

不同农田管理措施下土壤有机碳及其组分研究进展

梁贻仓 (西北大学城市与环境学院, 陕西西安 710127)

摘要 概述了农田生态系统下土壤有机碳的分组方法, 包括物理、化学和生物分组, 并分别从施肥、耕作、覆盖、秸秆还田、降水和灌溉以及轮作等农田管理措施方面探讨了不同管理措施对土壤有机碳及其组分的影响。

关键词 土壤有机碳; 有机碳分组; 农田管理措施

中图分类号 S153.6 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2013)24-09964-03

Research Advances in Soil Organic Carbon and Its Fractions under Different Farmland Management Method

LIANG Yi-cang (College of Urban and Environment Science, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127)

Abstract The fractionation methods of soil organic carbon, including physical, chemical and biology separation under farmland ecosystem were reviewed. Then the effects of different farmland management methods on soil organic carbon and its fractions were discussed from aspects of fertilizing pattern, tillage, mulching, straw turnover, rainfall, irrigation and rotation.

Key words Soil organic carbon; Fractionation methods of soil organic carbon; Farmland management method

在过去的一个世纪, 化石燃料的燃烧和土地利用变化等人类活动导致大气中 CO_2 浓度的增加^[1], 相比工业化以前, 大气中 CO_2 浓度的增加超过了 35%, 大大影响了全球气候^[2], 因而大气中 CO_2 浓度的变化已成为国内外研究的热点问题。自 2009 年哥本哈根气候变化峰会召开以来, 碳排放问题更成为学者们研究的焦点。土壤是全球仅次于海洋的第二大有机碳库, 从 19 世纪 50 年代到 21 世纪土壤有机质库中碳的排放量达到了 $(78 \pm 12) \text{Gt}$ ^[3], 因此土壤有机碳(SOC)的损失与固定已成为人类共同关注的热点问题和面临的最为严峻的挑战之一^[4]。农田生态系统中的碳库是全球碳库的重要组成部分, 全球农田土壤面积达 17 亿 hm^2 , 碳储量约为 170 Pg (1Pg = 1 015 g), 超过全球陆地碳贮量的 10%^[5]。农田土壤碳库也是最活跃的部分, 农田生态系统土壤有机碳的动态关系到土壤质量、陆地碳循环和全球气候变化等重大问题。农田土壤有机碳作为土壤养分的重要指标, 直接关系到作物生长, 并且以 CO_2 的形式释放到大气中, 影响着气候变化, 因此对土壤有机碳的研究具有重要的意义。

1 土壤有机碳分组研究进展

当前, 对于土壤有机碳的稳定机制以及如何长期保持土壤中的碳还没有得到很好的理解^[6]。理解土壤有机碳稳定机制的一个重要挑战就是如何将不同稳定性的有机碳组分有效地分离开来^[7]。目前, 虽然关于有机碳组分的研究方法不同, 但是概括起来可以分为物理方法、化学方法、生物方法 3 种。

1.1 物理方法 物理方法可以分为密度分组和颗粒大小分组。密度分组是采用一定相对密度的溶液将土壤中相对密度较低的游离态有机物质和相对密度较高的有机无机复合体分离开来的过程, 其中相对密度较低的游离态有机物称为轻组有机碳(LFOC), 相对密度较高的有机物称为重组有机碳(HFOC)^[8], 轻组有机碳转换速度快, 是有机碳的重要指

标, 但是轻组中包含大量的木炭和烧焦物质。

按与有机碳结合的土粒大小, 可分为黏粒($< 2 \mu\text{m}$)、粉粒($2 \sim 20 \mu\text{m}$)、砂粒($20 \sim 2\,000 \mu\text{m}$), 有时还区分出细黏粒($< 0.2 \mu\text{m}$)^[9]。大多数研究者将其中与砂粒结合的有机碳($53 \sim 2\,000 \mu\text{m}$)称为颗粒有机碳(POC), 这种方法操作简单, 但是对土壤的样品处理存在争议, 其中活性组分易受到环境的影响, 所以不同处理方法存在差异^[8]。

1.2 化学方法 按化学方法可分为溶解性有机碳(DOC)、酸水解有机碳、易氧化有机碳。溶解性有机碳指各种提取液提取后能够通过 $0.4 \sim 0.6 \mu\text{m}$ 孔径滤膜的土壤有机碳^[10]。由于提取过程中土壤结构受到破坏, 溶解性有机碳包含了其他成分的溶解性有机碳, 如大空隙和部分小空隙中的溶解性有机碳、活细胞的裂解物以及从矿质解吸下来的有机碳^[10]。经酸水解作用之后的有机碳可分为活性有机碳和惰性有机碳。酸水解成分大部分是蛋白质、核酸和多糖, 未水解成分主要是木质素、脂肪、蜡、树脂和软木脂等^[10]。酸水解同时可将参与微团聚化的多价阳离子除去, 使得复合体或闭蓄态中的有机碳溶解。有机质中易氧化的部分是土壤有机碳中不稳定的部分, 其周转时间较短, 是植物营养的主要来源, 被称为土壤活性有机碳, 可采用高锰酸钾、高能紫外线、过氧化氢、过硫酸钠、次氯酸钠等对有机碳进行氧化。这一活性指标对衡量土壤有机质的敏感性要优于其他农业变量, 可以指示土壤有机质的早期变化^[11]。易氧化碳的测定较迅速, 克服了测定微生物量需要做培养试验而且极易受环境因子影响的缺点。该方法简单, 适于大批量样品的测定, 但是仪器昂贵, 对实验器皿清洁度和操作技术要求较高^[8]。

1.3 生物方法 按生物方法可将土壤有机碳分为微生物量碳和潜在矿化碳(PCM)。土壤微生物量碳是指土壤中活的细菌、真菌、藻类和土壤微动物体内所含的碳, 通常采用氯仿熏蒸提取法或氯仿熏蒸培养法来测定。但是, 这种方法受环境变化的影响大, 而且培养周期较长。潜在矿化碳又被称为生物可降解碳或生理生态指数(专性呼吸率、代谢呼吸率)^[8, 10-11]。该方法可以用于广泛地评估土壤微生物活性, 但是培养要求密闭条件好, 而且受温湿度影响较大, 稍不严

格就会带来较大偏差,甚至失败^[8]。

2 不同管理措施对土壤有机碳及其组分的影响

目前,关于农田管理措施主要包括施肥(N、P、K、有机肥)^[12-14]、耕作方式(免耕、翻耕、旋耕、浅耕、耙耕等)^[15-16]、覆盖(秸秆、地膜)^[17-19]、秸秆还田^[20-21]、灌溉^[22-23]、轮作^[24-28]等方面。

2.1 施肥对土壤有机碳及其组分的影响 关于施肥对土壤有机碳影响的研究较多。大多研究表明,无机肥均衡混施并结合有机肥可以更加有效地提高土壤有机碳含量^[13-14,29-32]。周正朝等^[29]在长武国家农业生态实验站冬小麦系统的研究表明,26年的耕作施肥后表层(0~30 cm)土壤有机碳含量提高,尤其是氮磷肥配施粪肥效果更好,并且施用粪肥处理的土壤有机碳含量高于不施粪肥处理。Brar等^[31]在印度旁遮普省的水稻-小麦轮作系统的研究表明,氮磷钾肥结合有机肥配施土壤有机碳、活性有机碳含量显著高于其他施肥和不施肥处理,均衡施肥显著提高土壤水溶性有机碳含量。佟小刚等^[30]在河南郑州国家潮土肥力与肥料效益长期监测试验站的研究表明,长期有机无机肥配施或秸秆还田是提升潮土不同组分有机碳库较好的施肥模式。王玲莉等^[33]在棕壤长期肥料定位实验站的研究表明,长期单施化肥降低了土壤游离态颗粒有机碳含量,长期施用有机肥和有机肥配施化肥使得土壤的游离态颗粒有机碳、闭蓄态颗粒有机碳、矿物结合态有机碳以及总有机碳含量显著提高,且效果优于单施化肥。可见,均衡施肥并结合有机肥的使用是提高土壤有机碳含量的有效途径,对于保持土壤肥力有着重要作用。无机肥均衡施用并结合有机肥能够提高有机碳及其组分含量,主要是由于均衡施肥,作物能够得到各种养分,提高了作物的生物量,增加了土壤有机碳含量,而有机肥由于本身含有有机碳,向土壤中直接输入有机碳^[30],也使得微生物所需的养分得到满足。

2.2 耕作方式对土壤有机碳及其组分的影响 免耕可以减少对土壤的干扰,减少水土流失,降低农业生产成本。在不同耕作方式对土壤有机碳影响的研究中,免耕相对传统耕作可以提高土壤有机碳含量^[34-36]。例如,Mishra等^[34]在美国俄亥俄州的玉米田的长期试验表明,免耕可以减缓土壤有机碳的分解,提高土壤碳的固定,随着免耕年限的增加有机碳含量增加,在免耕条件下土壤有机碳积累量和速率受土壤类型、作物残根、秸秆的数量和质量以及免耕持续时间的影响。宋明伟等^[37]在甘肃中部干旱半干旱农业区的研究表明,免耕结合秸秆覆盖更能有效地提高土壤有机碳和微生物量碳的含量。Nascente等^[17]在巴西圣安东尼奥的研究表明,相对于传统耕作,免耕系统含有更高的自由态轻组有机碳和闭蓄态轻组有机碳。张四伟等^[38]在江苏扬中市的研究表明,旋耕结合稻麦秸秆还田可以提高土壤总有机碳含量,而翻耕结合稻麦秸秆还田可以提高土壤微生物量碳含量。在众多的耕作方式中,免耕是最常见的保护性耕作方式,对于保持和提高土壤有机碳及其活性组分具有重要意义。

2.3 覆盖方式对土壤有机碳及其组分的影响 地表覆盖作

为秸秆还田的一种重要方式对于保持土壤水分有着重要意义,所以地表覆盖措施主要应用于降水较少的半湿润半干旱、半干旱和干旱区。众多研究表明,秸秆覆盖能够提高土壤有机碳含量^[15,18,39],而地膜覆盖降低了土壤有机碳含量^[40]。蔡太义等^[18]在陕西合阳县西北农林科技大学旱农基地春玉米田的试验表明,随着秸秆覆盖年限的延长,土壤有机碳和轻组有机碳的含量呈增加趋势。崔凤娟等^[39]研究表明,与传统耕作相比,免耕秸秆覆盖处理显著提高土壤总有机碳、可溶性碳、微生物量碳、易氧化碳的含量及土壤碳库各项指数。崔志强等^[41]在沈阳农业大学棕壤长期定位实验站玉米田的试验表明,长期地膜覆盖使得表层土壤活性有机碳含量显著增加,而对深层影响不显著。秸秆覆盖提高了土壤有机碳及其组分含量,主要是因为秸秆覆盖增加了土壤有机质的输入^[42]。秸秆覆盖后秸秆的分解会增加土壤中碳源,改变土壤理化性质,增加土壤微生物数量,促进土壤有机质积累,提高土壤矿质养分的生物有效性,储存大量易分解的糖类和蛋白质等有机物质,为微生物提供较多的养分,导致微生物活动剧烈^[21]。另外,秸秆的稳温、保湿效应为微生物提供了良好的场所^[40],从而有效地分解进入土壤的有机物。地膜覆盖提高了地温与土壤含水量,加快了秸秆的分解,促进了秸秆中有效养分的释放^[43]。

2.4 秸秆还田对土壤有机碳及其组分的影响 由于秸秆还田方式较多,包括堆沤还田、过腹还田、秸秆直接还田等,其中直接还田包括秸秆覆盖还田和翻压还田,覆盖还田与其他还田方式有不同的效应,所以这里将讨论覆盖之外的还田方式。有研究表明,秸秆还田提高了土壤有机碳和活性有机碳的含量,土壤碳的矿化速率和累计矿化量随秸秆覆盖量的增加而增加^[21]。郑立臣等^[20]研究表明,秸秆还田能够增加土壤有机质的含量,影响土壤中水溶性有机碳和热水溶性有机碳的含量。秸秆粉碎还田以及堆沤还田、过腹还田能够使秸秆和土壤充分接触,土壤微生物对秸秆的腐殖化作用要比覆盖还田强,土壤中腐殖质的积累加快,溶解性腐殖质的含量也增多。因此,这种覆盖方式的应用范围更加广泛,对于提高土壤养分具有更重要的意义。

2.5 降水、灌溉对土壤有机碳及其组分的影响 降水的干湿交替会刺激土壤碳矿化过程,导致土壤CO₂释放量增加。灌溉对土壤肥力、盐分、作物长势及产量都有重要影响。Jin等^[22]研究表明,在坡度为9°、降水强度为85和105 mm/h的条件下,秸秆覆盖量越少,降雨强度越大,土壤有机碳流失越多。王娇等^[23]研究了不同灌溉方式下土壤有机碳的变化,发现有机碳矿化率滴灌>沟灌>渗灌,滴灌与渗灌处理的活性有机质含量变化趋势相似,沟灌则与滴灌渗灌有较大差异。

2.6 轮作对土壤有机碳及其组分的影响 单一的作物种植会使得土壤的理化性质退化,并且土地利用效率较低,所以轮作制度是较常见的耕作方式。党廷辉等^[25-27]研究表明,有豆科作物(或牧草)的轮作系统土壤有机碳及其组分含量会高于小麦连作系统。这是因为轮作增加了农田生态系统

时间序列上的生物多样性,从而改变了输入土壤的有机成分、微生物种类以及碳分解与转化的生物过程。豆类在作物系统中的作用主要是改善了土壤的物理结构以及对更多水分的储存。在苜蓿轮作系统中,由于其生长期较长,地上部分产量提高后会促进较多的苜蓿根系残留物以及苜蓿根系分泌物进入土壤,促进土壤微生物生物量的增加^[44]。

3 结语

以前对土壤有机碳的研究主要集中在对土壤肥力的影响,今后应加强以下方面的研究:①在全球气候变化的大背景下,将土壤有机碳与温室气体排放相结合开展研究,为减少碳排放提供科学依据;②目前关于土壤有机碳的研究很多,但是对于土壤有机碳的稳定机制还存在较大分歧,尤其是在不同措施下深层次的影响机制还有更大的空间进行研究,许多结果的定性讨论更多,而缺乏对结果的定量讨论;③关于降水对土壤有机碳的影响机理还有待进一步探讨,尤其是不同降水模式下土壤有机碳含量随时间的动态变化情况。

参考文献

- [1] POLL C, MARHAN S, BACK F, et al. Field-scale manipulation of soil temperature and precipitation change soil CO₂ flux in a temperate agricultural ecosystem[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 165: 88–97.
- [2] SOLOMON S, QIN D, MANNING M, et al. Climate Change 2007: The Physical Science. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge, U.K. and New York, NY, USA, 2007.
- [3] LAL R. Challenges and opportunities in soil organic matter research[J]. *European Journal of Soil Science*, 2009, 60: 158–169.
- [4] ROSENZWEIG C, HILLEL D. Soils and global climate change: Challenges and opportunities[J]. *Soil Science*, 2000, 165(47): 256.
- [5] 杨景成, 韩兴国, 黄建辉, 等. 土壤有机质对农田管理措施的动态响应[J]. *生态学报*, 2003, 23(4): 787–796.
- [6] VON LÜTZOW M, KÖGELKNABNER I, EKSCHEMITT K, et al. SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(9): 2183–2207.
- [7] JAGADAMMA S, LAL R. Integrating physical and chemical methods for isolating stable soil organic carbon[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3/4): 322–330.
- [8] 杨丽霞, 潘剑君. 土壤活性有机碳库测定方法研究进展[J]. *土壤通报*, 2004, 35(4): 502–506.
- [9] 森森. 土壤有机质[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [10] 张国, 曹志平, 胡娟娟. 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.
- [11] 王晶, 解宏图, 朱平, 等. 土壤活性有机质(碳)的内涵和现代分析方法概述[J]. *生态学杂志*, 2003, 22(6): 109–112.
- [12] HUANG S, PENG X, HUANG Q, et al. Soil aggregation and organic carbon fractions affected by long-term fertilization in a red soil of subtropical China[J]. *Geoderma*, 2010, 154(3/4): 364–369.
- [13] 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.
- [14] 罗璐, 周萍, 童成立, 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.
- [15] KAHN M S, LAL R, ANN-VARUGHESE M. Twenty two years of tillage and mulching impacts on soil physical characteristics and carbon sequestration in Central Ohio[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 126: 151–158.
- [16] 李升东, 王法宏, 司纪升, 等. 耕作方式对土壤微生物和土壤肥力的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(5): 1961–1964.
- [17] NASCENTE A S, LI Y C, CRUSCIOL C A C. Cover crops and no-till

- effects on physical fractions of soil organic matter[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 130: 52–57.
- [18] 蔡太义, 黄耀威, 黄会娟, 等. 不同年限免耕秸秆覆盖对土壤活性有机碳和碳库管理指数的影响[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(9): 1962–1968.
- [19] LI F M, WANG J, XU J Z, et al. Productivity and soil response to plastic film mulching durations for spring wheat on entisols in the semiarid Loess Plateau of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 78(1): 9–20.
- [20] 郑立臣, 解宏图, 张威, 等. 秸秆不同还田方式对土壤中溶解性有机碳的影响[J]. *生态环境*, 2006, 15(1): 80–83.
- [21] 张鹏, 李涵, 贾志宽, 等. 秸秆还田对宁南旱区土壤有机碳含量及土壤碳矿化的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(12): 2518–2525.
- [22] JIN K, CORNELIS W M, GABRIELS D, et al. Residue cover and rainfall intensity effects on runoff soil organic carbon losses[J]. *CATENA*, 2009, 78(1): 81–86.
- [23] 王娇, 张玉龙, 张玉玲, 等. 不同灌溉方式对有机肥碳矿化及土壤活性有机质含量影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2010, 41(1): 37–41.
- [24] 李小涵, 王朝辉, 郝明德, 等. 黄土高原旱地不同种植模式土壤碳特征评价[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(2): 325–330.
- [25] 党廷辉, 高长青, 彭琳, 等. 长武旱塬轮作与肥料长期定位试验[J]. *水土保持研究*, 2003, 10(1): 61–64, 103.
- [26] 党廷辉. 黄土旱塬区轮作培肥试验研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(3): 45–48, 67.
- [27] 张春霞, 郝明德, 魏孝荣, 等. 黑垆土长期轮作培肥土壤有机质氧化稳定性的研究[J]. *土壤肥料*, 2004(3): 10–12, 16.
- [28] 郭胜利, 吴金水. 党廷辉. 轮作和施肥对半干旱区作物地上部生物量与土壤有机碳的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(3): 744–751.
- [29] ZHENGCHAO Z, ZHUOTING G, ZHOUPIPING S, 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.
- [30] 佟小刚, 黄绍敏, 徐明岗, 等. 长期不同施肥模式对潮土有机碳组分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(4): 831–836.
- [31] 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.
- [32] 芦思佳, 韩晓增, 尤孟阳, 等. 施肥对黑土密度分组中碳、氮的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(2): 177–180.
- [33] 王玲莉, 韩晓日, 杨劲峰, 等. 长期施肥对棕壤有机碳组分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(1): 79–83.
- [34] MISHRA U, USSIRI D A N, LAL R. Tillage effects on soil organic carbon storage and dynamics in Corn Belt of Ohio USA[J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, 107(2): 88–96.
- [35] 许淑青, 张仁陟, 董博, 等. 耕作方式对耕层土壤结构性能及有机碳含量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(2): 203–208.
- [36] 王晶, 张仁陟, 李爱宗. 耕作方式对土壤活性有机碳和碳库管理指数的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(6): 8–12.
- [37] 宋明伟, 李爱宗, 蔡立群, 等. 耕作方式对土壤有机碳库的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(2): 622–626.
- [38] 张四伟, 张武益, 王梁, 等. 耕作方式与秸秆还田对麦田土壤有机碳积累的影响[J]. *江西农业学报*, 2012, 24(8): 6–9.
- [39] 崔凤娟, 刘景辉, 李立军, 等. 免耕秸秆覆盖对土壤活性有机碳库的影响[J]. *西北农业学报*, 2012, 21(9): 195–200.
- [40] 卜玉山, 邵海林, 王建程, 等. 秸秆与地膜覆盖春玉米和春小麦耕层土壤碳氮动态[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(2): 322–326.
- [41] 崔志强, 汪景宽, 李双异, 等. 长期地膜覆盖与不同施肥处理对棕壤活性有机碳的影响[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(19): 8171–8173.
- [42] 王新建, 张仁陟, 毕冬梅, 等. 保护性耕作对土壤有机碳组分的影响[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(2): 115–121.
- [43] 吴荣美, 王永鹏, 李凤民, 等. 秸秆还田与全膜双垄集雨沟播耦合对半干旱黄土高原玉米产量和土壤有机碳库的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(9): 2855–2862.
- [44] 王晓凌, 李凤民. 苜蓿草地与苜蓿-作物轮作系统土壤微生物量与土壤轻组碳氮研究[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(4): 132–135, 142.