

稳定 ^{13}C 同位素示踪技术在农田土壤碳循环和团聚体固碳研究中的应用进展^①

金鑫鑫, 汪景宽*, 孙良杰, 王 帅, 裴久渤, 安婷婷,
丁 凡, 高晓丹, 徐英德

(沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866)

摘 要: 农田土壤有机碳库是全球碳循环的重要组成部分, 其积累和分解直接影响陆地生态系统碳贮藏与全球碳平衡。土壤团聚体是土壤结构的物质基础和土壤肥力的重要载体, 也是土壤有机碳的固定场所。稳定 ^{13}C 同位素示踪技术是研究土壤碳动态变化的有效手段, 能够揭示新输入碳在土壤及团聚体中赋存状态、周转过程以及微生物的调节机制。本文主要归纳与阐述了稳定 ^{13}C 同位素示踪技术在农田土壤有机碳循环及土壤团聚体固碳机理方面的研究进展, 提出 ^{13}C 同位素示踪技术在未来土壤碳循环和固碳机制方面的主要研究方向。

关键词: ^{13}C 稳定同位素; 有机碳; 土壤团聚体; 农田土壤

中图分类号: S124.2 **文献标识码:** A

目前, 全球各国都在探寻固碳减排的有效途径, 国际学术界在研究温带森林、湿地、草原和极地生态系统对增加土壤碳汇作用的同时, 越来越重视农业生态系统中的固碳作用^[1]。土壤有机碳库是陆地生态系统中最大的碳库, 其很小变化都会对大气中 CO_2 造成很大的影响, 因此土壤有机碳库对全球气候变化和碳循环起着非常重要的作用, 土壤有机碳固定机制也已成为陆地生态系统碳循环研究的热点问题。农田土壤碳循环的研究是预测未来大气 CO_2 浓度变化、认识大气圈与生物圈相互作用机制等科学问题的关键, 同时也是认识地球生态系统中能量平衡, 水分、养分循环以及生物多样性变化的基础。为此, 研究土壤有机碳循环和调控机理, 对于探求和建立适合我国国情的固碳途径以及农业可持续发展具有重要意义和应用价值。

同位素示踪技术是研究全球气候变化和土壤碳动态变化的有效手段, 同时也是揭示陆地生态系统碳氮循环过程的重要工具^[2]。土壤有机碳循环是一个动态变化的过程, 利用同位素技术能够示踪新输入碳在土壤中转化与赋存状态, 揭示其在土壤与微生物之间循环和周转过程及机理。20 世纪 70 年代以前, 有机

物在土壤中的周转研究通常采用同位素 ^{14}C 示踪技术^[3], 但由于同位素 ^{14}C 具有较强的放射性, 对长时间尺度的碳循环分析存在一定偏差, 无法阐明有机质的异质性^[4], 研究者们不得不放弃使用该技术。作为一种天然的示踪物, 稳定碳同位素 ^{13}C 没有放射性, 具有安全、无污染、易控制的优点, 20 世纪 80 年代以后逐渐被研究者采用, 已获得丰富的研究成果。

土壤团聚体是土壤结构的重要物质基础和肥力的重要载体, 土壤有机质和土壤团聚体结构之间的相互作用决定了土壤有机碳库的数量。土壤有机碳数量的增加必然减少 CO_2 的排放量, 同时促进土壤团聚体的形成并提高其稳定性^[5], 相反土壤团聚体对土壤有机碳的变化也有较大的调控作用^[6]。因此, 土壤团聚体对有机碳的固定与保护机制已成为土壤有机碳截获研究的热点问题之一。稳定的土壤结构能够保存且阻止土壤有机质的迅速分解, Golchin 等^[7]提出了微团聚体形成及其团聚体中有机碳固定的相关机制。目前, 国内关于土壤有机碳和土壤团聚体之间关系的研究主要集中在红壤、紫色土、褐土、黑土上^[8–9], 对于棕壤团聚体的组成及其各粒级有机碳组分转化的研究也有相关报道^[10–11]。土壤团聚体是有机碳固定

基金项目: 国家自然科学基金项目(31330011)资助。

* 通讯作者(j-kwang@163.com)

作者简介: 金鑫鑫(1987—), 女, 辽宁阜新人, 博士研究生, 主要从事土壤肥力与土壤生态方面研究。E-mail: jinxinxin0218@163.com

的主要场所,弄清团聚体中有机碳组分的形成和周转机制对于更好地理解碳固定机制至关重要,并且可以为进一步深入采用适当的农业管理措施来调控土壤有机碳的变化提供理论基础。

1 稳定 ^{13}C 同位素示踪技术在土壤有机碳循环研究中的应用

碳作为重要的生命元素,在自然界中主要以 ^{12}C 、 ^{13}C 和 ^{14}C 形式存在,其中 ^{12}C 和 ^{13}C 为稳定同位素, ^{14}C 为放射性同位素。 ^{12}C 和 ^{13}C 相对丰度分别为 98.89% 和 1.11%, ^{14}C 只有极微量 ($10^{-12}\%$)^[12]。稳定 ^{13}C 同位素技术克服了放射性同位素研究不足,具有无放射性、无辐射、安全、无污染、无衰变等优点,在土壤学研究中被广泛应用,被证明是一种研究土壤有机碳周转的较可靠的技术手段^[13]。国内外许多学者利用碳稳定同位素技术研究输入土壤的有机物质分解过程及土壤有机碳的动态变化过程^[14-15]。

1.1 明确新输入土壤有机碳的腐解过程及其在土壤中的赋存状态

土壤有机碳是维持陆地生态系统碳平衡、保证陆地生态环境的碳循环系统稳定的重要因素,而农作物和残留物的分解是作为土壤外源碳的主要来源^[16]。许多学者利用碳稳定同位素示踪技术研究输入土壤的有机物质分解过程及土壤有机碳的动态变化过程^[17-20]。作物残体腐解过程中产生的碳部分被矿化为 CO_2 , 还有部分被土壤中的微生物所同化,进而使微生物再分解产生碳的腐殖化和矿化,另外部分残体碳被认为直接并入土壤微生物量中^[21]。最初 Rochette 等^[22]利用土壤 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 定量玉米残茬的分解速率,后来研究者利用 ^{13}C 标记的水稻茎和根残茬分析了植物残茬分解对有机碳的影响机制^[23]。许多研究表明土壤有机碳分解受残茬类型的影响,土壤易分解的碳库受残茬分解尤其是在其迅速分解阶段的影响显著,秸秆残茬的分解比根残茬分解快,因此对土壤有机碳机制的短期影响比较显著。相关研究表明不同作物对红壤中有机碳的分解影响不同, C_4 作物能明显促进红壤中有机碳分解^[17]。

1.2 揭示了生态系统转变过程中土壤有机碳动态变化规律

随着稳定同位素示踪技术的发展,其在研究生态系统周转过程中土壤有机碳动态变化及迁移转换规律方面得到广泛的应用。林地变成玉米地后不仅使土壤中来源于 C_3 植被易矿化的土壤有机碳降解,而且使有机碳组分发生变化,粗砂中有机碳较新,而细砂

中有机碳较老,且轻组中有机碳活性较大,植物残茬首先进入的是轻组^[24]。传统耕作变成免耕后证实免耕可以减少土壤有机碳破坏,减慢土壤有机碳周转,增加土壤有机碳固定。窦森等^[18]应用 $\delta^{13}\text{C}$ 方法研究了玉米秸秆分解期间土壤有机碳的动态变化,结果发现新加入的玉米秸秆分解较快,原土壤有机碳分解速度较慢;在培养初期胡敏酸形成速度小于富里酸,随培养时间延长富里酸转化为胡敏酸或相互转化。整个培养过程中,不仅新加入的玉米秸秆,而且原来土壤中固有的有机碳都随着培养时间延长而分解,但后者分解速度较慢,说明短期培养条件下可以用 ^{13}C 方法研究新加入有机碳在土壤中的分解动力学。田秋香等^[25]研究了稳定性同位素技术在土壤重要有机组分循环转化研究中的应用,表明 ^{13}C 标记的时间越长,结果分析越准确。An 等^[19-20]利用 ^{13}C 同位素示踪标记技术研究了光合碳在植物和土壤中的分布与动态变化,以及东北黑土区不同肥力水平对外源 ^{13}C 标记的秸秆碳中微生物碳的影响,表明高肥力土壤具有较高微生物量活性,不同土壤类型和肥力水平对土壤有机碳的转化也有较为明显的影响^[26]。

1.3 初步揭示有机物腐解与团聚体稳定性之间的微生物调控机制

土壤微生物参与农田生态系统的物质循环和能量流动,其分解有机物质形成腐殖质并释放养分,又同化土壤碳素和固定无机营养形成生物量,对土壤团聚体的形成和稳定起着重要作用^[27]。微生物群落的组成和结构影响着有机物料的分解速率,其中细菌和真菌对有机物料的分解起到 90% 的作用^[28]。随着新鲜的作物残体进入土壤,土壤中微生物的分解产物或其本身导致粗团聚体内部颗粒有机质周围的大团聚体的形成。而粗团聚体内部颗粒有机质再进一步分解破碎,形成细团聚体内部颗粒有机质,之后其与微生物分泌物为核心被矿质颗粒包裹形成大团聚体内稳定的微团聚体^[29]。添加有机物可以提高土壤团聚体的稳定性,随着有机质含量的增加,土壤团聚体的稳定性显著增加^[30]。微生物在大小不同的团聚体内分布差异很大,并且其群落结构明显不同,大团聚体比小团聚体含有更多的微生物量,并且真菌生物量与大团聚体数量有显著的相关性。很多学者在土壤碳的微生物调控机制与分子结构水平上利用稳定同位素 ^{13}C 示踪技术^[31-35],获得一些较好的研究结果,但也遇到很大的挑战,尚不能很好地解释有机物腐解过程与团聚体生物稳定性之间的微生物调控机制。

2 稳定 ^{13}C 同位素在土壤团聚体固碳机理方面的应用

土壤团聚体的形成依赖于有机胶结剂的作用。人们根据形成团聚体胶结剂的类型,将团聚体分为大团聚体(Macroaggregates)和微团聚体(Microaggregates),并规定 $>250\ \mu\text{m}$ 的团聚体为大团聚体, $<250\ \mu\text{m}$ 的团聚体为微团聚体^[36]。表土中近90%的有机碳位于团聚体内,其中70%以上的土壤有机碳存在于 $<53\ \mu\text{m}$ 的微团聚体中^[37]。大团聚体有机碳含量高,一方面是由于有机质把微团聚体胶结成大团聚体,另一方面是大团聚体中处于不稳定状态的根系和菌丝可以增加其中有机碳的浓度^[35],因此关于土壤碳固定的微团聚体保护机制也成为目前的研究热点之一。

2.1 验证了土壤团聚体形成与发育模型

关于土壤团聚体形成机理的假说主要包括:Tisdall等^[36]提出的团聚体等级发育模型,Oades^[38]和Elliott^[39]提出的团聚体模型,Six等^[14]提出的涉及土壤团聚体和土壤有机碳的胚胎发育模型。近年来,对土壤团聚体内养分含量及动态变化的研究较多,特别是农业管理措施对土壤团聚体中有机碳影响的研究^[40-43]。大多数研究表明长期施肥能够对土壤养分的含量及动态平衡产生直接的作用,同时也对土壤团聚体稳定性产生重要影响^[44]。耕作措施被认为是破坏土壤团聚体结构和影响土壤有机碳变化的最主要人为因素之一。传统耕作如翻耕和旋耕一般会机械破坏土壤大团聚体,减少团聚体稳定胶结剂(菌丝体等)的形成,加快土壤有机碳的分解,减少土壤有机碳的含量。而保护性耕作可以减小土壤扰动,同时秸秆还田会改善土壤理化性质和养分状况,可提高作物产量和土壤固碳潜力^[45]。

2.2 揭示新老有机碳在土壤团聚体中的转化过程与赋存状态

近20年来,长期耕作造成土壤碳下降,土壤碳越来越受到全球的关注,提高土壤的固碳潜力对于减缓大气中的 CO_2 浓度具有非常重要和显著的影响^[10]。土壤有机碳主要来自植物残体,而不同的光合类型植物(C_3 和 C_4)具有不同的 ^{13}C 含量,进而形成具有 ^{13}C 差异的土壤有机碳,因此可以用于量化有机碳的周转及示踪土壤团聚体中有机碳的去向^[46]。Angers等^[46]示踪了 ^{13}C - ^{15}N 双标记的小麦秸秆分解过程中C和N在大团聚体和微团聚体中的去向,为大团聚体内微团聚体的形成提供了最有力的证据。后来许多研究人员提出了不同的概念模型,指出了土壤有机碳的作用,尤其是颗粒有机碳在大团聚体内微团聚体形成中的

作用。在前面研究的基础上,Six等^[14, 47-48]提出了一个概念模型,解释了耕作破坏对土壤团聚体中碳的影响机制。耕作导致富碳的大团聚体减少,贫碳的微团聚体增多,耕作对团聚体形成和土壤有机碳周转的影响主要经历如下几个过程^[14, 46-48]:随着新鲜的残茬作为微生物活动的碳源和微生物起源的胶结剂的产物进入土壤,形成大团聚体和粗团聚体内颗粒有机质(coarse iPOM);粗团聚体内颗粒有机质进一步分解破碎成细团聚体内颗粒有机质(fine iPOM),而fine iPOM比coarse iPOM老,因此fine iPOM浓度随着大团聚体的变老而增加;细团聚体内的颗粒有机物与微生物分泌物被矿物颗粒包裹形成大团聚体内稳定的微团聚体,同位素标记研究表明标记的碳从大团聚体重新分配到微团聚体^[46],说明微团聚体形成在大团聚体内;最后大团聚体胶结剂分解导致大团聚体稳定性降低,稳定的微团聚体释放,进入下一轮团聚体的循环。顾鑫^[11]利用 ^{13}C 示踪标记技术研究了新有机碳在棕壤团聚体有机碳组分中的转化情况,结果表明棕壤团聚体有机碳的平均驻留时间随着团聚体级别的减小而升高,说明新有机碳在微团聚体中的周转速率较慢。Li等^[10]利用标记 ^{13}C 玉米秸秆研究外源新碳在土壤团聚体内的分布和转化,发现秸秆碳随着培养时间的延长从大团聚体向微团聚体转移。

3 稳定 ^{13}C 示踪技术在土壤固碳潜力研究方面的应用

所谓固碳潜力,即土壤碳的饱和水平或土壤所容纳碳的最大能力。农田土壤固碳潜力是区域或国家农业土被的整体固碳能力^[49]。不同学者对土壤固碳潜力的定义不同,Six等^[50]认为从土壤本身属性的保护机制出发,把土壤固持碳的理论最大量称为固碳潜力;而Sperow等^[51]则综合考虑了气候和农业管理的交互作用,将未来气候变化条件下土壤的固碳空间视为固碳潜力;还有学者将最优农业管理措施下(如免耕、有机肥施用、灌溉、有机农业等)土壤的最大固碳量作为固碳潜力^[52-53]。土壤固碳潜力的研究对于制定相应的土地管理政策,促进土壤有机碳的减排增汇具有重要的意义,为此土壤固碳潜力的估算显得尤为重要。关于土壤固碳潜力的计量方法主要有包括土地利用方式对比法、长期定位试验结果外推法、历史观测数据比较法、土壤有机碳周转模型法^[54]。目前,国际上并没有把土壤固碳潜力的定义标准化。当前研究中的土壤固碳潜力,多指在未来气候变化背景和推荐的管理措施下,大气中 CO_2 被封存在土壤中的最大量。因此,土壤固碳潜力的估算被认为是估算不同

固碳背景下的土壤有机碳储量的增加量,与之相关的概念还包括土壤有机碳密度和土壤有机碳储量。

3.1 揭示土壤团聚体与有机碳保护之间关系

Campbell 等^[55]通过 30 年的长期定位研究发现,有机碳含量丰富的土壤其有机碳含量并不随碳的输入而增加,而是稳定在某一特定值上。Gulde 等^[56]进一步提出,土壤对有机碳的固定存在一个饱和值,达到饱和值时向土壤输入再多的碳,土壤有机碳含量也不会再增加。2007 年 Kool 等^[57]提出土壤碳饱和的等级模型,指出不同粒级的团聚体存在不同的碳饱和值,并且按照团聚体由小到大的顺序依次饱和。

土壤团聚体能够对有机碳进行保护而促进有机碳的稳定和累积^[44],团聚体储存有机碳组分和能力随着其粒径不同而变化^[58]。许多研究提出微团聚体在碳形成过程中起着保护作用^[14, 46-48]。Kong 等^[57]发现由于碳输入引起的大量的土壤有机碳积累,优先固定在大团聚体内微团聚体中,O'Brien 等^[59]利用 C₃ 和 C₄ 作物自然 ¹³C 丰度差异发现了微团聚体中有机碳形成时间早于大团聚体,因此大团聚体内的微团聚体是可持续发展农业碳固定潜力的一个理想指标。吕元春^[60]对外源新碳(¹³C 标记稻秆)在土壤不同团聚体中的分配研究结果表明,土壤有机碳含量在 0.25 ~ 2 mm 粒级有机碳含量占最大。

3.2 揭示农业管理措施与土壤固碳之间关系

目前对于影响土壤团聚体固碳的研究,主要集中在耕作条件、施肥制度以及种植方式等方面。不同土壤耕作方式和农业管理措施对农田土壤固碳的影响,主要是通过改变土壤团聚体的更新和转化过程,从而使土壤有机碳的物理保护机制发生变化。耕作活动为土壤有机碳的分解转化创造了有利条件,同时耕作强度的增加可以促进土壤有机碳的周转,减少土壤团聚作用的发生^[61]。Six 等^[62]对团聚体和有机碳的研究指出,耕作对土壤团聚体的影响主要发生在表层,免耕使土壤大团聚体的含量、总碳以及新有机碳含量均高于常规耕作。因此他提出适当减少耕作强度和免耕可以有效改善土壤结构,提高土壤的有机碳含量。为此,我国农业生产也开始提倡使用农肥和种植绿肥,主要是为了增加土壤的有机质,进而增加土壤水稳性团聚体的数量,长期冬季施用绿肥能增加 0.25 ~ 5 mm 水稳性团聚体的数量^[63]。种植方式对团聚体性质的影响是多方面的,豆科禾本科轮作能快速增加土壤有机碳含量,促进微团聚体的稳定和大团聚体的形成^[64]。玉米轮作对有机质及团聚体形成具有良好的作用^[65]。施肥处理可以增加土壤有机碳,有机碳的输入能促进土

壤大粒级团聚体含量增加,提高土壤固碳能力^[66-70]。

许多学者利用 ¹³C 稳定同位素对不同土地利用方式转变土壤中有机碳的形成分解和团聚体周转之间的关系进行了研究。Solomon 等^[71]发现森林土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 明显比耕地土壤低,森林的采伐和连续的耕地导致砂粒中森林起源的土壤有机碳含量下降,砂粒中土壤有机碳很容易分解,是一个对土地利用方式的改变导致土壤有机碳储量变化较敏感的指标。Lichter 等^[72]研究残茬不同管理方式对土壤团聚体内的碳氮含量的影响,结果发现与保留残茬的处理相比,去除残茬的处理大团聚体、微团聚体和大团聚体内的微团聚体的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著减少,仅保留 30% ~ 50% 有机残茬的处理与完全去除残茬的处理相比仍能改进土壤结构。黄山等^[73]结合 ¹³C 和土壤有机碳物理分组的方法研究了稻田土壤转变成旱田土壤后土壤有机碳及其组分的变化机制,结果发现稻田土壤转变成玉米地 19 年后土壤全量有机碳、氮,闭蓄态颗粒有机碳和矿物态有机碳含量都下降,而游离颗粒有机碳含量上升。土地复垦后种植 C₃ 植被,随着开垦年限的增加 $\delta^{13}\text{C}$ 显著降低,团聚体碳中超过 50% 的碳来自于新碳,大团聚化作用的增加和大团聚体内的微团聚体有机质积累速率较快,说明经过一段时间复垦后土壤结构恢复到原来土壤状态。

3.3 建立土壤有机碳饱和值预测模型

土壤碳饱和的等级性为土壤固碳潜力的研究提供了一个重要契机。为此,相关学者提出了预测土壤碳饱和容量的经验公式和参数指标,用来估算指定区域和管理措施条件下的土壤碳饱和亏缺程度。目前,国际上估算土壤固碳潜力主要采用 Century、DNDC、Roth-C 和 EPIC 等机理模型。West 和 Six^[74]指出,土壤对有机碳的固持在远离其饱和点时,一级动力学方程能较好地模拟有机碳的变化,而接近饱和时,渐近线方程则更为恰当。国内学者韩冰等^[78]利用 DNDC 模型对我国分省农田土壤碳库的饱和水平进行了估算,同时对不同地区的农田土壤固碳潜力的差异性进行了分析。在农田尺度上,一些学者研究发现,虽然长期施肥后的整土有机碳含量仍继续增加,但在一些较稳定的碳库组分呈现出碳饱和的迹象^[75-78]。总而言之,我国农田固碳潜力的研究大都集中在宏观尺度上(如地块或区域),而在微观尺度上的土壤固碳潜力与碳饱和机理方面还缺少系统的研究,需要在今后进一步加强。

综上所述,耕作制度与管理措施改变了土壤的环境和团聚化作用,影响了土壤有机碳在团聚体中的累

积及分布情况,从而影响了土壤团聚体结构的发展及土壤肥力的稳定与提升,反过来良好的土壤团聚结构将有助于稳定和提升土壤肥力、固持土壤有机碳、扩大土壤碳汇。因此需要进一步利用稳定 ^{13}C 示踪技术研究土壤有机碳在团聚体中的固定机理,以及在农田尺度上的固碳潜力。

4 问题与展望

稳定同位素的方法在农田土壤碳循环以及团聚体研究中的应用是一个随着技术逐渐发展的过程。在土壤有机物质转移、有机碳周转方面,人们越来越多地利用稳定 ^{13}C 同位素示踪技术。但总体来说,稳定 ^{13}C 同位素的方法在农田土壤碳循环以及团聚体研究中的应用仍存在许多问题和不足。首先是稳定 ^{13}C 同位素本身价格不低;其次是 ^{13}C 标记的有机物料很难制备与获取;再次是检测必须的同位素比例质谱不仅价格昂贵,而且运行成本高,并且有时难以达到精度要求,在一定程度上限制了该技术的推广应用。虽然稳定 ^{13}C 同位素技术已在土壤有机质的转化等方面得到了较为广泛的应用,然而关于土壤微生物结构、数量与农田土壤碳循环及团聚体固碳之间的关系尚不清楚。因此,通过稳定 ^{13}C 同位素示踪结合微生物分子生物学技术来探讨农田土壤碳循环和团聚体固碳机理仍然是今后有效的研究手段。

参考文献:

- [1] 潘根兴,李恋卿,张旭辉. 土壤有机碳库与全球变化研究的若干前沿问题: 兼开展中国水稻土有机碳固定研究的建议[J]. 南京农业大学学报, 2002, 25(3): 100-109
- [2] 葛源,贺纪正,郑袁明,等. 稳定同位素探测技术在微生物生态学中的应用[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1574-1582
- [3] Koarashi J, Hockaday W C, Masiello C A, et al. Dynamics of decadal cycling carbon in subsurface soils[J]. Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 2012, 117(G3): 143-157
- [4] 于贵瑞,王绍强,陈泮勤,等. 碳同位素技术在土壤碳循环研究中的应用[J]. 地球科学进展, 2005, 20(5): 568-577
- [5] Six J, Paustian K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 68: A4-A9
- [6] 任镇江,罗友进,魏朝福. 农田土壤团聚体研究进展[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(2): 1101-1105
- [7] Golchin A, Oades J M, Skjemstad J O, et al. Soil structure and carbon cycling[J]. Australian Journal of Soil Research, 1994, 32: 1043-1068
- [8] 李丛,汪景宽. 长期地膜覆盖及不同施肥处理对棕壤有机碳和全氮的影响[J]. 辽宁农业科学, 2005(6): 8-10
- [9] 周萍,宋国菡,潘根兴,等. 南方三种典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究[J]. 土壤学报, 2008, (45): 1063-1071
- [10] Li S Y, Gu X, Zhuang J, et al. Distribution and storage of crop residue carbon in aggregates and its contribution to organic carbon of soil with low fertility[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 155: 199-206
- [11] 顾鑫. 新加入有机碳在棕壤不同团聚体中分配与周转规律的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2014
- [12] Staddon P L. Carbon isotopes in functional soil ecology[J]. Trends in Ecology and Evolution, 2004, 19(3): 148-154
- [13] 刘微,吕豪豪,陈英旭,等. 稳定碳同位素技术在土壤-植物系统碳循环中的应用[J]. 应用生态学报, 2008, 19(3): 674-680
- [14] 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
- [15] Urbanek E, Smucker A J M, Horn R. Total and fresh organic carbon distribution in aggregate size classes and single aggregate regions using natural $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ tracer[J]. Geoderma, 2011, 164: 164-171
- [16] 张国盛,黄高宝,Chan Y. 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
- [17] 尹云峰,蔡祖聪. 利用 $\delta^{13}\text{C}$ 方法研究添加玉米秸秆下红壤总有机碳和重组有机碳的分解速率[J]. 土壤学报, 2007, 44(6): 1022-1027
- [18] 奚森,张晋京, Lichtfouse E, 等. 用 $\delta^{13}\text{C}$ 方法研究玉米秸秆分解期间土壤有机质数量动态变化[J]. 土壤学报, 2003, 40(3): 328-334
- [19] An T T, Schaeffer S, Li S Y, et al. Carbon fluxes from plant to soil and dynamics of microbial immobilization under plastic mulching and fertilizer application using ^{13}C pulse-labeling[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 80: 53-61
- [20] An T T, Schaeffer S, Zhuang J, et al. Dynamics and distribution of ^{13}C -labeled straw carbon by microorganisms as affected by soil fertility levels in the Black Soil region of Northeast China[J]. Biology and Fertility of Soils, 2015, 51: 605-613
- [21] Khalil M I, Hossaina M B, Schmidhalter U. Carbon and nitrogen mineralization in different upland soils of the subtropics treated with organic materials[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37: 1507-1518
- [22] Rochette P, Angers D A, Flanagan L B. Maize residue decomposition measurement using soil surface carbon dioxide fluxes and natural abundance of carbon-13[J]. Soil Science Society of America Journal, 63(5): 1385-1396
- [23] 尹云锋,杨玉盛,高人,等. 植物富集 ^{13}C 标记技术的初步研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 790-793
- [24] 刘启明,王世杰,朴河春,等. 稳定碳同位素示踪农林生态转换系统中土壤有机质的含量变化[J]. 环境科学, 2002, 23(3): 75-78
- [25] 田秋香,张威,闫颖,等. 稳定性同位素技术在土壤重要有机组分循环转化研究中的应用[J]. 土壤, 2011, 43(6): 862-869

- [26] Pei J B, Li H, Li S Y, et al. Dynamics of maize carbon contribution to soil organic carbon in association with soil type and fertility level[J]. *PLoS ONE*, 2015, DOI:10.1371/journal.pone.0120825
- [27] Feng Y, Motta A C, Reeves D W, et al. Soil microbial communities under conventional-till and no-till continuous cotton systems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35: 693–703
- [28] McGuire K, Treseder K K. Microbial communities and their relevance for ecosystem models: Decomposition as a case study[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42: 529–535
- [29] 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: 7–31
- [30] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 1995, 46: 449–459
- [31] Berhe A A, Harden J W, Torn M S, et al. Persistence of soil organic matter in eroding versus depositional landform positions[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2012, 117: 2005–2012
- [32] Berhe A A, Kleber M. Erosion, deposition, and the persistence of soil organic matter: Mechanistic considerations and problems with terminology[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, 38: 908–912
- [33] Basile-Doelsch I, Balesdent J, Rose J. Are interactions between organic compounds and nanoscale weathering minerals the key drivers of carbon storage in soils?[J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 49: 3997–3998
- [34] Fang Y, Singh B, Singh B P. Effect of temperature on biochar priming effects and its stability in soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 80: 136–145
- [35] O'Rourke S, Angers D, Holden N, et al. Soil organic carbon across scales[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21: 3561–3574
- [36] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141–163
- [37] 张曼夏, 季猛, 李伟, 等. 土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其结合有机碳的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2013, 19(4): 598–604
- [38] Oades J M. Soil organic-matter and structural stability mechanisms and implications for management[J]. *Plant and Soil*, 1984, 76: 319–337
- [39] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50: 627–633
- [40] Hernández-Hernández R M, López-Hernández D. Microbial biomass, mineral nitrogen and carbon content in savanna soil aggregates under conventional and no-tillage[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34: 1563–1570
- [41] Mikha M M, Rice C W. Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68: 809–816
- [42] 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: 1078–1085
- [43] Sainju U M, Caesar-Ton T C, Jabro J D. Carbon and nitrogen fractions in dryland soil aggregates affected by long-term tillage and cropping sequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73: 1488–1495
- [44] Meng Q F, Sun Y T, Zhao J, et al. Distribution of carbon and nitrogen in water-stable aggregates and soil stability under long-term manure application in solonchic soils of the Songnen plain, northeast China[J]. *Journal of Soils Sediments*, 2014, DOI 10.1007/s11368-014-0859-7
- [45] Curaqueo G, Barea J M, Acevedo E, et al. Effects of different tillage system on arbuscular mycorrhizal fungal propagules and physical properties in a Mediterranean agroecosystem in central Chile[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 113(1): 11–18
- [46] 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]. *European Journal of Soil Biology*, 1997, 48: 295–300
- [47] Six J, Elliott E T, Combrink C. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 2000, 64: 681–689
- [48] 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, 64: 681–689
- [49] 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
- [50] 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
- [51] Sperow M, Eve M, Paustian K. Potential soil C sequestration on US agricultural soils[J]. *Climatic Change*, 2003, 57(3): 319–339
- [52] Lal R. Carbon management in agricultural soils[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2007, 12: 303–322
- [53] Smith P. Carbon sequestration in croplands: The potential in Europe and the global context[J]. *Europe Agronomy*, 2004, 20: 229–236
- [54] 孙文娟, 黄耀, 张稳, 等. 农田土壤固碳潜力研究的关键科学问题[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(9): 996–1004
- [55] Campbell C A, Bowren K E, Schnitzer M, et al. Effect of crop rotations and fertilization on soil organic matter and some biochemical properties of a thick Black Chernozem[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1991, 71: 377–387

- [56] Gulde S, Chung H, Amelung W, et al. Soil carbon saturation controls labile and stable carbon pool dynamics[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 72(3): 605–612
- [57] Kool D M, Chung H, Tate K R, et al. Hierarchical saturation of soil carbon pools near a natural CO_2 spring[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(6): 1282–1293
- [58] 李鉴霖. 缙云山土地利用方式对土壤团聚体及其碳氮的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2014: 1–7
- [59] O' Brien S L, Jastrow J D, McFarlane K J, et al. Decadal cycling within long-lived carbon pools revealed by dual isotopic analysis of mineral-associated soil organic matter[J]. *Biogeochemistry*, 2013, 112 (1–3): 111–125
- [60] 吕元春. 外源新碳在土壤不同团聚体中的分配研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2013
- [61] 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
- [62] 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
- [63] Yang Z P, Xu M G, Zheng S X, et al. Effects of long-term winter planted green manure on physical properties of reddish paddy soil under a doublerice cropping system[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11: 655–664
- [64] 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
- [65] 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
- [66] 陈建国, 田大伦, 闫文德, 等. 土壤团聚体固碳研究进展[J]. *中南科技大学学报*, 2011, 31(5): 75–80
- [67] 孙玉桃, 廖育林, 郑圣先, 等. 长期施肥对双季稻种植下土壤有机碳库和固碳量的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(3): 732–740
- [68] 罗璐, 周萍, 董成立, 等. 长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究[J]. *环境科学*, 2013, 34(2): 692–697
- [69] Zhou Z C, Gan Z T, Zhouping S G, et al. Effects of long-term repeated mineral and organic fertilizer applications on soil organic carbon and total nitrogen in a semi-arid cropland[J]. *European Journal of Agronomy*, 2013, 45: 20–26
- [70] Brar B S, Singh K, Dheri G S, et al. Carbon sequestration and soil carbon pools in a rice-wheat cropping system: Effect of long-term use of inorganic fertilizers and organic manure[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 128: 30–36
- [71] Solomon D, Fritzsche F, Lehmann J, et al. Soil organic matter dynamics in the subhumid agroecosystems of the ethiopian highlands[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(3): 969–978
- [72] Lichter K, Govaerts B, Six J, et al. Aggregation and C and N contents of soil organic matter fractions in a permanent raised-bed planting system in the Highlands of Central Mexico[J]. *Plant and Soil*, 2008, 305: 237–252
- [73] 黄山, 芮雯奕, 彭现宪. 稻田转变为旱地土壤有机碳含量及其组分的变化特征[J]. *环境科学*, 2009, 30(4): 1146–1151
- [74] West T O, Six J. Considering the influence of sequestration duration and carbon saturation on estimates of soil carbon capacity[J]. *Climatic Change*, 2007, 80(1–2): 25–41
- [75] Sun Y, Huang S, Yu X, et al. Stability and saturation of soil organic carbon in rice fields: Evidence from a long-term fertilization experiment in subtropical China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(8): 1327–1334
- [76] Du Z, Wu W, Zhang Q, et al. Long-term manure amendments enhance soil aggregation and carbon saturation of stable pools in north China Plain[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(10): 2276–2285
- [77] 邱佳颖, 刘小粉, 杜章留, 等. 长期施肥对红壤性水稻土团聚体稳定性及固碳特征的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(10): 1129–1138
- [78] 韩冰, 王效科, 欧阳志云. 中国农田生态系统土壤碳库的饱和水平及其固碳潜力[J]. *农村生态环境*, 2005, 21(4): 6–11

Progress of Carbon Cycle in Farmland and Sequestration in Soil Aggregates Revealed by Stable ^{13}C Isotope

JIN Xinxin, WANG Jingkuan*, SUN Liangjie, WANG Shuai, PEI Jiubo, An Tingting,
DING Fan, GAO Xiaodan, XU Yingde

(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: Soil organic carbon (SOC) pool in farmland is an important component of the global carbon cycle. Changes of the accumulation and decomposition of SOC are directly related to the carbon storage in terrestrial ecosystems and to the global carbon balance. Soil aggregate is an essential material foundation of soil structure, an important carrier of soil fertility, and also the core of all carbon sequestration. Stable ^{13}C isotope technique is a powerful tool to study the dynamic changes of soil carbon cycle and the roles of soil microorganism in the process of organic carbon turnover. This paper mainly described the research advances of organic carbon cycle the mechanism of carbon sequestration in soil aggregate revealed by ^{13}C stable isotope technology, and briefly proposed the key research contents in the coming future.

Key words: ^{13}C stable isotope; Organic carbon; Soil aggregate; Farmland