

潘根兴, 陆海飞, 李恋卿, 等. 土壤碳固定与生物活性: 面向可持续土壤管理的新前沿[J]. 地球科学进展, 2015, 30(8): 940-951, doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2015.08.0940. [Pan Genxing, Lu Haifei, Li Lianqing, et al. Soil carbon sequestration with bioactivity: A new emerging frontier for sustainable soil management[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(8): 940-951, doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2015.08.0940.]

土壤碳固定与生物活性: 面向可持续土壤管理的新前沿*

潘根兴, 陆海飞, 李恋卿, 郑聚锋, 张旭辉,
程 琨, 刘晓雨, 卞荣军, 郑金伟

(南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 江苏 南京 210095)

摘要:土壤碳固定研究是近10年土壤学研究的重要前沿, 而可持续管理的土壤固碳是当前应对气候变化和全球土壤退化的重大需求。从土壤有机碳的生态系统功能及服务出发, 分析了土壤碳固定与土壤功能及生物活性的关联, 评述了当前土壤碳固定与微生物活性变化的认识, 探讨了土壤团聚体尺度土壤固碳与生物活性的关系, 并以水稻土为例讨论了土壤碳固定中团聚体过程及其有机碳—微生物—生物活性的演进关系, 提出了土壤碳库稳定性与生物活性的协同关系及其表征问题, 特别是如何通过有机质—微生物—酶活性的团聚体分布揭示土壤碳固定的本质, 以及良好管理下土壤固碳与生态系统功能的协同特征及其管理途径等优先科学问题。借助非破坏团聚体分组技术和现代微域原位观察分析技术, 土壤学已经从团聚体尺度深入研究土壤固碳与生物活性的土壤机制, 这将全面地揭示土壤固碳对于生态系统过程、功能及服务的影响特质, 进而为可持续土壤固碳和农田有机质提升, 为固碳减排与农田生产力提升及土壤环境服务改善协同发展提供科学依据和管理的政策依据。

关键词:碳固定; 生物活性; 生态系统功能; 团聚体; 生态效益与生态服务

中图分类号: P934

文献标志码: A

文章编号: 1001-8166(2015)08-0940-12

土壤有机质是土壤的最关键属性, 是土壤质量的核心。而以土壤有机质形式存在的(有机)碳是岩石风化形成土壤的关键物质^[1], 在土壤结构形成与保持、土壤养分循环及土壤生物多样性养育中发挥着核心作用, 是人类社会可持续发展的关键自然资源^[2, 3], 更是可持续农业的关键基础^[4]。因此, 土壤有机质(碳)研究一直是土壤学的核心领域。

土壤有机质既是土壤结构的关键物质, 又是土壤生物活动的关键能量来源。土壤有机质积累、固定及其与微生物利用与功能的关系, 以及这种关系

在土壤的微域分布特点和生态关系特征, 是认识土壤功能及生态系统服务的重要基础, 也是认识土壤形成和发育中功能活性演进的基础问题^[5]。因此, 认识土壤有机质—微生物—土壤功能活性的关系, 成为当前应对全球气候变化和提升土壤健康和安全的重大土壤学前沿。本文试图系统地总结相关研究国际动态, 梳理土壤固碳与生态系统功能及服务的研究认识, 讨论土壤固碳中有机质生物活性的演变关系, 探讨这种关系所涉及的土壤过程特别是团聚体过程, 提出今后研究的关键科学问题, 希望对未来

* 收稿日期: 2015-04-07; 修回日期: 2015-07-03.

* 基金项目: 国家自然科学基金重点项目“稻田土壤有机碳固定与稳定化过程与机制: 土壤—作物—微生物相互作用”(编号: 40830528)资助.

作者简介: 潘根兴(1958-), 男, 浙江浦江人, 教授, 主要从事土壤学研究. E-mail: panggenxing@aliyun.com

土壤固碳与可持续农业的研究和技术发展以及相关政策制定提供依据。

1 土壤固碳研究应关注土壤生态系统功能及服务

应对气候变化必须促进土壤固碳。由于人类对土壤的不当利用导致的土壤退化和以全球暖干化为主要特征的气候变化,土壤有机碳损失而增加对大气 CO₂ 温室气体释放已经是全球尺度的普遍趋势。即使在欧洲,土壤有机碳损失也成为大陆尺度的普遍趋势^[6,7]。Bellamy 等^[8]曾在《自然》杂志撰文指出,1978—2003 年英格兰和威尔士发生土壤有机碳的普遍和强烈损失。锁定土壤碳、保持和稳定土壤有机碳库成为保护土壤与维持可持续发展的全球生态与环境管理的重要战略,随之成为科学界的重大研究挑战^[9]。因此,近 10 多年来,土壤固碳科学研究和技术发展成为全球地学、生态学和环境科学热点领域^[10]和农业技术发展的关键领域^[11]。与时俱进,传统土壤学分化和重组出一个崭新的学科领域——固碳土壤学研究^[12,13],增进碳稳定的土壤有机碳管理和土壤固碳(减排)技术也成为这个新兴学科领域的关键任务^[14],其研究和技术发展至今方兴未艾。

土壤固碳应该服务于土壤功能保持和提升。近数十年来,全球人口快速增长日益加重了对食物和纤维生产的巨大需求,更由于工业化和城市化土壤占用及其引起的土壤污染,全球土壤普遍存在着酸化、盐碱化、土壤侵蚀和沙化、土壤紧实化、有毒污染物积累、生境退化和生物多样性丧失以及土壤墒情降低等土壤功能退化趋势,全球土壤生产力和环境容量的可持续压力和风险与日俱增。而到 2050 年,全球人口将达到 90 多亿,全球食物和纤维需求将加倍,水资源需求增加 50%,加上日益严峻的气候变化,无疑将大大加剧这些土壤退化,进而极大地威胁全球社会可持续发展。毋庸置疑,保护和恢复土壤功能不但是应对气候变化,而且是应对这些可持续发展风险的全球挑战^[15,16]。令人关注的是,土壤有机碳的损失恰恰是与应对气候变化和应对全球土壤退化相交集的问题。土壤有机碳固定是否能恢复和增进土壤的功能,特别是能否促进土壤的生产力和生态系统服务成为固碳土壤学研究的新问题。

土壤固碳应同时服务于应对气候变化与应对全球土壤风险。土壤有机碳通过对土壤结构和功能的控制,调节着土壤过程,提供土壤对生物量生产、能

源生产和保持、生物多样性维护及水分蓄持、固碳减排等多种生态系统服务^[17]。因此,无论是减缓气候变化的土壤碳库变化,还是土壤质量变化与功能退化,都与土壤有机质(有机碳)的数量和功能变化息息相关^[18]。不难理解,欧盟将土壤有机碳损失态势列为全欧土壤受损威胁(soil threats)之首位^[19]。因此,土壤碳库保持和稳定与土壤的生态系统功能及生态服务的关系便成为土壤有机碳研究的新热点。鉴于此,当前土壤有机碳研究需要超越碳库本身的研究,注重碳库变化中土壤过程和功能与服务的变化^[20]。

2 土壤碳固定与土壤功能和生物活性的关系问题

土壤具有多种生态系统功能和服务。生态学上广为接受的土壤功能包括:(a)生物生产,(b)物质(包括养分、水和污染物)储存、过滤和转化,(c)生境、物种和遗传多样性保持,(d)自然和文化环境维持,(e)提供矿物等原材料,(f)碳库及其循环以及(g)历史遗迹存留(这也可归类到 d)等^[21]。而土壤的生态系统服务是人类社会通过这些土壤功能而得到的益处,主要归为如下 4 类:A,支撑服务(Supporting services),主要与土壤的生境功能和生物生产功能相联系;B,供给服务(Provisioning services),主要与土壤提供原材料、提供有效养分、提供生物生长等功能相联系;C,调节服务(Regulatory services),主要与功能 b 和 f 相联系;D,享受/文化服务(Cultural services),主要与土壤维持自然和文化环境的功能相联系^[22]。这些已经明确定义的土壤功能和生态系统服务是地球关键带的核心^[23]。

土壤有机质的核心土壤功能及服务问题。在土壤有机质功能及服务中,广为人知的首先是土壤的团聚化和土壤水分保蓄,以及在此基础上的土壤保持而抵抗侵蚀的能力^[23]。最近完成的 SCOPE RAP 项目“Benefits of Soil Carbon”评估报告,详细讨论了土壤有机质的多种生态系统功能与服务,而土壤团聚体建成及生物发育是最受关注的有机质功能及服务,并且是所有土壤生态系统功能和服务的基础和调节者^[24]。这个报告提出了平衡和优化土壤生态系统功能与服务的有机碳水平和管理途径的研究需求^[25]。我们通过对中国土壤有机碳相关研究资料的整合分析,提出了有机碳提供了农田生产力、生物多样性、环境缓冲和固碳减排等方面的生态系统功能及服务的观点(图 1),其空间尺度从田间到流域

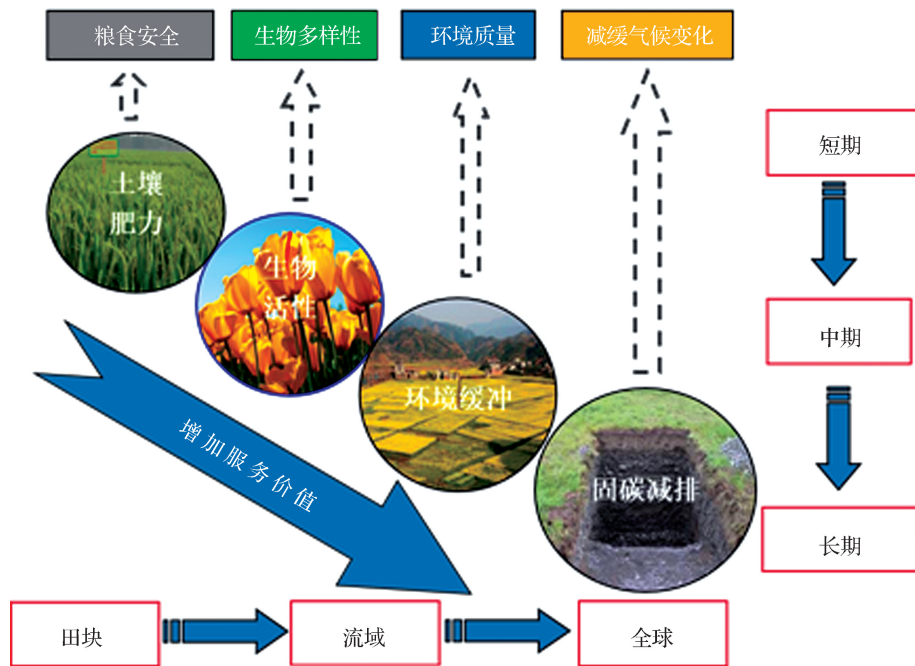


图1 土壤有机碳空间和时间不同生态系统功能与服务(据参考文献[26]修改)

Fig. 1 Ecosystem functions and services of soil organic carbon across temporal and spatial scales (modified after reference[26])

再到全球系统,其时间尺度从短期,中期到长期,不但要从农业角度认识其服务,更应从全球尺度深刻理解和把握其对人类的巨大服务价值^[26]。当然,对这些功能及服务的研究资料十分分散和细碎,对其认识还处于定性描述阶段。但重要的是,土壤碳库保持与土壤功能和服务协同共赢的机理仍不清楚。

农业土壤有机质的功能及生态系统服务问题。对于农业来说,最重要的土壤功能应当是生物量生产(作物生产力),物质转化(养分和水分转化)和生物区系与活性的保持;与这些功能相对应,土壤的供应服务、调节服务和支撑服务,特别是对养分和水分的供应、对微生物区系和多样性的维持是土壤有机碳功能及服务的关键,而对于微生物区系和活性的作用更应是这种关键的核心^[27]。高的微生物生物量、多样性及代谢活性(可概括为功能多样性)可以代表土壤微生物区系的活性(microbial activity),尽管不一定只是生物学活性。土壤微生物利用土壤有机碳作为代谢基质,提供能量维持其生命活动,进行着元素转化和能量代谢。无疑,我们需要土壤中的有机碳、至少部分有机碳能满足养育一个高生物活性的微生物区系。那么,当前十分关注的土壤碳固定及稳定与微生物活性存在什么样的联系呢?碳固定和稳定是否可以与微生物活性及功能项协调甚至

耦合?如果是,其土壤学过程和机理如何,应该如何表征?这些便成为土壤固碳研究的新问题。

有机碳固定和稳定的土壤学认识进展。早期认为,土壤碳固定和稳定首先是有机化学转化和稳定过程。传统的有机质分组可以解释土壤碳的稳定,大分子的木质素以及腐殖化的胡敏酸等化学稳定的有机碳被认为是有机碳固定和稳定的化学机制,这可以通过化学氧化性分组(Labile Organic Carbon, LOC; Recalcitrant Organic Carbon, ROC)来表征。后来,Six等^[28]提出,有机碳固定的土壤机制在于大团聚体物理保护、与粉砂和黏粒颗粒的复合和生物化学稳定(形成惰性有机质)。Hassink^[29]提出的黏粒保护理论是对这种物理保护和矿质复合的特别扩展,相应于这些保护机制,土壤有机碳可以分出快库(未保护碳)、慢库(物理保护和粘粒复合碳)和惰性库(生物化学稳定的腐殖质碳)。DOC(溶解迁移的有机碳组分),POC(颗粒态的有机碳)和ROC(残渣态碳)等形态可以相对地解释这些碳库。稍后,Marschner等^[30]通过同位素标记的分解研究,指出分子结构对有机碳稳定的作用可能被高估,而只有在物理保护于团聚体或吸附结合于矿物表面才使进入土壤的有机碳稳定化。存在于团聚体的物理保护碳,可能通过与矿物表面基团的化学结合,例如与氧化

铁矿物表面的结合进一步稳定化,例如钙键结合的胡敏酸(CaHA)¹⁴C年龄明显小于非钙键合的腐殖酸(Mobile Humic Acids, MHA)。从夏威夷火山灰土由森林改为草地和甘蔗田后有机质变化,认识到土壤中铁铝氧化物含量对尚存土壤有机碳水平的控制,从而支持了铁铝结合有机质的稳定化^[31]。而Mikutta等^[32]研究认为,土壤团聚体中有机碳既被物理保护又被化学稳定,物理保护的有机碳在土壤中经受固有的化学转化和稳定作用,而化学稳定又可以分出被氧化物结合的稳定和化学转化为惰性有机质的稳定,只是目前对于物理保护和化学稳定2种作用相对重要性还了解很少。这种结合稳定可以通过钙键结合态、氧化物结合态和强酸提取的有机碳组分来对应分析讨论。Mikutta等^[32]的这一工作可能预示着化学结合稳定和转化为惰性有机质可能是碳固定和稳定的最终本质。可惜的是,这一工作没有得到更多关注。

Schmidt等^[33]于2011年在《自然》杂志发表了“Persistence of soil organic matter as an ecosystem property”的论文,通过对不同碳组分更新周期与土壤本体有机质更新周期资料的对比,进一步诠释和确立了土壤碳固定和稳定的机制,化学结构本身的控制作用可能并不是主要的或重要的稳定机制,而限制或降低土壤有机碳被(微生物)分解的可能性是重要的又是主要的土壤碳稳定机制,这更多地受局地环境控制的物理、化学和生物学的综合影响。因此,可以认为,土壤有机质的滞留稳定看来不是有机质分子属性问题,而是生态系统属性问题^[33]。而以Century模型为代表的碳库模型显然都基于土壤碳库及其微生物分解特点,都未能与土壤的生态系统过程相联系,因而并不能令人满意地模拟土壤有机碳库动态及对气候变化的响应,主要是因为这些以有机质分解过程为基础的模型没有考虑到土壤有机碳的存在状态^[33],因而不能联系到物理保护、化学结合稳定和生物学稳定对有机质分解的控制。当然,这些模型也就无法用于评价土壤碳库变化中土壤功能和生物活性的变化。因此,越来越多的研究呼吁关注土壤碳固定中生态系统功能和服务变化,特别是生物活性变化及其带来的土壤肥力和生产力效应^[34, 35]。

3 土壤碳固定与稳定中的微生物活性变化认识

土壤微生物对碳固定和稳定的可能响应。土壤

微生物生物量不到土壤有机质的5%,在农业土壤中一般为1%~3%。而土壤微生物体一般仅占土壤容积的1%。这些微生物被分散在土壤的不同粒径和形状的团聚体中,它们与有机质的联系常常被充水与不充水孔隙所分割。上述碳固定和稳定的机制提示,碳固定和稳定的实质是土壤有机碳对土壤中微生物碳资源利用性降低,包括空间上的隔离和生物化学上的难分解。理论上,有机质固定和稳定势必导致对微生物生长及其对碳资源利用的限制。那么,土壤有机碳碳库的重构和稳定,是否一定造成了土壤微生物活性的降低,如否,则存在什么过程和调控机制呢?

微生物活性与碳利用的关系。一般地,土壤生物活性可以理解为土壤保持有一个大的微生物区系,其具有高的多样性和生物化学(功能)活性。土壤固碳中生物活性的变化,首先是土壤微生物功能活性的变化。鉴于生物多样性在生态系统功能及其对人类环境干扰响应中具有重要意义^[27],应该认为是土壤微生物功能活性的重要属性之一。酶活性被普遍认为是土壤的微生物功能活性的代表,微生物通过其分泌的酶参与和调控生态系统中碳、氮、硫、磷等养分的循环,特别是土壤的脱氢酶,代表微生物的代谢活性^[36]。土壤学研究中报道的土壤酶多达近20种,通常分析不多于10种酶的活性,主要是与养分利用有关^[37]和有机质分解和转化^[38]有关的土壤酶。21世纪早期发展起来的微孔荧光法(Microplate fluorimetric assay)可以快速大批量地测定土壤酶活性^[39]。经过不断改进^[40, 41],其已经成为一种可以与常规生化法相对比的土壤酶例行分析法^[42]。不过,在实验过程中需要更严密地控制分析质量。

土壤碳固定及稳定化与土壤生物活性的关系,应该主要审视碳库增长中土壤微生物生物量、微生物多样性与微生物酶活性,及其相互关系演进。我们曾经提出以有机碳含量为尺度衡量微生物活性的变化,即用微生物熵有机碳含量归一化的微生物丰度、整合的土壤酶活性强度(将多个不同量纲的酶活性指标无量纲化为归一化酶活性,并将其分别用有机碳含量和微生物生物量归一化)的酶活性强度整合的土壤酶活性(即考虑)来衡量土壤有机质的微生物活性^[43]。除了脱氢酶还直接在微生物体内外,绝大多数土壤酶依附于有机质及有机质-矿质复合体存在,即固定态酶,它们都分布于土壤团聚体中。无论如何,土壤酶活性是微生物,特别是活动着(发挥着功能)的微生物长期活动效应的综合

结果^[36]。

微生物呼吸强度用于认识土壤有机碳固定和稳定的问题。以往多认为,土壤呼吸活性所代表的微生物代谢活性是土壤质量和微生物活性的良好指示,但这只是相对于无干扰或自然生态系统的土壤。根据碳固定理论框架,土壤呼吸越强,表示土壤微生物所消耗的有机物质越多,代表了土壤碳越不稳定。不过,目前还没有对土壤碳固定和稳定中土壤微生物生物活性进行充分研究,还不能全面和定量评估土壤碳固定和稳定化对土壤微生物活性的影响。但是,土壤碳的固定,无论是可分解碳被土壤保护而不能被微生物接触而分解,还是转化为惰性有机质成为非微生物可利用碳,最终的表现均是土壤碳减少被微生物的分解而释放 CO₂,即有机碳的呼吸率降低。因此,土壤有机碳固定和稳定的实质应该是土壤微生物有机碳分解保持稳定甚至降低^[44]。于是,碳固定和稳定中的生物活性应该首先表现为碳基质利用率的提高。有许多案例研究表明,有机质增加而碳固定的土壤中,单位有机碳的呼吸率(呼吸商)降低,例如有机农田与常规农田对比^[45]。土壤呼吸,特别是呼吸商(有机碳归一化的土壤呼吸)和代谢商(微生物生物量归一化的土壤呼吸)实际上代表了土壤碳的生物学稳定性。例如,我们观察到重金属污染土壤呼吸商和代谢商提高^[46]。又如,在喀斯特生态系统中,土壤有机碳的呼吸商和代谢商均随土壤退化而显著升高^[47]。相反,无论是实验室研究还是田间试验,农田施用以固定态碳为主要成分的生物质炭促进了土壤微生物生长,提高了其多样性^[48, 49],但同时降低了土壤碳的呼吸率。我们对田间试验中土壤呼吸的观察也同时表明,生物质炭施用下土壤呼吸没有显著提高,代谢商显著降低,因而稳定态有机碳—生物质炭施用下降低了土壤微生物的胁迫,缓解了疲劳的土壤(recovered tired soil),因而提高了碳基质利用率。这提供了碳固定和稳定有利于微生物活性保持和提高的直接证据。因此,以土壤呼吸表示的土壤微生物生化活性并不能全面指示土壤微生物活性。如果相对于有机碳库的增长,土壤微生物生物量保持增长,多样性提高和生化活性增强,就认为土壤固碳有利于微生物活性提高。

单从有机碳的数量积累难以理解土壤碳固定与生物活性的关系。碳固定与生物活性的一个矛盾是,碳固定会提高土壤碳氮比,因而理论上会限制微生物和作物的养分利用,特别是氮素有效性。在不施肥的情况下,因为微生物需要更多能量来挖掘利

用土壤中已经限制的氮素,势必造成微生物的碳基质利用效率降低,而限制土壤碳稳定性^[50]。基于这种考虑,土壤碳固定可能会提高对氮素的需求^[51]。事实上,对太湖地区黄泥土长达20年的不同肥料处理的试验研究表明,有机碳积累提高了土壤微生物活性和氮素的作物利用率,提示微生物促进了氮素周转^[52]。另外的例子是,普遍观察到生物质炭(稳定态有机质为主)施用于农田后农田氮素利用率提高^[53]。在生物质炭与绿肥对退化土壤生产力恢复影响的对比研究中,绿肥等活性有机质恢复生产力57%~110%,而生物质炭恢复的生产力居然是绿肥的2倍多^[54]。这同样排除了稳定态碳限制了土壤中氮素利用的可能性,相反,稳定态有机质可能通过其他土壤因子改善了生物活性,而提高了氮素等养分资源的利用率。这个研究也提出了一个难分解或惰性有机质不一定是低品质有机质(low quality OM),反之快速被微生物分解而矿化出养分的有机质不一定是高品质有机质(high quality OM)。有机质的质量,可能重要的是其生物物理(biophysical)作用,即对土壤团聚体建成和生境的改善而不是其生物化学作用(微生物的碳基质及其分解性)^[55]。科学界早有评论,良好的农作管理应该是保持和稳定一个能促进农学生产力和经济可持续性的有机质碳库;同理,可持续固碳应该是保持和提高土壤生物活性和土壤质量的土壤固碳及稳定化^[55],亦即维持和促进土壤生态系统功能的土壤固碳^[56]。

4 从土壤团聚体过程认识土壤固碳与生物活性的关系

土壤碳固定和稳定首先是土壤团聚体过程。土壤有机碳固定,首先都增进团聚体稳定性^[57, 58]。在10年以上可持续管理的长期试验中,新进入土壤的有机碳与黏粒和粉砂级团聚体碳没有相关性,而只与大团聚体(>250 μm)碳显著相关,因此被大团聚体包裹的微团聚体碳固定是土壤新碳存在并积累的归趋^[59]。这也被作者的一些研究所证实^[60]。其次,无论用黏粒保护理论^[61]还是矿物—化学结合稳定理论^[62]来说明有机碳固定及稳定化,土壤有机碳积累都将趋向一个饱和限(saturation limit)^[63, 64]。但是,这被一些研究所质疑。例如Kong等^[59]的研究表明,可持续管理的农业系统中10年以上的土壤碳积累并没有出现饱和;相反,通过δ¹³C示踪研究表明,比利时某种植玉米已12年的土壤中,有稳定态黑炭存在的农田中有机碳含量比无明显黑炭存在

的田块高 2.1% 以上,而增加的有机碳主要是受团聚体物理保护的。与此相应,实验室培养中黑炭田块玉米碳土壤呼吸比无黑炭田块明显减少。这与促进了黑炭大土壤团聚体形成而加强了碳的物理保护作用相呼应^[65]。这个研究支持了这样的假设,添加生物质炭于土壤中,不但可能不激发对原有有机碳的分解作用,而且可能在长期尺度上促进土壤对外源碳的固定及稳定化^[66]。与这个研究相似的是,最近我们对浙江慈溪百年尺度的水稻耕作时间序列的研究表明,添加玉米碳培养,这个时间序列的不同土壤对玉米碳的固定与黏粒、氧化铁等矿物质组分的关系并不显著,而与土壤的大团聚体(2 000 ~ 250 μm)含量成极显著线性相关,并没有表现出团聚体含量变化趋饱和现象。这与 Kong 等^[59]对不同耕作制土壤的有机碳水平与碳的团聚体分布的关系的研究结果相一致。

最近, Vogel 等^[67]发表了一个采用 SEM 和 Nano-SIMS 技术进行团聚体微域研究的报告,将负载有微团聚体样本的硅晶片进行颗粒扫描电镜观察,继之对金镀膜后颗粒再用 Cs^+ 初级离子探针进行 Nano-SIMS 分析。对淋溶土添加 ^{13}C 和 ^{15}N 双标记的玉米秸秆进行培养,分析培养后标记碳(氮)微域分布,揭示了土壤中有有机碳存在于表面粗糙的矿物质-有机复合体中,新碳很少与 $<2\ \mu\text{m}$ 的单个黏粒矿物结合,而是与原先存在的这些粗糙表面的复合体中,即微团聚体结合。不过,老碳多保护在分散的黏粒颗粒中。这在提醒科学家,团聚体结合固碳,而不是矿物表面吸附固定,是土壤固碳的内在机理。这反证了土壤固碳是团聚体过程。

团聚体层面的土壤碳固定抑或更新都应该与微生物的分布及作用有关。过去对碳库及稳定性的描述和表征,较少考虑到团聚体中土壤微生物作用。土壤中微生物分解者和催化分解的酶(绝大多数是胞外酶)存在于微团聚体界面的充水孔隙或水膜^[68]。而被固定的新碳多存在于大团聚体内的微团聚体中(即 iPOM,微团聚体间颗粒态碳)^[28]。因此,微生物和酶与有机质基质被空间上隔离,后者一般成簇状存在于团聚体间特别是土壤矿物表面,它们很少被微生物占据,因为微生物占土壤有机碳一般在 1% ~ 3%,在黏质土壤中矿物表面被微生物占据的概率更低^[69]。而正如前述,新碳是簇状被矿物复合体结合保护而固定的,可能就是颗粒态有机碳,尽管在化学上不稳定,但是由于被保护,与微生物分处不同的、遥远而互不相通的空间位置,而变得稳定

化(图 2)。Don 等^[70]采用有机碳与土壤不同混合比例培养测定砂质土壤中有有机质分解,结果是低有机碳处理下有机质分解降低,指出土壤微生物处于对有机质的接触的能量胁迫状态,即低有机碳下微生物活性受损。

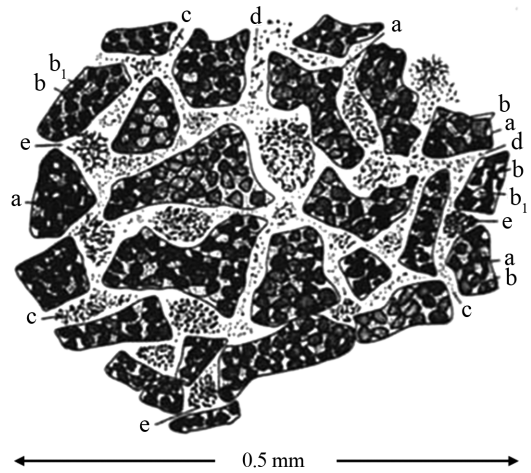


图 2 大团聚体中微团聚体、有机质、微生物分布示意图
Fig. 2 Distribution of microaggregate, organic matter, microorganism in macroaggregate

图中暗色小块(a)为微团聚体,其中的颗粒为细菌等微生物(b),微团聚体间浅色狭窄部分(c)为水膜,弯曲小条为真菌菌丝(d),微团聚体间暗色颗粒浓聚部分为簇状有机质(e),酶分布在微团聚体和簇状有机质表面
(a) Microaggregate, (b) Microorganism, (c) Water film, (d) Fungal hyphae, (e) Organic matter

团聚体微生物与有机碳的微域关系可能是碳固定及稳定促进微生物活性的机制。早已注意到,土壤中生物体有大小差异,它们与不同粒度的团聚体微生境相适合,并在不同的微生境发生着和调节着生态系统过程^[71]。新近,已越来越关注土壤团聚体中有有机质固定与微生物活性的关系。Rabbi 等^[72]在综述团聚体稳定有机质的机理研究中提出,团聚体物理保护及物理化学保护缺乏直接的实验证据,特别是无法说明与微生物利用的关系。例如, Huygens 等^[73]分析了团聚体不同组分有机质 $\delta^{15}\text{N}$ 丰度与 PLFA 微生物功能区系分布,发现 $<150\ \mu\text{m}$ 团聚体中比 $>150\ \mu\text{m}$ 团聚体中富集 ^{15}N ,但前者的细菌和真菌 PLFA 多于后者,即稳定的有机质却相对有较高的微生物丰度。这不能说明碳积累及稳定与微生物活性的关系,或者说与稳定有机质相联系的微生物可能并不是活性的,有着生态系统功能的微生物群体。

除了脱氢酶,土壤中酶基本上属于胞外酶,来自

土壤中动植物残体、活的土壤动物和微生物,土壤酶与矿质—有机复合体结合而稳定存在于土壤团聚体内部和表面,因而与不同活性的有机质或碳库有一定的空间依存关系^[74, 75]。土壤生境中土壤酶的自然选择趋向于促进土壤生物特别是微生物最低的碳及养分消耗,因此胞外酶活性可以反映系统功能过程的经济性,即提高碳基质、养分、能量的利用效率。因而可以用酶活性来衡量微生物的功能活性^[76]。分析多种土壤酶的团聚体存在及活性分布可以直接与土壤生态系统功能多样性相联系^[75]。因此,从团聚体尺度了解有机碳—微生物—土壤酶活性关系,是揭示有机碳固定和稳定中生物活性演变的基本途径。欧洲土壤学家最先提出了低能量超声分散代替化学分散区分水稳性团聚体,称为团聚体颗粒组分级 (particle size fractions)^[77],可以满足对土壤微生物及其酶活性的研究^[78, 79]。新近,Smith等^[80]的研究是不采用分散剂,在第一次水分散和筛分出水稳性团聚体后,对大团聚体(250~2 000 μm)进行进一步超声破解分散,分散出的小团聚体被认为是包裹于大团聚体的有机质载体,可以满足团聚体中有机质—微生物—土壤酶活性的分析研究。

总之,现代仪器发展提供了直接观察团聚体有机质与微生物分布的手段。顺应这种发展,科学界应从团聚体尺度探讨微生物多样性、胞外酶存在及活性及其空间分布与有机质稳定的关系,从而进一步诠释团聚体有机碳固定与微生物活性的本质^[72]。最近,开始关注土地覆盖变化中团聚体土壤有机质变化与微生物活性变化的关系,特别是将团聚体碳库与微生物活性相联系,提出了不同的碳库是否不同微生物区系及活性相关,且这种相关是否随土地利用和管理而变化的问题^[80]。

5 水稻土固碳研究:团聚体水平的有机碳与生物活性的关系

水稻土是特殊的生物地球化学环境。水稻土是人为活动所改变或塑造的特殊土壤^[81],而特定的水稻土可以反映人为管理对自然土壤的改造和定向培育的演化^[82]。水稻土是生产能力高而土壤质量相对较好的农业资源^[83],而且还是在环境和气候变化中生产力较为稳定的农业土壤^[52, 84]。稻田土壤由于干湿交替等管理赋予土壤微生物独特的生境^[85],稻田可以认为是一个具有独特生物地球化学过程的农业管理的地球表层生态系统,特别是在甲烷等温室气体产生和排放上^[86]。因而,国际学术界十分关

注以有机碳的循环为核心的水稻土生物地球化学研究^[85],近年来更关注水稻土利用和管理中有机质过程与土壤形成与发育的关系^[87~91]。2014年,德国自然科学基金会(Deutsche Forschungsgemeinschaft, DFG)资助下,Ingrid Kögel-Knaber在德国 Freising专门召开了一个水稻土生物地球化学循环国际学术讨论会,开放性讨论水稻土有机质固定及稳定机制,微生物与碳氮循环、水稻土发育的功能变化等问题。水稻土是中国稻作文明的代表,是我国土壤学的特色学术资源,我国必需发展水稻土有机质及其生物地球化学研究。

我国土壤科学家对水稻土有机碳的相关研究,已经充分认识到水稻土是有机碳含量水平较高、当前固碳趋势明显而固碳潜力较大的特色耕作土壤^[92~95]。大量的资料表明,水稻土有机碳不仅控制着稻田土壤生产力^[96],而且还调节着土壤生态系统服务功能^[25]。尽管团聚体尺度有机碳和微生物及酶活性等已有许多报道^[97],但有机碳固定和积累中土壤碳库及其团聚体分布与微生物及其功能活性的关系还未有系统和深入的综合研究。我们曾经提出了有机质积累和稳定中土壤功能性结构发育的假设,即有机质—微生物—土壤酶等特定组合关系团聚体结构,会随有机碳的积累和稳定而演进,并推动土壤功能的演进^[98]。

水稻土有机碳固定及稳定与微生物活性的协调。已有的研究中注意到,水稻土中真菌和细菌基因丰度(微生物生长活性)具有不同的团聚体分布格式,真菌多样性与团聚体中有机质(代表碳固定)分布相呼应,而细菌在不同的团聚体均有分布,尽管在细微的黏粒级团聚体更丰富。而土壤的总体酶活性分布与细菌多样性高度相关。而在水稻耕作和管理的时间序列中,土壤团聚体稳定性持续提高(表现为MWD线性递增),微生物丰度及酶活性强度相应递增。可以这样认为,有机质碳的固定和稳定在团聚体水平上可能并不矛盾,即土壤中有有机碳氮积累和稳定,可能有利于一个更高生物活性的微生物与有机质共存演进的团聚体结构。

土壤碳库建成及稳定与微生物活性在团聚体层面的协调问题。不同条件下有机质、真菌和细菌等微生物及其胞外酶具有一定的团聚体分布模式^[99]。随着有机质的积累,土壤大团聚体发育,不同微孔径和团聚体形成了有机质和微生物相互隔离但又在团聚体尺度上相互协调的一种特定结构,有机碳被物理保护而聚集在特定的微团聚体内部和周围,适合

这些微团聚体孔隙生境的微生物存在于期间,形成了多样化的有机质—微生物微结构生境,也就是说被固定的有机质和长期有机质积累下演化的微生物群落被安置在不同的空间,微生物处于良好的生境条件下,其丰度、活性及功能多样性得以保持和提高。这就是我们提出团聚体功能性结构的原理。这种结构和作用将随着良好管理的有机碳固定和稳定化的长期作用而协同演化。因此,土壤碳库建成及稳定与微生物活性可以协调发展。于是,可以通过分析不同团聚体与土壤碳库的关系和团聚体不同碳库与微生物活性的关系来诠释有机质积累和稳定对于土壤功能的关键作用。无论是土壤团聚体的生物物理过程,还是生物地球化学过程,水稻土都与旱地有极大的差异。从团聚体层面研究水稻土的有机质—微生物—土壤生物活性有望创新农业管理土壤碳循环与生态系统功能的认识。

为了可持续农业管理,在农业土壤碳固定与生物活性及生态系统服务功能方面,目前存在如下亟待探讨的问题:①不同的有机质输入在有机质积累中碳库稳定性与生物活性的关系如何?如何通过团聚体分析表征碳库稳定性与生物活性协同的有机质品质?②有机质积累和稳定中土壤碳库的分配与碳稳定及生物活性的关系如何?如何建立衡量碳固定与生物活性平衡或协同的碳库指标?如何通过有机质—微生物—酶活性的团聚体分布揭示这种关系的本质?③土壤发育和管理如何影响碳库稳定与生物活性的协同,其协同特征是什么,如何量化和表征?如何通过环境条件改善或改进管理促进这种协同?探讨这些问题,科学表征和定量评估不同环境和管理下土壤有机碳积累及稳定与微生物活性的关系,将是服务于可持续管理的农业土壤碳循环研究新的前沿。这种研究可以为可持续土壤固碳和农田有机质提升,为固碳减排与提升农田生产力及增进土壤环境服务功能提供科学依据和管理的政策依据。同时,通过水稻土研究丰富农业管理土壤的固碳科学理论和可持续土壤管理理论。

参考文献 (References):

- [1] Brantley S L. Weathering: Rock to regolith[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(5): 305-306.
- [2] Victoria R, Banwart S A, Black H, et al. The benefits of soil carbon: Managing soils for multiple economic, societal and environmental benefits[C]//UNEP Year Book 2012: Emerging Issues in Our Global Environment. UNEP, Nairobi, 2012:19-33.
- [3] Robinson D A, Hockley N, Cooper D M, et al. Natural capital and ecosystem services, developing an appropriate soils framework as a basis for valuation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57: 1 023-1 033.
- [4] Tiessen H, Cuevas E, Chacon P. The role of soil organic matter in sustaining soil fertility[J]. *Nature*, 1994, 371:783-785.
- [5] Lal R, Lorenz K, Hüttl R F, et al. Ecosystem Services and Carbon Sequestration in the Biosphere [M]. Dordrecht: Springer, 2013.
- [6] Rusco E, Jones R J A, Bidoglio G. Organic Matter in the Soils of Europe: Present Status and Future Trends[R]. Institute for Environment and Sustainability, Joint Research Centre, European Commission, 2001.
- [7] Montanarella L. Trends in land degradation in Europe[M]//Sivakumar M V K, Ndiang Ui B, eds. Climate and Land Degradation. Berlin: Springer, 2007: 83-104.
- [8] Bellamy P H, Loveland P J, Bradley R I, et al. Carbon losses from all soils across England and Wales 1978-2003[J]. *Nature*, 2005, 437(7 056): 245-248.
- [9] Schulze E D, Freibauer A. Environmental science: Carbon unlocked from soils[J]. *Nature*, 2005, 437(7 056): 205-206.
- [10] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, 304(5 677): 1 623-1 627.
- [11] Food Security and Agriculture Mitigation in Developing Countries; Options for Capturing Synergies [EB/OL]. FAO, 2009. [2015-04-02]. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/012/ak596e/ak596e00.pdf>, 2009.
- [12] McCarl B A, Metting F B, Rice C. Soil carbon sequestration [J]. *Climatic Change*, 2007, 80(1): 1-3.
- [13] Pan Genxing, Zhou Ping, Li Lianqing, et al. Core issues and research progress of soil science of C sequestration[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(2): 327-337. [潘根兴, 周萍, 李恋卿, 等. 固碳土壤学的核心科学问题与研究进展[J]. *土壤学报*, 2007, 44(2): 327-337.]
- [14] Smith P, Martino D, Cai Z, et al. Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 118(1): 6-28.
- [15] Banwart S. Save our soils[J]. *Nature*, 2011, 474(7 350): 151-152.
- [16] UNEP. Assessing Global Land Use: Balancing Consumption with Sustainable Supply. A Report of the Working Group on Land and Soils of the International Resource Panel[R/OL]. [http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Full_Report-Assessing_Global_Land_UseEnglish_\(PDF\).pdf](http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Full_Report-Assessing_Global_Land_UseEnglish_(PDF).pdf), 2014.
- [17] Nziguheba G, Vargas R, Bationo A, et al. Soil carbon: A critical natural resource-wide-scale goals, urgent actions[M]//Banwart S A, et al, eds. Soil Carbon: Science, Management and Policy for Multiple Benefits. Wallingford: CABI, 2014: 10-25.
- [18] Brovkin V, Van Bodegom P M, Kleinen T, et al. Plant-driven variation in decomposition rates improves projections of global litter stock distribution[J]. *Biogeosciences*, 2012, 9(1): 565-576.

- [19] Threats to the Soil Resource Base of Food Security in China and Europe[EB/OL]. EU Commission, 2013. [2015-04-02]. http://eu-soils.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/eusoils_docs/doc.html.
- [20] Pan G, Huang Z, Wang J, *et al.* Soil organic matter dynamics: Beyond carbon[C]//A Report of the 4th International Symposium on Soil Organic Matter Dynamics. Carbon Management, 2013, 4(5): 485-489.
- [21] Report on the Implementation of the Soil Thematic Strategy and Ongoing Activities[EB/OL]. EU Commission, 2012. [2015-04-02]. http://ec.europa.eu/environment/soil/three_en.htm.
- [22] Finvers M A. Application of DPSIR for Analysis of Soil Protection Issues and an Assessment of British Columbia's Soil Protection legislation[D]. UK: Cranfield University, 2008.
- [23] Banwart S, Menon M, Bernasconi S M, *et al.* Soil processes and functions across an international network of critical zone observatories: Introduction to experimental methods and initial results [J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2012, 344(11): 758-772.
- [24] Banwart S, Noellemeier E, Milne E. Soil Carbon: Science, Management and Policy for Multiple Benefits[M]. London: CABI, 2014.
- [25] Banwart S, Black H, Cai Z, *et al.* Benefits of soil carbon: Report on the outcomes of an international scientific committee on problems of the environment rapid assessment workshop[J]. *Carbon Management*, 2014, 5(2): 185-192.
- [26] Pan G, Li L, Zheng J. Benefits of SOM in agroecosystems: The case of China[M]//Soil Carbon: Science, Management and Policy for Multiple Benefits. London: CABI, 2014: 314-327.
- [27] Bardgett R D, van der Putten W H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning [J]. *Nature*, 2014, 515 (7 528): 505-511.
- [28] 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.
- [29] Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles[J]. *Plant and Soil*, 1997, 191(1): 77-87.
- [30] Marschner B, Brodowski S, Dreves A, *et al.* How relevant is recalcitrance for the stabilization of organic matter in soils? [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(1): 91-110.
- [31] Osher L J, Matson P A, Amundson R. Effect of land use change on soil carbon in Hawaii [J]. *Biogeochemistry*, 2003, 65(2): 213-232.
- [32] Mikutta R, Kleber M, Torn M S, *et al.* Stabilization of soil organic matter: Association with minerals or chemical recalcitrance? [J]. *Biogeochemistry*, 2006, 77(1): 25-56.
- [33] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, *et al.* Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. *Nature*, 2011, 478 (7 367): 49-56.
- [34] Lal R. Ecosystem Services and Carbon Sequestration in the Biosphere[M]. Dordrecht: Springer, 2013.
- [35] Wiesmeier M, Hübner R, Spörlein P, *et al.* Carbon sequestration potential of soils in southeast Germany derived from stable soil organic carbon saturation [J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(2): 653-665.
- [36] Bandick A K, Dick R P. Field management effects on soil enzyme activities [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31 (11): 1 471-1 479.
- [37] Natural Resources Conservation Service, Soil Quality Indicators. Soil Enzymes[EB/OL]. USDA, 2010. [2015-04-02]. http://soilquality.org/indicators/soil_enzymes.html. 2010.10.
- [38] Allison S D. Soil minerals and humic acids alter enzyme stability: Implications for ecosystem processes [J]. *Biogeochemistry*, 2006, 81(3): 361-373.
- [39] Marx M C, Wood M, Jarvis S C. A microplate fluorimetric assay for the study of enzyme diversity in soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(12): 1 633-1 640.
- [40] DeForest J L. The influence of time, storage temperature, and substrate age on potential soil enzyme activity in acidic forest soils using MUB-linked substrates and L-DOPA[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(6): 1 180-1 186.
- [41] German D P, Weintraub M N, Grandy A S, *et al.* Optimization of hydrolytic and oxidative enzyme methods for ecosystem studies [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43 (7): 1 387-1 397.
- [42] Deng S, Popova I E, Dick L, *et al.* Bench scale and microplate format assay of soil enzyme activities using spectroscopic and fluorometric approaches[J]. *Applied Soil Ecology*, 2013, 64: 84-90.
- [43] Jing Zhenjiang, Tai Jicheng, Pan Genxing, *et al.* Comparison of soil organic carbon, microbial diversity and enzyme activity of wetlands and rice paddies in Jingjiang area of Hubei, China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(18): 3 773-3 781. [靳振江, 邵继承, 潘根兴, 等. 荆江地区湿地与稻田有机碳, 微生物多样性及土壤酶活性的比较[J]. 中国农业科学, 2012, 45(18): 3 773-3 781.]
- [44] Liu D, Liu X, Liu Y, *et al.* Soil Organic Carbon (SOC) accumulation in rice paddies under long-term agro-ecosystem experiments in southern China-VI. Changes in microbial community structure and respiratory activity[J]. *Biogeosciences Discussions*, 2011, 8(1): 1 529-1 554.
- [45] Araújo A S F, Santos V B, Monteiro R T R. Responses of soil microbial biomass and activity for practices of organic and conventional farming systems in Piauí state, Brazil[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2008, 44(2): 225-230.
- [46] Liu Y, Zhou T, Crowley D, *et al.* Decline in topsoil microbial quotient, fungal abundance and C utilization efficiency of rice paddies under heavy metal pollution across South China [J]. *PloS One*, 2012, 7(6): e38858.
- [47] Ren Jingchen, Zhang Pingjiu, Pan Genxing, *et al.* Indices of eco-geochemical characteristics in a degradation-reclamation sequence of soils in Mountains Karst Area: A case study in Guanling-Zhenfeng region, Guizhou, China [J]. *Advances in Earth*

- Science*, 2006, 21(5): 504-512. [任京辰, 张平究, 潘根兴, 等. 岩溶土壤的生态地球化学特征及其指示意义[J]. 地球科学进展, 2006, 21(5): 504-512.]
- [48] Chen J, Liu X, Zheng J, *et al.* Biochar soil amendment increased bacterial but decreased fungal gene abundance with shifts in community structure in a slightly acid rice paddy from Southwest China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2013, 71: 33-44.
- [49] Chen J, Liu X, Li L, *et al.* Consistent increase in abundance and diversity but variable change in community composition of bacteria in topsoil of rice paddy under short term biochar treatment across three sites from South China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 91: 68-79.
- [50] Poeplau C, Kätterer T, Bolinder M A, *et al.* Low stabilization of aboveground crop residue carbon in sandy soils of Swedish long-term experiments[J]. *Geoderma*, 2015, 237: 246-255.
- [51] Kirkby C A, Richardson A E, Wade L J, *et al.* Nutrient availability limits carbon sequestration in arable soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 68: 402-409.
- [52] Pan G, Zhou P, Li Z, *et al.* Combined inorganic/organic fertilization enhances N efficiency and increases rice productivity through organic carbon accumulation in a rice paddy from the Tai Lake region, China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 131(3): 274-280.
- [53] Sun D Q, Jun M, Zhang W M, *et al.* Implication of temporal dynamics of microbial abundance and nutrients to soil fertility under biochar application-field experiments conducted in a brown soil cultivated with soybean, north China[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 518: 384-394.
- [54] Kimetu J M, Lehmann J, Ngoze S O, *et al.* Reversibility of soil productivity decline with organic matter of differing quality along a degradation gradient[J]. *Ecosystems*, 2008, 11(5): 726-739.
- [55] Reeves D W. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems[J]. *Soil and Tillage Research*, 1997, 43(1): 131-167.
- [56] Lal R. Soils and ecosystem services[M]//Buckingham, ed. *Ecosystem Services and Carbon Sequestration in the Biosphere*. Netherlands: Springer Netherlands, 2013: 11-38.
- [57] 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): 2 099-2 103.
- [58] Pulleman M M, Six J, Van Breemen N, *et al.* Soil organic matter distribution and microaggregate characteristics as affected by agricultural management and earthworm activity[J]. *European Journal of Soil Science*, 2005, 56(4): 453-467.
- [59] Kong A Y Y, Six J, Bryant D C, *et al.* The relationship between carbon input, aggregation, and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(4): 1 078-1 085.
- [60] Li L, Zhang X, Zhang P, *et al.* Variation of organic carbon and nitrogen in aggregate size fractions of a paddy soil under fertilisation practices from Tai Lake region, China[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2007, 87(6): 1 052-1 058.
- [61] Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles[J]. *Plant and Soil*, 1997, 191(1): 77-87.
- [62] Torn M S, Trumbore S E, Chadwick O A, *et al.* Mineral control of soil organic carbon storage and turnover[J]. *Nature*, 1997, 389(6 647): 170-173.
- [63] Powlson D S, Riche A B, Coleman K, *et al.* Carbon sequestration in European soils through straw incorporation: Limitations and alternatives[J]. *Waste Management*, 2008, 28(4): 741-746.
- [64] Wiesmeier M, Hübner R, Spörlin P, *et al.* Carbon sequestration potential of soils in southeast Germany derived from stable soil organic carbon saturation [J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(2): 653-665.
- [65] Hernandez-Soriano M C, Kerré B, Goos P, *et al.* Long-term effect of biochar on the stabilization of recent carbon: Soils with historical inputs of charcoal[J]. *GCB Bioenergy*, 2015, doi:10. 1111/gcbb. 12250.
- [66] Liang B, Lehmann J, Sohi S P, *et al.* Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil[J]. *Organic Geochemistry*, 2010, 41(2): 206-213.
- [67] Vogel C, Mueller C W, Höschen C, *et al.* Submicron structures provide preferential spots for carbon and nitrogen sequestration in soils[J]. *Nature Communications*, 2014, doi:10. 1038/ncomms394.
- [68] Lehmann J, Kinyangi J, Solomon D. Organic matter stabilization in soil microaggregates: Implications from spatial heterogeneity of organic carbon contents and carbon forms[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85(1): 45-57.
- [69] Lehmann J, Solomon D, Kinyangi J, *et al.* Spatial complexity of soil organic matter forms at nanometre scales[J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(4): 238-242.
- [70] Don A, Rödenbeck C, Gleixner G. Unexpected control of soil carbon turnover by soil carbon concentration[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2013, 11(4): 407-413.
- [71] Brussaard L. Biodiversity and ecosystem functioning in soil[J]. *Ambio*, 1997, 26(8): 563-570.
- [72] Rabbi S M F, Lockwood P V, Daniel H, *et al.* How do microaggregates stabilize soil organic matter? [C]//Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science: Soil Solutions for a Changing World, Brisbane, Australia, 1-6 August 2010. Congress Symposium 4: Greenhouse Gases from Soils. International Union of Soil Sciences (IUSS), C/O Institut für Bodenforschung, Universität für Bodenkultur, 2010: 109-112.
- [73] Huygens D, Deneff K, Vandeweyer R, *et al.* Do nitrogen isotope patterns reflect microbial colonization of soil organic matter fractions? [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2008, 44(7): 955-964.
- [74] Caldwell B A. Enzyme activities as a component of soil biodiversity: A review[J]. *Pedobiologia*, 2005, 49(6): 637-644.
- [75] Burns R G, DeForest J L, Marxsen J, *et al.* Soil enzymes in a

- changing environment: Current knowledge and future directions [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 58: 216-234.
- [76] Allison S D, Weintraub M N, Gartner T B, *et al.* Evolutionary-economic principles as regulators of soil enzyme production and ecosystem function[M]//Shukla G, Varma A, eds. *Soil Enzymology*. Herlin:Springer-Verlag, 2011: 229-243.
- [77] Stemmer M, Gerzabek M H, Kandeler E. Organic matter and enzyme activity in particle-size fractions of soils obtained after low-energy sonication[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(1): 9-17.
- [78] Stemmer M, Gerzabek M H, Kandeler E. Invertase and xylanase activity of bulk soil and particle-size fractions during maize straw decomposition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 31(1): 9-18.
- [79] Sessitsch A, Weilharter A, Gerzabek M H, *et al.* Microbial population structures in soil particle size fractions of a long-term fertilizer field experiment[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, 67(9): 4 215-4 224.
- [80] Smith A P, Marín-Spiotta E, de Graaff M A, *et al.* Microbial community structure varies across soil organic matter aggregate pools during tropical land cover change[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 77: 292-303.
- [81] Gong Zitong. *Soil Taxonomic Classification of China: Theory, Methodology and Applications* [M]. Beijing: Science Press, 1999. [龚子同. 中国土壤系统分类: 理论·方法·实践[M]. 北京: 科学出版社, 1999.]
- [82] Huang L M, Thompson A, Zhang G L, *et al.* The use of chronosequences in studies of paddy soil evolution: A review[J]. *Geoderma*, 2015, 237: 199-210.
- [83] Ling Qihong, Zhang Hongcheng, Huang Pisheng, *et al.* New nitrogen application regime on high-yielding rice[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39: 26-40. [凌启鸿, 张洪程, 黄丕生, 等. 水稻高产氮肥合理施用的运筹新探索[J]. 土壤学报, 2002, 39: 26-40.]
- [84] Cheng Kun, Pan Genxing, Li Lianqing, *et al.* Risk assessment of meteorological yield decline of dryland crops and paddy rice against climate change in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(9): 1 764-1 771. [程琨, 潘根兴, 李恋卿, 等. 中国稻作与旱作生产的气象减产风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1 764-1 771.]
- [85] Kögel-Knabner I, Amelung W, Cao Z, *et al.* Biogeochemistry of paddy soils[J]. *Geoderma*, 2010, 157(1): 1-14.
- [86] Schimel J. Global change: Rice, microbes and methane[J]. *Nature*, 2000, 403(6 768): 375-377.
- [87] Cheng Y Q, Yang L Z, Cao Z H, *et al.* Chronosequential changes of selected pedogenic properties in paddy soils as compared with non-paddy soils[J]. *Geoderma*, 2009, 151(1): 31-41.
- [88] Kalbitz K, Kaiser K, Fiedler S, *et al.* The carbon count of 2000 years of rice cultivation[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(4): 1 107-1 113.
- [89] Kölbl A, Schad P, Jahn R, *et al.* Accelerated soil formation due to paddy management on marshlands (Zhejiang Province, China) [J]. *Geoderma*, 2014, 228: 67-89.
- [90] Wissing L, Kölbl A, Vogelsang V, *et al.* Organic carbon accumulation in a 2000-year chronosequence of paddy soil evolution [J]. *Catena*, 2011, 87(3): 376-385.
- [91] Wissing L, Kölbl A, Schad P, *et al.* Organic carbon accumulation on soil mineral surfaces in paddy soils derived from tidal wetlands[J]. *Geoderma*, 2014, 228: 90-103.
- [92] Pan G, Li L, Wu L, *et al.* Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(1): 79-92.
- [93] Huang Y, Sun W. Changes in topsoil organic carbon of croplands in mainland China over the last two decades[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(15): 1 785-1 803.
- [94] Liu Shoulong, Tong Chengli, Zhang Wenju, *et al.* Simulation of carbon sequestration potential of paddy soils in Hu'nan Province, China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(1): 118-125. [刘守龙, 童成立, 张文菊, 等. 湖南省稻田表层土壤固碳潜力模拟研究[J]. 自然资源学报, 2006, 21(1): 118-125.]
- [95] Li Zhongpei, Wu Dafu. Organic C content at steady state and potential of C sequestration of paddy soils in subtropical China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1): 46-52. [李忠佩, 吴大付. 红壤水稻土有机碳库的平衡值确定及固碳潜力分析[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 46-52.]
- [96] Pan Genxing, Zhao Qiguo. Study on evolution of organic carbon stock in agricultural soils of China: Facing the challenge of global change and food security[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(4): 384-393. [潘根兴, 赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和国家安全[J]. 地球科学进展, 2005, 20(4): 384-393.]
- [97] Niu Wenjing, Li Lianqing, Pan Genxing, *et al.* Responses of enzyme activities in different particle-size aggregates of paddy soil in Taihu Lake region of China to long-term fertilization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(9): 2 181-2 816. [牛文静, 李恋卿, 潘根兴, 等. 太湖地区水稻土不同粒级团聚体中酶活性对长期施肥的响应[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2 181-2 816.]
- [98] Pan G, Li L, Zhang X, *et al.* Soil Organic Carbon, Sequestration Potential and the Co-Benefits in China's Cropland[M]//Lal R, Stewart B A, eds. *Principles of Soil Management*. Taylor and Francis (CRC), 2013.
- [99] Jastrow J D, Miller R M, Lussenhop J. Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(7): 905-916.

Soil Carbon Sequestration with Bioactivity: A New Emerging Frontier for Sustainable Soil Management

Pan Genxing, Lu Haifei, Li Lianqing, Zheng Jufeng, Zhang Xuhui, Cheng Kun,
Liu Xiaoyu, Bian Rongjun, Zheng Jinwei

(*Institute of Resource, Ecosystem and Environment of Agriculture, College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agriculture University, Nanjing 210095, China*)

Abstract: Soil carbon sequestration has been one of most important research frontiers of soil science for the last decade. However, carbon sequestration for sustainable management is being urged by both climate change mitigation and global soil degradation. In this review paper, the ecosystem functioning and ecological services of soil organic carbon were emphasized. Sequestration of organic carbon was in depth examined by linking to bioactivity and ecosystem functioning of soil. Current knowledge on variation of soil bioactivity with soil carbon sequestration was overviewed and synthesized, particularly at micro-scale of soil aggregates. Taking rice paddy soil as an example, co-evolution of microbial community and diversity, and soil functional activity with soil organic matter build-up at soil aggregates level was analyzed in terms of soil development. Furthermore, were highlighted the emerging issue on characterizing the coupling of bioactivity with carbon sequestration, the nature of sustainable soil carbon sequestration by means of micro-aggregate scale interaction of organic matter-microbe-enzyme activity, and the best management practices for attaining the sustainable carbon sequestration. All these issues could be pursued with the help of non-destructive soil aggregate fractionation and in situ microscale supermicroscopic observation technologies. Therefore, soil research on carbon sequestration versus bioactivity at microscale will enhance systematic understanding of ecosystem functioning and services provided by soil organic carbon, in order to provide sound knowledge base for rational organic matter management and sustainable carbon sequestration, and for policy making aiming at enhancing crop productivity and environmental services as well as climate change mitigation.

Key words: Carbon sequestration; Bioactivity; Ecosystem functioning; Aggregate; Benefits and services.