主要从电荷静电引力、分解有机物的代谢产物粘结以及菌丝菌根的缠绕作用三个方面为团聚体形成做出贡献<sup>[44]</sup>。例如多糖、球囊霉素等微生物分泌物在团聚体形成过程中的黏合作用; 微生物代谢过程中伴随着土壤中有有机质的分解、解吸, 使团聚体结构破坏进而促进了团聚体的整体周转过程。有学者将单细胞微生物接种到土壤中发现, 其产生的胞外多聚物能够显著提高大团聚体的含量<sup>[45]</sup>。

在不同粒级团聚体内部, 由于赋存的养分种类与含量不同, 以及环境的差异, 微生物群落也有所不同<sup>[46]</sup>。研究表明, 有机培肥措施能够增加土壤中微生物的多样性和生物丰度, 间接发掘了微生物功能潜力, 提高了土壤功能稳定性<sup>[47]</sup>。如夏围围等<sup>[48]</sup>研究结果显示, 不同硝化微生物在不同粒径团聚体间分异机制有明显差异, 其分布对于土壤环境变化有较大幅度的响应。李巧凤等<sup>[42]</sup>对比不同施肥措施下团聚体内微生物的含量变化发现, 施加有机肥处理下的各级团聚体中细菌、真菌含量显著高于其他处理。该研究还发现, 施加有机肥处理能够使土壤中促进团聚体形成与稳定的外生菌根真菌类群丰度增加, 且增加与固碳等作用相关的微生物数量, 有利于维持健康的土壤结构。目前对于有机培肥措施下微生物对于团聚体形成与稳定的研究尚少, 在未来的研究中应该注重对真菌功能的探究, 以此揭示该视角下团聚体形成的相关机制。

## 3 总结与展望

综上所述, 有机培肥这一施肥措施相比于传统单施无机肥有着诸多优势, 首先有机培肥可以直接增加土壤中有机质含量, 改善土壤理化性质, 提高整体养分水平; 其次能够促进土壤团聚体的形成与稳定, 加快土壤团聚体的整体周转过程; 最后该措施还能够丰富土壤微生物的种类和丰度, 并且在前面两点的基础上提高团聚体中不同养分的总量, 增加有效性养分的比例, 有利于提升地力和提高作物产量。但是关于有机培肥与土壤团聚体各方面相互关联的具体机制尚未清晰, 根据现有研究结果及研究趋势, 做出以下几点展望。

(1) 由于我国不同区域的土地利用方式、耕作方式以及施肥等方面的差异, 需要就探究合理的施肥与耕作等条件的搭配方式结合先进的观测技术, 对各级团聚体形成与稳定进行深入研究。

(2) 有机培肥措施在促进团聚体形成与稳定过程中, 相关胶结物质的具体作用机制尚未完全清晰, 可以从物质分析提取方法以及微观视角的观察分析方法等实验方法进行改进, 更加深入的了解各级团聚体之间的层级信息以及相关机制。

(3) 在团聚体养分赋存方面, 不同粒级团聚体对于不同养分储存的总量和响应程度不同, 应继续针对不同养分总量和活化程度与团聚体粒径分布趋势差异性进行研究, 以达到为当地作物提供更好的养分供应效果。

(4) 针对有机质含量、团聚体结构、微生物三者之间相互作用机制, 在团聚体中不同的微生物群落作用的差异, 以及区分微生物对于不同来源有机质的作用差别等方面, 若能够清晰相关内容, 将会对于未来土壤管理与肥力调控提供重要依据。

## 参考文献 (References):

- [1] 张彧行, 翁白莎, 严登华. 基于文献可视化分析的土壤团聚体研究进展[J]. 地球科学进展, 2022, 37 (4): 429–438.  
ZHANG Y H, WENG B S, YAN D H. Research progress of soil aggregates based on literature visualization analysis[J]. *Advances in Earth Science*, 2022, 37 (4): 429–438.
- [2] 刘中良, 宇万太. 土壤团聚体中有机碳研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19 (2): 447–455.  
LIU Z L, YU W T. Review of researches on soil aggregate and soil organic carbon[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19 (2): 447–455.
- [3] OADES J M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management[J]. *Plant and Soil*, 1984, 76 (1/2/3): 319–337.
- [4] WATERS A G, OADES J M. Organic matter in water-stable aggregates [M]//*Advances in Soil Organic Matter Research*. Amsterdam: Elsevier, 2003: 163–174.
- [5] 邢旭明. 长期施肥对土壤团聚体组成及其主要养分赋存特征的影响 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2015.  
XING X M. Effects of long-term fertilization on soil aggregate composition and main nutrients distribution [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2015.
- [6] 刘亚龙, 王萍, 汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2023, 60 (3): 627–643.  
LIU Y L, WANG P, WANG J K. Formation and stability mechanism of soil aggregates: progress and prospect[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60 (3): 627–643.
- [7] 陈阳. 我国南北三种典型土壤间有机质化学特征的粒级分异及对长期有机培肥的响应 [D]. 天津: 天津师范大学, 2022.  
CHEN Y. Particle size fractionation of chemical characteristics of organic matter among three typical soils in the north and south of China and its response to long-term organic fertilization [D]. Tianjin: Tianjin Normal University, 2022.
- [8] EDWARDS A P, BREMNER J M. Microaggregates in soils I [J]. *Journal of Soil Science*, 1967, 18 (1): 64–73.
- [9] CHENG H H, BREMNER J M, EDWARDS A P. Variations of nitrogen-15 abundance in soils [J]. *Science*, 1964, 146 (3651): 1574–1575.
- [10] EDWARDS A P, BREMNER J M. Dispersion of mineral colloids in soils using cation exchange resins [J]. *Nature*, 1965, 205 (4967): 208–209.
- [11] SIX J, BOSSUYT H, DEGRYZE S, et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79 (1): 7–31.
- [12] 梁志英. 培肥措施对黄土高原旱地土壤团聚化作用和有机碳固持的影响及机制 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.  
LIANG Z Y. Effects of different organic amendments on soil aggregation and soil organic carbon sequestration and its mechanism in dryland farming areas of loess plateau [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2022.
- [13] 温云杰. 有机培肥过程中有机碳对红壤旱地团聚体形成的影响及其分子机制 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.  
WEN Y J. Study of organic carbon on red soil aggregate formation and its molecular mechanism during the organic fertilization [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021.
- [14] 邱琛. 玉米秸秆还田对黑土团聚体稳定性和结构的影响 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.  
QIU C. Effect of maize straw returning on the stability and structure of black soil aggregates [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [15] 张曼玉, 杨海昌, 张凤华, 等. 秸秆还田方式对盐碱土壤微观结构和理化性质的影响[J]. 节水灌溉, 2022 (5): 65–70.  
ZHANG M Y, YANG H C, ZHANG F H, et al. Effects of different straw returning methods on changes of soil structure in saline-alkali soil [J]. *Water Saving Irrigation*, 2022 (5): 65–70.
- [16] BARBOSA L A P, MUNKHOLM L J, OBOUR P B, et al. Impact of compaction and post-compaction vegetation management on aggregate properties, Weibull modulus, and interactions with intra-aggregate pore structure [J]. *Geoderma*, 2020, 374: 114430.
- [17] DUIKER S W, RHOTON F E, TORRENT J, et al. Iron (hydr)oxide crystallinity effects on soil aggregation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67 (2): 606–611.
- [18] WANG P, WANG J D, ZHANG H, et al. The role of iron oxides in the preservation of soil organic matter under long-term fertilization [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19 (2): 588–598.
- [19] 郭蓉. 施用有机肥和产胞外多聚物菌株在改善土壤团聚体结构及生物活性中的作用 [D]. 南京: 南京农业大学, 2015.  
GUO R. Improvement of soil aggregates and biological activity by fertilization and inoculation of extracellular polymeric substances producing microbes [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.
- [20] XIAO Y, ZHOU M, LI Y S, et al. Crop residue return rather than organic manure increases soil aggregate stability under corn–soybean rotation in surface mollisols [J]. *Agriculture*, 2022, 12 (2): 265.

- [21] ALVAREZ M F, OSTERRIETH M, COOPER M. Changes in the porosity induced by tillage in typical Argiudolls of southeastern Buenos Aires Province, Argentina, and its relationship with the living space of the mesofauna: a preliminary study[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77 (4): 1-12.
- [22] 李文昭, 周虎, 陈效民, 等. 基于同步辐射显微CT研究不同施肥措施下水稻土团聚体微结构特征[J]. *土壤学报*, 2014, 51 (1): 67-74.
- LI W Z, ZHOU H, CHEN X M, et al. Characterization of aggregate microstructures of paddy soils under different patterns of fertilization with synchrotron radiation micro-ct[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (1): 67-74.
- [23] 王伟鹏, 张华. 长期施肥对华北农田褐土团聚体微结构与稳定性的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38 (10): 68-74.
- WANG W P, ZHANG H. Effects of long-term fertilization on the microstructure and stability of cinnamon soil aggregates in cropland of North China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38 (10): 68-74.
- [24] 宋金红, 吴景贵. 不同有机培肥对黑土团聚体含量及特征的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 44 (3): 103-108.
- SONG J, WU J. Effects of different organic fertilizers on content and characteristics of black soil aggregates[J]. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2016, 44 (3): 103-108.
- [25] 崔荣美, 李儒, 韩清芳, 等. 不同有机肥培肥对旱作农田土壤团聚体的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 39 (11): 124-132.
- CUI R M, LI R, HAN Q F, et al. Effects of different organic manure with fertilization on soil aggregates in dry farmland[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2011, 39 (11): 124-132.
- [26] MUSTAFA A, XU H, ALI SHAH S A, et al. Long-term fertilization alters chemical composition and stability of aggregate-associated organic carbon in a Chinese red soil: evidence from aggregate fractionation, C mineralization, and <sup>13</sup>C NMR analyses[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21 (7): 2483-2496.
- [27] 刘振东. 粪肥配施化肥对华北褐土团聚体稳定性及养分含量的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
- LIU Z D. The effect of manure and chemical fertilizer on distribution of soil aggregates and nutrient contents [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.
- [28] 梁尧. 有机培肥对黑土有机质消长及其组分与结构的影响[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
- LIANG Y. Effect of organic amendments application on dynamics, fractions and structural properties of soil organic matter in black soil [D]. Harbin: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [29] 冷延慧. 长期施肥对棕壤、黑土团聚体组成及其稳定性的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2008.
- LENG Y H. Effect of long-term fertilization on composition and stability of aggregates in brown earth and black soil [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2008.
- [30] STEWART C E, PAUSTIAN K, CONANT R T, et al. Soil carbon saturation: implications for measurable carbon pool dynamics in long-term incubations[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41 (2): 357-366.
- [31] SIX J, CONANT R T, PAUL E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*, 2002, 241 (2): 155-176.
- [32] TONG L H, ZHU L, LV Y Z, et al. Response of organic carbon fractions and microbial community composition of soil aggregates to long-term fertilizations in an intensive greenhouse system[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20 (2): 641-652.
- [33] KAN Z R, MA S T, LIU Q Y, et al. Carbon sequestration and mineralization in soil aggregates under long-term conservation tillage in the North China Plain[J]. *CATENA*, 2020, 188: 104428.
- [34] MUSTAFA A, XU M G, ALI SHAH S A, et al. Soil aggregation and soil aggregate stability regulate organic carbon and nitrogen storage in a red soil of Southern China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 270: 110894.
- [35] 苗淑杰, 周连仁, 乔云发, 等. 长期施肥对黑土有机碳矿化和团聚体碳分布的影响[J]. *土壤学报*, 2009, 46 (6): 1068-1075.
- MIAO S J, ZHOU L R, QIAO Y F, et al. Organic carbon mineralization and carbon contribution in aggregates as affected by long-term fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46 (6): 1068-1075.
- [36] 徐江兵, 李成亮, 何园球, 等. 不同施肥处理对旱地红壤团聚体中有机碳含量及其组分的影响[J]. *土壤学报*, 2007, 44 (4): 675-682.
- XU J B, LI C L, HE Y Q, et al. Effect of fertilization on organic carbon content and fractionation of aggregates in upland red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44 (4): 675-682.
- [37] 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.
- [38] 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.
- ZHANG X Z, LI Q, GAO H J, et al. Effects of long-term fertilization on the stability of black soil water stable aggregates and the distribu-

- tion of organic carbon[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53 (6): 1214–1223.
- [39] 李新悦, 李冰, 莫太相, 等. 长期秸秆还田对水稻土团聚体及氮磷钾分配的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32 (9): 3257–3266.  
LI X Y, LI B, MO T X, et al. Effects of long-term straw returning on distribution of aggregates and nitrogen, phosphorus, and potassium in paddy[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32 (9): 3257–3266.
- [40] YE G P, BANERJEE S, HE J Z, et al. Manure application increases microbiome complexity in soil aggregate fractions: results of an 18-year field experiment[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 307: 107249.
- [41] 荣勤雷, 李若楠, 黄绍文, 等. 不同施肥模式下设施菜田土壤团聚体养分和微生物量特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25 (7): 1084–1096.  
RONG Q L, LI R N, HUANG S W, et al. Characteristics of nutrients and microbial biomass in soil aggregates under different fertilization modes in greenhouse vegetable production[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25 (7): 1084–1096.
- [42] 李凤巧. 作物及施肥对土壤团聚体和微生物种群的影响及团聚体形成的微生物学机制研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2018.  
LI F Q. Effects of crops and fertilization on soil aggregate size distribution and microbial communities and microbiological mechanisms in soil aggregate formation[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2018.
- [43] MARTIN S L, MOONEY S J, DICKINSON M J, et al. The effects of simultaneous root colonisation by three *Glomus* species on soil pore characteristics[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 49: 167–173.
- [44] 刘红梅, 李睿颖, 高晶晶, 等. 保护性耕作对土壤团聚体及微生物学特性的影响研究进展[J]. *生态环境学报*, 2020, 29 (6): 1277–1284.  
LIU H M, LI R Y, GAO J J, et al. Research progress on the effects of conservation tillage on soil aggregates and microbiological characteristics[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29 (6): 1277–1284.
- [45] 王小姣, 李梦雅, 王文丽, 等. 接种单细胞微生物对土壤团聚体形成及其稳定性的影响[J]. *土壤通报*, 2021, 52 (2): 355–360.  
WANG X J, LI M Y, WANG W L, et al. Effect of single cell and filamentous microorganisms on formation of soil aggregates[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52 (2): 355–360.
- [46] HAN S, DELGADO-BAQUERIZO M, LUO X S, et al. Soil aggregate size-dependent relationships between microbial functional diversity and multifunctionality[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 154: 108143.
- [47] MIRANSARI M. Soil microbes and plant fertilization[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, 92 (5): 875–885.
- [48] 夏围围, 李乙坤, 张萌, 等. 硝化微生物在土壤团聚体中的分布及其对种植方式的响应[J/OL]. *土壤学报*, 2022. doi: 10.11766/trxb202203220126. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20220922.1808.006.html>.  
XIA W W, LI Y K, ZHANG M, et al. Distribution patterns of nitrifiers within soil aggregates under different cropping systems[J/OL]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022. doi: 10.11766/trxb202203220126. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20220922.1808.006.html>.