

张家春, 刘盈盈, 贺红早, 等. 土壤团聚体与有机碳固定关系研究进展 [J]. 福建农业学报, 2016, 31 (3): 319-325.  
ZHANG J-C, LIU Y-Y, HE H-Z, et al. Research Advances on Mechanism of Organic Carbon Sequestration in Soil Aggregates [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 31 (3): 319-325.

## 土壤团聚体与有机碳固定关系研究进展

张家春<sup>1</sup>, 刘盈盈<sup>2</sup>, 贺红早<sup>2</sup>, 任璐<sup>1</sup>, 张珍明<sup>2\*</sup>

(1. 贵州省植物园, 贵州 贵阳 550004; 2. 贵州省生物研究所, 贵州 贵阳 550002)

**摘要:** 土壤固碳是目前认可的固碳措施之一, 对稳定土壤生产力和应对全球气候变化具有积极效应。土壤团聚体是土壤的重要组成部分, 也是一种特殊的有机-无机复合体, 影响着土壤的各种物理和化学性质, 因此土壤团聚体和有机碳是不可分割的, 目前土壤团聚体中有机碳方面已经积累了大量的研究, 随着现代研究方法的发展, 已经深入到不同方式下的固碳机理研究。本研究通过大量阅读文献和查阅资料, 在综合各方面研究的基础上, 探讨了团聚体中有机碳的分离方法、团聚体与有机碳的关系、团聚体有机碳固定的途径和方法, 并进行了相关展望, 以期对团聚体中有机碳的研究提供理论和方法上的支持, 促进农业和固碳减排技术可持续发展。

**关键词:** 土壤团聚体; 有机碳; 碳固定; 关系

中图分类号: S153. 6

文献标识码: A

文章编号: 1008-0384 (2016) 03-319-07

### Research Advances on Mechanism of Organic Carbon Sequestration in Soil Aggregates

ZHANG Jia-chun<sup>1</sup>, Liu ying-ying<sup>2</sup>, He Hong-zao<sup>2</sup>, REN Lu<sup>1</sup>, ZHANG Zhen-ming<sup>2\*</sup>

(1. *Guizhou Botanical Garden, Guiyang, Guizhou 550000, China*; 2. *Guizhou Institute of Biology, Guiyang, Guizhou 550009, China*)

**Abstract:** Carbon sequestration in soil is one of the path that nature sequesters carbon. It is crucial in maintaining the productivity of soil as well as in stabilizing the global climate. Soil aggregates constitute an important part of the soil. It is an organo-mineral complex that affects a wide variety of physical and chemical properties of the soil. Therefore, soil aggregates and organic carbon are closely related. Abundant data and information on the related subject have been accumulated in recent years. With the advanced methodologies, studies are aimed to understand the underlining mechanism of the carbon sequestration. This article reviews the available methods to retrieve organic carbon from soil aggregates, the relationship between soil aggregates and organic carbon, and the sequestration of organic carbon in aggregates. Prospect of future development on the research are discussed with an anticipation of an increased interest in this field of study in the near future.

**Key words:** soil aggregates; organic carbon; carbon sequestration; relationship

土壤团聚体是土壤结构的基本单元, 其大小、形状、空隙分布及组成等, 既影响着土壤的持水性、通透性和抗蚀性等物理性质<sup>[1]</sup>, 又影响着土壤的水分和养分供给、氧气热量传递等功能作用。因此, 土壤团聚体是衡量土壤结构的重要指标, 也是土壤肥力的调节中心。土壤团聚体是土壤的重要

组成部分, 长久以来被作为土壤结构稳定的替代指标。土壤团聚体在土壤中具有“三大作用”, 即保证和协调土壤中的水肥气热、影响土壤酶的种类和活性、维持和稳定土壤, 疏松熟化层表土中近90%的土壤有机碳位于团聚体内<sup>[2-3]</sup>。土壤团聚体的物理保护导致的生物与有机碳的空间隔离是土壤

收稿日期: 2015-11-02 初稿; 2016-01-15 修改稿

作者简介: 张家春(1988-), 男, 助理研究员, 主要从事土壤学与环境科学方面研究(E-mail: zhangjiachun198806@163.com)

\* 通讯作者: 张珍明(1986-), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事土壤化学与生态学方面研究(E-mail: zhang6653579@163.com)

基金项目: 贵州省省院合作项目(黔科合院地合[2013]7002); 贵州省社发攻关项目(黔科合SY[2013]3152号); 贵州科学院创新基金项目(黔科院J合字[2013]04号); 贵州省科技厅社发攻关资助项目(黔科合SY字[2013]3157号); 贵州省科技厅国际省校区域合作协议项目(黔科合省院合[2014]7002号); 贵州省基金项目(黔科合SY字[2012]2244)

有机碳主要的稳定机制之一<sup>[4-6]</sup>。农业生产活动主要发生在土壤表层,因此表层土壤团聚体内有机碳的研究对揭示人为干扰对有机碳的影响具有重要意义。

土壤有机碳含量约占陆地生物圈碳库的 2/3,而每年进入土壤储存的和以 CO<sub>2</sub>形式释放的碳量约占土壤有机碳总量的 4%,因而土壤中的有机碳既是碳汇又是碳源<sup>[7]</sup>。由于全球长期和大面积的农垦,使土壤碳库和大气碳之间的碳循环平衡遭到破坏,大量土壤有机碳被氧化并以 CO<sub>2</sub>等的形式释放到大气中<sup>[8]</sup>,增加了温室气体的排放。增加土壤有机碳的固定是一个有效的、具有中长期利益的减少温室气体排放措施。土壤有机碳的稳定性主要受有机碳的难降解性、土壤理化性质和环境条件及土壤分解者生物群落的影响。全面了解土壤有机碳的稳定机制对于估计土壤有机碳的固定潜力,制定相应的土壤管理措施,以提高有机碳固定,充分发挥土壤有机碳的生态功能等具有非常重要的意义。

## 1 团聚体中有机碳研究方法

### 1.1 土壤团聚体分离方法

土壤团聚体分为机械稳定性团聚体和水稳性团聚体,机械稳定性团聚体采用干筛法测定,水稳性团聚体采用湿筛法。但干筛法得到的结果重复性差,湿筛法的结果相对稳定,目前对土壤团聚体的分离更多采用湿筛法。Six 等<sup>[9-10]</sup>研究中,按团聚体的大小将土壤分为 4 个粒级: >2000 μm、2000~250 μm、250~53 μm 和 <53 μm。土壤结构的稳定性更多取决于土壤中水稳性团聚体的含量,土壤水稳性团聚体是指能够抗水力分散的土壤团聚体。水稳性团聚体测定过程中,土壤的预处理、土壤含水量以及含沙量等是影响测定结果稳定性的主要因素<sup>[11]</sup>。目前采用的方法是将土壤样品过 8 mm 或 10 mm 筛后进行风干,之后进行含沙量的测定,以期减少以上因素的干扰。采用湿筛法前应先用水浸泡 5 min,以驱除团聚体内的闭塞空气,防止团聚体气爆。因此,在实践中一定要根据研究目的选取合适的筛分方法进行团聚体分离。

### 1.2 团聚体中有机碳分离方法

目前,研究土壤有机碳组分常用的方法为相对密度分组法。土壤是由不同相对密度的有机物和无机物所组成。研究表明<sup>[12]</sup>,游离有机物的相对密度一般低于 1.8,而土壤中常见矿物的相对密度大多大于 2.5。因此,土壤有机无机复合体的相对密度通常低于土壤无机成分的相对密度,而高于土壤

游离有机物的相对密度。为此,可选用一定相对密度的液体,将游离的有机物、有机无机复合体和游离的矿物分开。通常采用相对密度 1.8 或 2.0 的重液将土壤区分为轻组和重组。相对密度分组法中,相对密度液可以是有机溶液,也可以是无机溶液,常用的有机溶液是四溴乙炔、溴仿和四氯甲烷,有机溶剂通常加一定量的乙醇来调节所需的相对密度值。用作相对密度分组的无机盐包括溴化锌、碘化锌、碘化汞、多钨酸钠等。选择相对密度液时,应该考虑到相对密度液的毒性、价格等因素。目前,通用的是溴化锌和溴仿-乙醇混合液。

## 2 有机碳固定与土壤团聚体关系

土壤团聚过程是土壤固碳最重要的途径之一<sup>[13]</sup>。随着温室效应的加剧,团聚体与有机碳固定的研究越来越受到重视,但目前对有机碳固定与土壤团聚体的关系研究主要集中在:有机碳与土壤团聚体的关系和团聚体固碳潜力方面的研究。

### 2.1 土壤团聚体与有机碳的固定潜力的研究

土壤团聚体是土壤结构组成的基本单位,是由土壤颗粒胶结形成的粒状或小团块状结构体。它的质量和数量不仅与土壤肥力有关,而且与土壤的抗蚀能力、承载力和固碳容量等有直接关系。团聚体对有机碳具有保护作用,表土中约 90% 有机碳位于团聚体内<sup>[14]</sup>。土壤的固碳功能伴随着土壤团聚体的形成、稳定及更新周转过程的始终<sup>[15]</sup>。因此,明确团聚体的形成和周转模式是理解和研究土壤有机碳动态的基础,可以帮助理解土壤有机碳在团聚体中的固定机理<sup>[16]</sup>,但迄今为止,不同土壤中的团聚体形成与周转模式尚无统一标准的模型,因为这一机制与土壤类型、土壤管理措施、土层深度及有机碳难降解性等有关。现有模型难以解释热带和亚热带地区的氧化土(富含铁铝氧化物)内有机碳的稳定性与团聚体物理保护过程的关系<sup>[17]</sup>。

目前,关于土壤团聚体形成与固定土壤有机碳的理论与概念模型主要有 2 种。Tisdall 和 Oades<sup>[18]</sup>提出概念模型,认为原始颗粒和微团聚体在胶结物质缠绕下依次形成较大的微团聚体,最后胶结形成大团聚体。Oades<sup>[19]</sup>对这个模型做了修改,认为大团聚体首先形成,微团聚体再形成于其内部,或有机质分解,大团聚体破碎后直接形成微团聚体。2 种模型的共同之处都体现土壤颗粒的团聚是有机无机复合体,是团聚体形成的基本单位,是生命和非生命物质共同反应的产物。大团聚体是在松结合态有机物质与多糖的参与下形成的,微团

聚体则主要受紧结合态有机物质和粘粒的影响<sup>[20]</sup>。Colchin等<sup>[21]</sup>的研究表明,新鲜不稳定的大团聚体破碎形成的微团聚体中含有颗粒态有机质,这部分团聚体中的颗粒态有机质因受微团聚体的物理保护而减少了矿化分解,较游离的颗粒态有机质稳定。Six等<sup>[22]</sup>的经典模型理论,认为大团聚体是在新鲜植物残体和细颗粒态有机质的作用下形成,然后在这些细颗粒态有机质周围形成微团聚体,进而对其产生进一步的物理保护,这些微团聚体在耕作扰动等作用下从大团聚体中释放。上述2种团聚体的周转方式与土壤团聚体的固碳潜力和机制有直接关系,对于阐明土壤有机碳库固定机制具有十分重要的科学意义。

## 2.2 有机碳与土壤团聚体形成关系

团聚体形成和稳定过程的研究自20世纪初就受到关注,并且涌现出很多强调有机碳作用的团聚体形成模型。1982年Tisdall和Oades<sup>[23]</sup>提出团聚体的等级发育模型。空间和时间是该模型的2个重要尺度,在空间尺度上,土壤团聚体由微团聚体向大团聚体逐级连续层次性形成,而在时间尺度上,胶结物质从多糖(暂时稳定)向菌丝根系(短时间稳定)及芳香类物质(持久稳定)层次性变化。根据该模型,微团聚体比大团聚体稳定,微团聚体的形成是大团聚体形成的前提条件,而各类有机碳是最重要的胶结物质。Elliott<sup>[24-25]</sup>在美国北部草地土壤验证了团聚体层次模型理论,认为大团聚体比微团聚体包含更多易变的有机质。

1984年Oades<sup>[26-27]</sup>对该模型作了重要改进,认为根系和菌丝可以直接促进大团聚体的形成,微团聚体可以在大团聚体内形成。该模型指出:大团聚体中心形成微团聚体。土壤中的有机碎屑、真菌菌丝体和粪便类物质,通过蚯蚓和其他土壤动物吞食和排泄活动结合在一起形成大团聚体。在大团聚体内部POM分解过程中,有机碎片与微生物黏液及黏土颗粒包裹在一起,使有机质越来越被封闭,免遭微生物攻击。这种方式形成的微团聚体在受各种化学和代谢胁迫时,从大团聚体中释放出来,形成相对稳定的土壤有机质(SOM)。目前大多数模型都是在Oades模型基础上发展起来的,Golchin等<sup>[28]</sup>提出大团聚体( $>250\ \mu\text{m}$ )分解成中等大小微团聚体( $<250\ \mu\text{m}$ ),再分解成闭蓄在细POM中的小的微团聚体( $<20\ \mu\text{m}$ ),强化了POM在团聚中的作用。Angers等<sup>[29]</sup>的研究结果验证了微团聚体是在大团聚体中形成的理论。他们在<sup>13</sup>C、<sup>15</sup>N小麦秸秆的田间培养试验中观察到,在分解初

期,<sup>13</sup>C首先在大团聚体中累积,但随后在大团聚体中逐渐下降,而在微团聚体中增加,<sup>13</sup>C随着时间变化从大团聚体向微团聚体转移的现象,说明微团聚体先在大团聚体中形成,然后从大团聚体中分解出来。

近年来Six等<sup>[30]</sup>发展了以“大团聚体周转”为核心的概念模型,即新鲜有机物促进大团聚体形成,而大团聚体内的颗粒有机物有助于微团聚体的形成,伴随颗粒有机物的分解及其他干扰过程,大团聚体破碎后将微团聚体释放出来。此后,Six等进一步描述和完善了大团聚体周转及SOM动态变化的胚胎发育模型。当又有新鲜残茬加入时,这些组分可以再结合成大团聚体,参与到下一轮大团聚体循环中。另外,耕作等干扰作用可以加快土壤大团聚体的更新,使大团聚体内微团聚体的形成数量大大减少。

## 3 土壤团聚体中有机碳固定的影响因素

目前对于土壤团聚体固碳因素的研究很多,主要集中在耕作条件、施肥制度以及种植方式等方面,其对固碳的影响也最为明显。

### 3.1 耕作条件对团聚体中有机碳固定的影响

耕作活动为土壤有机碳的分解转化创造了有利条件,由于耕作使新土不断暴露在土壤表面,经历干-湿和冻-融循环,增加了团聚体分布的敏感性;同时犁耕改变了土壤状况(温度、水分、侵蚀),加速凋落物的分解速率;最后犁耕和残茬影响微生物群落<sup>[31]</sup>。耕作强度增加可促进土壤有机碳周转,减少土壤团聚作用发生<sup>[32]</sup>。常规耕作表层土壤易受各种温度和水分条件影响,限制某些生物活性,不仅使土壤团聚体经常受到干扰,而且释放了受团聚体保护的免遭矿化的SOM<sup>[33]</sup>,减少了团聚体稳定胶结剂(如碳水化合物)的产生<sup>[34]</sup>。

免耕可促进土壤表层的真菌生长、根系延伸和土壤动物活动等,有助于在大团聚体内部结合形成POM,增加其结构稳定性,真菌菌丝体的扩展也有益于大团聚体的形成。Six等<sup>[35]</sup>在研究耕作条件对团聚体和有机碳的影响时发现,耕作对团聚体的影响主要发生在表层,免耕土壤的大团聚体含量、总碳、新有机碳含量均高于常规耕作土壤。耕作加快了大团聚体的更新速度,不利于大团聚体内微团聚体的形成,不利于土壤有机碳的固定。故Six等<sup>[35]</sup>提出适当减少耕作强度或者免耕有助于改善土壤结构,提高土壤有机碳含量。李景等<sup>[36]</sup>通过研究长期保护性耕作对土壤团聚体性质及土壤有机

碳含量的影响,表明长期保护性耕作可显著提高表层土壤大团聚体含量,降低微团聚体含量,提高团聚体的水稳性,改善土壤结构,同时可增加土壤团聚体有机碳含量,提高土壤肥力。

土壤有机碳的水平通常与稳定性团聚体的数量相联系。水稳性团聚体的形成,必须依赖于土壤中的有机质。Oren 等<sup>[37]</sup>提出,在大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下,土壤肥力是限制美国温带森林生态系统碳固定的主要因素。因此,我国传统农业生产提倡使用农肥,种植绿肥,千方百计增加土壤的有机质,其作用之一就是增加土壤水稳性团聚体的数量<sup>[38]</sup>。黄不凡<sup>[39]</sup>在绿肥、麦秸还田培养地力的研究中发现, >0.25 mm 水稳性团聚体在培肥土壤中所占比例的顺序为:绿肥、麦秸各半区>麦秸区>绿肥区>土杂肥区>对照区。事实证明,施用有机物料培肥土壤时,可提高重组有机质的含量,改善重组有机质中腐殖质的结合形态<sup>[40]</sup>。李映强等<sup>[41-42]</sup>在研究不同耕作制度下水稻土有机质变化及团聚作用时也发现,施用猪粪能明显提高土壤有机碳和松、稳结合态腐殖质含量。Fonte 等<sup>[43]</sup>研究了不同品质植物残体和氮肥对土壤团聚体的影响,指出随着碳的输入,稳定的大团聚体明显增加,土壤全碳、全氮量提高,但不同品质植物残体对土壤团聚体分布和有机碳分布的影响无显著差异,且氮肥和不同品质残体搭配对团聚体和有机碳分布的影响也不显著。

### 3.2 种植方式对团聚体中有机碳固定的影响

种植方式对团聚体性质的影响是多方面的,但随着时间的延长而减弱。短期玉米轮作对有机质及团聚体形成有良好的作用<sup>[44]</sup>,而在以有机质为主要胶结剂的土壤中,50 年的玉米轮作降低了大团聚体的稳定性和根系与菌丝的长度及土壤有机质含量。豆科禾本科轮作能快速增加土壤有机碳的储存,促进大团聚体的形成和微团聚体的稳定<sup>[45]</sup>。单一种植豆科作物时,<0.5 mm 团聚体的微生物量高于种植禾本科作物时相应团聚体中的含量<sup>[46]</sup>。王义祥等<sup>[47]</sup>采用时空替代法比较研究不同经营年限对柑橘果园土壤团聚体结构及有机碳分配的影响,结果表明随着经营年限的增加,柑橘园土壤团聚体的稳定性有所降低。张先凤等<sup>[48]</sup>研究黄淮海平原潮土区耕作管理对土壤水稳性团聚体形成及有机碳累积的长期效应,结果表明与常规翻耕处理相比,长期免耕和间歇性翻耕使 0~10 cm 土层粗大团聚体和 10~20 cm 土层细大团聚体的质量比例分别提高了 63.4% 和 28.1%。Chan<sup>[49]</sup>研究在不同作物和牧草种植条件下 5 种变性土中的颗粒态有机碳

(>53 μm) 随碳和氮状态变化和团聚体稳定性的关系时发现,颗粒态有机碳矿化是作物种植条件下有机碳优先损失的一种形式,当种植牧草 4 年后,颗粒态有机碳明显恢复。颗粒态有机碳与 >250 μm 粒级水稳性团聚体的相关程度显著高于 <50 μm 组分,说明颗粒态有机碳在维持这些土壤大团聚体稳定性中具有重要作用,并提出颗粒态有机碳有潜力成为土壤管理措施对土壤有机碳影响的一种敏感性指示物。

## 4 团聚体中有机碳的保护机制研究现状

### 4.1 土壤有机碳的物理固定机制

土壤团聚体分为大团聚体和微团聚体,微团聚体形成过程中对有机碳的包裹作为一种物理保护作用被提出,并越来越受到研究者的广泛关注<sup>[50-51]</sup>。团聚体形成作用是土壤碳固定的最重要的机制,特别是对碳库的物理保护。土壤有机碳固定中团聚体保护机制可能说明有机碳的固定效应<sup>[52]</sup>。Elliott and Coleman<sup>[53]</sup>提出,源于根的有机碎屑、真菌菌丝体等的颗粒有机质碎片可在大团聚体内部通过蛆成虫和其他土壤动物吞食和排泄活动而结合在一起,在团聚体内部的颗粒有机质碎片与微生物粘液及勃土颗粒包裹在一起,使得有机质越来越被封闭,从而免遭微生物的分解,这种方式形成的团聚体富含相对稳定的土壤有机质,在受各种化学和代谢胁迫时,可以从大团聚体中释放出来。

### 4.2 土壤有机碳的化学固定机制

Clough and Skjemstad<sup>[54]</sup>对于草地土壤的研究表明,团聚体物理保护下的有机碳通过钙-金属桥键结合为稳定的有机-矿质复合体,即使施用 N 肥下土壤微生物活性提高也不能被有效分解。Osher et al.<sup>[55]</sup>在研究夏威夷火山由森林改为草地和甘蔗田后有机质的变化中,通过统计分析认识到土壤中铁铝氧化物含量是控制土壤中尚存的有机碳水平的因素。Spaccini et al.<sup>[56]</sup>在对热带非洲森林和由森林开垦为农田的土壤团聚体颗粒组中的总有机碳和碳水化合物含量的变化研究中,发现耕作引起的总有机碳损失在砂土中明显高于黏土(酸性、富含氧化铁铝)中,并归结于耕作引起团聚体破坏,归根于富有机碳和碳水化合物的颗粒遭受侵蚀流失所致。潘根兴曾经提出,稻田土壤中的有机碳不符合勃粒保护理论,而氧化铁可能在有机碳保护与稳定中有重要的作用,而对南方 3 种典型稻田土壤中团聚体有机碳的结合状态进行的提取分析表明,不同类型稻田土壤中钙键合态和铁铝键合态有机碳的分

布不同，稻田土壤有机碳主要以铁铝键合态的形式而得以在土壤中稳定积累，铁铝氧化物对稻田土壤有机碳的固定和化学稳定有重要的贡献<sup>[57]</sup>。

#### 4.3 土壤有机碳的生物固定机制

土壤稳定性有机碳中很大的比例直接来源于微生物和土壤无脊椎动物，有研究表明微生物的再合成在稳定有机碳形成中有重要作用<sup>[58]</sup>。微生物产物如胞壁质、几丁质、脂类，主要来源于真菌的黑色素类物质及土壤动物的几丁质表皮等，都属于难降解有机碳化合物<sup>[59]</sup>。不同土壤生物群落对土壤稳定性有机碳的贡献不同，如细菌和真菌能够分解、利用及合成结构不同的有机碳<sup>[59]</sup>。除了某些土壤微生物和动物直接分泌粘多糖外，大多数土壤生物都具有很短的周转期，生物量通常被认为是活性有机碳组分。同时，土壤微生物分泌的胞外酶在稳定性有机碳向活性有机碳的转化中有重要作用<sup>[60]</sup>。土壤动物可以通过多种直接和间接途径影响有机碳的难降解性<sup>[61]</sup>。如土壤动物能够影响真菌和细菌的生长、活性及相对组成<sup>[62]</sup>，大型土壤动物的破碎作用使有机物表面积增加，通过肠道内酶的作用提高分解速率；而影响土壤结构和有机物分布的生物扰动作用也对土壤有机碳稳定性产生深远的影响。

大量的研究表明了土壤生物分泌的粘多糖及真菌菌丝促进了土壤内不同大小团聚体结构的形成<sup>[63]</sup>。而大型土壤动物如蚯蚓在大团聚体形成方面的作用也在不同的土壤类型和蚯蚓种类上得到验证。土壤大团聚体的形成阻止了空气和水的扩散，从而阻止了团聚体内有机碳的分解<sup>[64]</sup>；而团聚体孔隙对微型土壤动物捕食活动的抑制作用及对微生物群落的影响后果已经得到初步验证<sup>[65]</sup>。由于微团聚体内孔隙更小(如很多孔隙小于细菌可进入的0.2 mm 界限)，所以对有机碳稳定性的贡献更大。最近来自大型土壤动物的实验表明，蚯蚓能够促进大团聚体内微团聚体的形成<sup>[66]</sup>。土壤动物的迁移(生物扰动)行为对团聚体结构的影响因动物类群而异。土壤动物的生物扰动作用可以破碎大团聚体，同时也能将有机物颗粒运输到新的位置上，从而有利于新团聚体的形成<sup>[67]</sup>。中小型土壤动物的运动也不容忽视，它们可能会将微生物和养分携带到新的位置上，这个过程可能对根系觅食途径、形态和活性有所影响<sup>[68]</sup>，而根系能促进团聚体的形成和稳定。总之，土壤动物通过改变有机物在土壤中的分布、植物生长和群落组成、微生物活性及群落组成等强烈影响土壤团聚过程，需要进一步关注土壤生物

与土壤结构相互作用对有机碳稳定性的影响<sup>[69]</sup>。

## 5 展 望

土壤团聚体对土壤有机碳的物理、化学、生物保护作用是影响土壤有机碳稳定性的重要机制之一。目前对土壤团聚体固碳的机理虽然有一定程度的认识，但仍存在不少问题。虽然有关有机碳和团聚体相互关系及影响因素的研究很多，但迄今为止，对团聚体内部有机碳固定、动态、稳定的复杂过程仍不清楚，目前团聚体的保护机制主要集中在物理措施中，生物和化学的保护机制有待于进一步研究。现有的分离有机碳和打破团聚体内部结构的研究方法较少，可能也阻碍了人们对其认识上的突破。如何确定各地的土壤固碳潜力是科研工作者面临的一项重要任务。为此，今后需要加强以下方面的研究：

(1) 有机碳积累中团聚体分配与微生物生境的改变，有机碳积累中生物多样性的变化与优势种群和适应性种群的分布和活性的关系，微生物功能群变化与微生物量变化的耦合关系，土壤生物对土壤有机碳再合成的影响，应借助其他技术研究土壤生物对土壤有机碳稳定性的贡献，例如：同位素标记技术和某些生物标志物。

(2) 应从土壤学角度，从团聚体的形成途径出发，结合团聚体内部有机碳的输入、转化、保护与稳定等几个碳转化环节的关系进行定量研究。

(3) 结合不同时空尺度的实验，室内试验和野外长期的原位监测是全面了解有机碳稳定性机制的必要途径。

#### 参考文献：

- [1] 林培松，高全洲. 不同土地利用方式下紫色土结构特性变化研究 [J]. 水土保持研究, 2010, 17 (4): 134-138.
- [2] EMERSON W W. A classification of soil aggregates based on their coherence in water [J]. Australian Journal of Soil Research, 1967 (5): 47-57.
- [3] 李景，吴会军，武雪萍. 长期保护性耕作提高土壤大团聚体含量及团聚体有机碳的作用 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (2): 378-386.
- [4] 苜蓿. 作物轮作模式对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响 [J]. 中国农业生态学报, 2016, 24 (1): 27-35.
- [5] 张延，梁爱珍，张晓平，等. 土壤团聚体对有机碳物理保护机制研究 [J]. 土壤与作物, 2015, 4 (2): 85-90.
- [6] 冷延慧，汪景宽，薛菁芳. 连续施肥 20 年以后棕壤团聚体分布和碳储量变化 [J]. 土壤通报, 2008, 39 (4): 743-747.
- [7] 张国盛，黄高宝，Yin C. 农田土壤有机碳固定潜力研究进展 [J]. 生态学报, 2005, 25 (2): 351-357.

- [8] GIFFORD R M, CHENEY N P, NOBLE J C, et al. Australian land use, primary production of vegetation and carbon pools in relation to atmospheric carbon dioxide concentration [J]. Bureau Rural Resources Proceedings, 1992 (14): 151-187.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Soil structure and soil organic matter. II. A normalized stability index and the effect of mineralogy [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64 (3): 1042-1049.
- [12] 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.
- [13] LAL R, KIMBLE J M. Conservation tillage for carbon sequestration [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1997, 49 (1/3): 243-253.
- [14] 张国, 曹志平, 胡婵娟. 土壤有机碳分组方法及其在农田生态系统研究中的应用 [J]. 应用生态学报, 2011, 22 (7): 1921-1930.
- [15] 陈建国, 田大伦, 闫文德. 土壤团聚体固碳研究进展 [J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31 (5): 74-80.
- [16] BLANCO-CANQUI H, LAL R. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates [J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2004, 23: 481-455.
- [17] 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.
- [18] TISDALL J M, OADES J M. Organic-matter and water-stable aggregate in soils [J]. Journal of Soil Science, 1982, 33: 141-163.
- [19] OADES J M. Soil organic-matter and structural stability-mechanisms and implications for management [J]. Plant and Soil, 1984, 76: 319-337.
- [20] 文倩, 关欣. 土壤团聚体形成的研究进展 [J]. 干旱地区研究, 2004, 21 (4): 434-438.
- [21] COLCHIN A, BALDOCK J A, OADES J M. A model linking organic matter decomposition, chemistry, and aggregate dynamics [J]. Symposium on Carbon Sequestration in Soils, Columbus, OH, 1998: 245-266.
- [22] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems [J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63: 1350-1358.
- [23] TISDALL J M, OADES J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. Journal of Soil Science, 1982, 33 (2): 141-163.
- [24] 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: 1367-1377.
- [25] 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.
- [26] OADES J M. Soil organic matter and structural stability: Mechanisms and implications for management [J]. Plant and Soil, 1984, 76 (1/3): 319-337.
- [27] ELLIOTT E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50 (3): 627-633.
- [28] GOLCHIN A, OADES J M, SKJEMSTAD J O, et al. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state  $^{13}\text{C}$  Cp/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy [J]. Australian Journal of Soil Research, 1994, 32 (2): 285-309.
- [29] ANGERS D A, RECOUS S, AITA C. Fate of carbon and nitrogen in water-stable aggregates during decomposition of  $^{13}\text{C}$   $^{15}\text{N}$ -labelled wheat straw in situ [J]. Eur J Soil Sci, 1997, 48 (2): 295-300.
- [30] 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.
- [31] 史奕, 陈欣, 沈善敏. 土壤团聚体的稳定机制及人类活动的影响 [J]. 应用生态学报, 2002, 13 (11): 1491-1494.
- [32] BEARE M H, HENDRIX P F, COLEMAN D C. Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional and no-tillage soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58 (3): 777-786.
- [33] BEARE M H, HENDRIX P F, CABRERA M L, et al. Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional and no-tillage soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58 (3): 787-795.
- [34] ELLIOTT E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50 (3): 627-633.
- [35] 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.
- [36] 李景, 吴会军, 武雪萍, 等. 长期保护性耕作提高土壤大团聚体含量及团聚体有机碳的作用 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (2): 378-386.
- [37] OREN R, ELLSWORTH D S, JOHNSEN K H, et al. Soil fertility limits carbon sequestration by forest ecosystems in a  $\text{CO}_2$  enriched atmosphere [J]. Nature, 2001, 411 (6836): 469-472.
- [38] 梁玉衡. 论土壤团粒结构与土壤肥力的关系 [J]. 土壤通报, 1983 (1): 30-32.
- [39] 黄不凡. 绿肥、麦秸还田培养对土壤有机质和团聚体性状的影响 [J]. 土壤学报, 1984 (2): 58-63.
- [40] 姜岩, 窦森. 土壤施用有机物料后重组有机质变化规律对有

- 机无机复合及腐殖质结合形态的影响 [J]. 土壤学报, 1987, 24 (2): 97-104.
- [41] 李映强, 曾觉廷. 不同耕作制下水稻土有机物质变化及其团聚作用 [J]. 土壤学报, 1991, 28 (4): 404-409.
- [42] PALM C A, GACHENGO C N, DELVE R J, et al. Organic inputs for soil fertility management in tropical agroecosystems: Application of an organic resource database [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2001, 83 (1/2): 27-42.
- [43] FONTE S J, YEBOAH E, OFORI P, et al. Fertilizer and residue quality effects on organic matter stabilization in soil aggregates [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73 (3): 961-966.
- [44] 张旭辉, 李恋卿, 潘根兴. 不同轮作制度对淮北白浆土团聚体及其有机碳的积累与分布的影响 [J]. 生态学杂志, 2001, 20 (2): 16-19.
- [45] 李恋卿, 张旭辉, 潘根兴. 退化红壤植被恢复中表层土壤微团聚体及其有机碳的分布变化 [J]. 土壤通报, 2000, 31 (5): 193-195.
- [46] MENDES I C, BANDICK A K, DICK R P, et al. Microbial biomass and activities in soil aggregates affected by winter cover crops [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63 (4): 873-881.
- [47] 王义祥, 叶菁, 黄毅斌, 等. 不同经营年限对柑橘果园土壤团聚体有机碳的影响 [J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31 (5): 724-729.
- [48] 张先凤, 朱安宁, 张佳宝. 耕作管理对潮土团聚体形成及有机碳积累的长期效应 [J]. 中国农业科学, 2015, 48 (23): 4639-4648.
- [49] CHAN K Y. Soil particulate organic carbon under different land use and management [J]. *Soil Use and Management*, 2001, 17 (4): 217-221.
- [50] BEARE M H, CABRERA M L, HENDRIX P F, et al. Aggregat Protected and unProtected organic matter Pools in conventional and notillage soils [J]. *soil Science Society of Almerica Journal*, 1994, 58: 77-79.
- [51] ZHANGW, YUY Q, SUNWJ, et al. Simulation of soil organic carbon in Chinese rice Paddies from 1980 to 2000 [J]. *Pedosphere*, 2007, 17 (1): 1-10.
- [52] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉, 等. 中国土壤有机碳库量与农业土壤碳固定动态的若干问题 [J]. 地球科学进展, 2003, 18 (4): 609-618.
- [53] ELLIOTTET, COLEMAND C. Let the soil work for us [J]. *Soil Bull*, 1998, 39: 23-32.
- [54] CLOUGH A, SKJEMSTAD J O. Physical and chemical Protection of soil organic carbon in three agriculture soils with different contents of calcium carbonate [J]. *Australian Journal of soil Research*, 2000, 38: 1005-1016.
- [55] OSHER L J, MATSON P A, AMUNDSON R. Effect of land use change on soil carbon in Hawaii [J]. *Biogeochemistry*, 2003, 65: 213-232.
- [56] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉, 等. 中国土壤有机碳库量与农业土壤碳固定动态的若干问题 [J]. 地球科学进展, 2003, 18 (4): 609-618.
- [57] 宋国菌. 耕垦下表土有机碳库变化及水稻土有机碳的团聚体分布与结合形态 [D]. 南京: 农业大学, 2005.
- [58] LÜTZOW M, KOGEL-KNABNER I, EKSCHMITT K, et al. Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions-A review [J]. *European Journal of Soil Science*, 2006, 57 (4): 426-445.
- [59] KOGEL-KNABNER I. The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34: 139-162.
- [60] SIX J, FREY S D, THIET R K, et al. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems [J]. *Soil Science Society America Journal*, 2006, 70: 555-569.
- [61] NANNIPIERI P, KANDELER E, RUGGIERO P. Enzyme activities and microbiological and biochemical processes in soil [C] // Burns, R G, Dick R P, eds. *Enzymes in the Environment*. New York: Marcel Dekker Inc, 2002: 1-34.
- [62] FOX O, VETTER S, EKSCHMITT K, et al. Soil fauna modifies the recalcitrance-persistence relationship of soil carbon pools [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38: 1253-1263.
- [63] WOLTERS V. Invertebrate control of soil organic matter stability [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 31: 1-19.
- [64] FRANZLUEBBERS A J. Microbial activity in response to water-filled pore space of variably eroded southern Piedmont soils [J]. *Applied Soil Ecology*, 1999, 11: 91-101.
- [65] HASSINK J, BOUW M ANN L A, ZWART K B, et al. Relationships between soil texture, physical protection of organic matter, soil biota, and C and N mineralization in grassland soils [J]. *Geoderma*, 1993, 57: 105-128.
- [66] BOSSUYT H, SIX J, HENDRIX P F. Rapid incorporation of fresh residue-derived carbon into newly formed microaggregates within earthworm casts [J]. *European Journal of Soil Science*, 2004, 55: 393-399.
- [67] HODGE A, ROBINSON D, FITTER A H. Are microbes more effective than plants at competing for nitrogen? [J]. *Trends in Plant Science*, 2000, 5: 304-308.
- [68] JOUQUET P, DAUBER J, LAGERL F J, et al. Soil invertebrates as ecosystem engineers: Intended and accidental effects on soil and feedback loops [J]. *Applied Soil Ecology*, 2006, 32 (2): 153-164.
- [69] MEYSMAN F J R, MIDDELBURG J J, HEIP C H R. Bioturbation: A fresh look at Darwin's last idea [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2006, 21: 688-695.

(责任编辑: 柯文辉)