

固碳土壤学的核心科学问题与研究进展*

潘根兴¹ 周萍 李恋卿 张旭辉

(南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 南京 210095)

摘要 土壤碳固定是当前有关陆地生态系统碳循环与全球变化的地球表层过程研究的重要优先领域。国际社会对全球农业温室气体减排的需求, 驱动着土壤学对土壤固碳容量与潜力、固碳与减排的过程与机理的前沿探索, 并越来越呈现为一个独特的土壤学新兴分支学科)) 固碳土壤学(Soil Science of C Sequestration)。本文围绕固碳土壤学的基本科学问题, 回顾了最近 10 多年来, 特别是最近 5 年来国内外关于土壤固碳研究的主要进展, 讨论了固碳土壤学中的核心科学问题是土壤固碳容量与固碳作用的机理, 论述了土壤物理保护、碳化学结合与碳化学转化稳定与固碳容量及稳定化的关系, 提出了土壤²植物(作物)²微生物相互作用是当前固碳土壤学的前沿领域和深化方向, 并结合国内对水稻土固碳的研究进展, 提出了固碳土壤学的概念性框架, 认为我国亟待加强固碳土壤学研究, 深入探索我国农业经营管理特色下土壤固碳容量、过程、机理, 丰富和发展农业土壤碳循环理论, 并服务于全球变化生物学和国家碳管理。

关键词 全球变化生物学; 固碳土壤学; 农业土壤; 碳循环; 土壤碳库; 土壤学

中图分类号 X2; S15

文献标识码 A

在全球变化和可持续发展的大背景下, 土地利用的生态过程及其与全球变化的关系是当代地理学对地球表层过程的综合研究的主要发展方向和优先领域之一^[1], 这种研究正在深入到地球表层系统各界面间的物理、化学、生物及人文过程, 探讨多种过程的相互作用机理^[2, 3]。陆地生态系统碳库储量及其演变、农业和工业等领域的温室气体释放态势与减排潜力与途径等问题的研究成为国际科学界服务于全球变化控制的主流研究方向^[4, 5]。农业作为主要的人类土地利用活动, 对土壤碳库储存及其演变的影响在全球系统碳循环研究中被予以广泛的注意。IPCC^[6]第三工作组利用现有各种资料进行了缓解全球气候变化潜力的评估研究, 其第四次评估报告已在 2005 年下半年经过秘鲁利马会议的讨论, 并在 2006 年 2 月于北京举行的 IPCC Working Group III 全体会议上交叉讨论, 即将提交。在 IPCC AR4 (2006) 报告中, 提出了农业是当前具有很大缓解能力和潜力的一个重要的陆地生态系统, 全球农业减排的自然总潜力(Total Biophysical Potential) 高达 $\text{CO}_2\text{eq } 7\,300 (-1\,100 \sim 16\,900) \text{ Mt a}^{-1}$, 其中 93% 来

自减少土壤 CO_2 释放(即固定土壤碳), 并且进一步认为东南亚是全球最大的农业(土壤)固碳与温室气体减排的潜力所在^[7]。为了明确农业土壤固碳与温室气体减排的自然潜力和主要途径, 农业土壤固碳研究已经成为最近 5 年来日益活跃而飞速发展的一个新兴研究领域。在美国, 于 2001 年提出了固碳科学(C Sequestration Science), 美国地球物理联合会提出了固碳科学技术(Science and Technology of C Sequestration)的概念^[8], 美国农业部将农业土壤固碳和温室气体减排作为国家的核心项目^[9]。美国能源部支持了 3 个促进陆地生态系统固碳的国家中心和 7 个地区中心。在这些机构的核心项目中, 土壤固碳都占有十分重要的地位。2002 年, 美国成立了农业土壤温室气体减排协作机构(Consortium for Agricultural Soils Mitigation of Greenhouse Gases, CAS2 MGS)。美国土壤学家认为, 土壤固碳研究是土壤学的最新前沿(Final Frontier of Soil Science)^[10]。看来, 土壤学界对土壤固碳的研究已经越来越发展成为一个具有鲜明服务目标和独特研究内容和相应的研究方法途径的新兴分支学科。本文围绕固碳土壤学

* 国家自然科学基金重点项目(40231016)资助

- 通讯作者, E-mail: pangexing@yahoo.com.cn

作者简介: 潘根兴(1958~), 男, 教授, 主要从事土壤碳循环与全球变化研究

收稿日期: 2006-07-12; 收到修改稿日期: 2006-11-02

的核心科学问题,回顾国内外近年来对土壤固碳所涉及的基本理论问题)))固碳容量、过程和机理的研究进展,讨论提出农业土壤固碳科学概念模型及进一步研究的展望,期望对当前我国农业土壤固碳研究有所参考。

1 土壤碳固定潜力与演变趋势是固碳土壤学的首要科学目标

5 京都议定书6规定签约国承担温室气体减排义务时,应提交碳和温室气体排放和减排的清单,要求是可以计数、测定、证实,并落实到碳管理和碳贸易。因此,土壤碳动态及由这种碳动态中因素-效应关系出发的固碳容量与潜力的研究是固碳土壤学的首要任务。土壤固碳潜力是区域或国家土被的整体固碳能力。运用土壤碳循环模型研究土壤固碳潜力成为国际上陆地生态系统固碳与温室气体减排潜力评估的一种主要方法途径,这主要是根据土壤碳循环过程与机理建立土壤有机碳水平的表征、评估或预测模型,然后根据影响因素或管理实践的变化作为情景分析来估计、评估和预测区域或国家尺度的土壤固碳潜力与前景^[11]。

自 20 世纪 80 年代以来,先后开发出 CENIU2 RY、DNDC、Roth C 等土壤有机碳动力学模型和过程模型,这些模型是机理性的,在用于空间尺度评估时带来很大的不确定性。新近,考虑空间因素的生物地理与生态系统模型(如加拿大的森林碳收支模型, Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector, CBM2CFS2)^[12]得到更多的关注。最近,还根据野外土壤有机碳变异影响因素的研究开发出农田尺度的碳固定潜力评估模型,如用于区域农业固碳潜力评估的 CQUESTER 模型^[13],用于田块尺度固碳潜力评估的 EPIC 模型^[14],这些模型研究用来评估小区域内或农田的固碳潜力及指导固碳管理具有重要意义。在固碳潜力的模型研究上,模型开发的方法学^[15]、模型模拟的有机碳变化及模型适用性^[16]与不同系统中模型应用的参数修正^[17],模型估计的不确定性与影响因素^[18,19],还包括区域内田间有机碳含量的空间变异性^[20]及这种变异的尺度效应与因素效应研究^[21],未来变化趋势(如土地利用^[22-24])、自然潜力与社会经济潜力的关系^[23,25]等问题成为固碳潜力宏观研究的主要内容。

另一方面,应用 Meta Analysis 方法评估不同地区和国家、不同人为因素下固碳潜力变化也成为宏

观研究的代表性方向。由于欧美一些国家具有丰富的多种长期试验和调查观测资料,对这些资料的归一化分析统计,可以辨析土壤固碳的主导因素以及固碳潜力的主要途径,明确人为因素对土壤固碳的整体影响与区域差异^[26]。对全球不同实际资料的交叉分析来探索过去演变趋势以及利用土地利用变化情景对未来演变趋势的综合分析研究近年来显得十分活跃。2002 年,美国橡树岭国家生态实验室的 West 和 Post 发表了对全球 100 多个国家的土壤肥料长期试验地土壤碳动态的分析报告^[27],评价了全球通过合理轮作和耕作措施促进土壤固碳的潜力;最近,美国 Colorado 大学国家资源生态实验室科学家发表了对全球不同气候带 100 多个土壤与农业管理的长期试验和实验研究点的分析报告^[28],评价了不同农业管理措施对土壤固碳的影响强度及其随气候条件的变化。这些研究都是围绕认识土壤的固碳容量,从而判断全球土壤和农业温室气体减排的自然潜力,评估土地利用覆盖与全球环境变化下通过区域有机碳库演变对固碳与减排的潜力的变化趋势。这仍将是今后一个时期土壤碳循环研究的重要内容。而认识土壤固碳的过程和机理是这种研究的基础依据。

2 土壤碳保持容量与稳定化是全球变化下土壤碳循环的焦点问题

目前的土壤有机碳水平及其演变预测模型的基本出发点是不同条件下的有机碳输入与输出的关系。现有的模型并不能圆满地解释当前土壤碳储存的地带性分布及其对温度变化(全球变暖)的反馈,这在很大程度上是因为对土壤的固碳容量及其稳定性机制的认识还不充分。从物源上说,在一定的生态系统中,有机碳的积累水平依赖于输入与输出的平衡,即土壤中有机质的矿化与腐殖化的平衡。尽管从全球尺度看,土壤呼吸与生态系统 NPP 有明显的关系^[29,30],但土壤有机碳水平并不简单地随生态系统生物量生产而依变,这是因为不同生态系统中土壤有机碳的矿化输出更强烈地响应于温度和湿度等条件变化。但是,不同地带的土壤有机碳水平又不能用温度条件决定的分解趋势来解释^[31]。例如, Nature 上关于土壤碳变化对于温度的响应有过激烈的争论,主要是依据野外地理资料(有尺度的空间变化)与实验培养资料(无尺度的过程与机理差异)的不同结果而产生关于土壤有机碳更新对于温度的响

应的不同认识^[32]。10 年的就地升温实验表明, 中纬温带森林土壤在升温下增加的碳矿化与碳库损失并不显著, 反而可能促进生态系统碳库增加, 这被认为是温带森林土壤中活性碳库较小的缘故^[33]。在模拟的陆地生态系统碳库变化和全球变化下土壤碳库变化及其对温度的响应上, 气候2碳循环耦合模型的模拟与 Roth C 模型的模拟结果大相径庭, 因为前者将土壤碳视作均一碳库而后者将土壤碳视作具有不同活性的快库和慢库, 因而前者可能过高估计了气候变化下土壤碳库的损失及温度效应^[31, 34]。近来, 越来越多的野外研究提出了对土壤固碳过程与机制的深入认识的研究需求^[35]。

决定陆地生态系统中土壤碳生物地球化学行为的关键因素是土壤中碳固定特性, 其焦点是土壤碳库的分配、结合和稳定性的差异。因此, 土壤固碳的自然(生物物理, Biophysical)潜力实际上取决于一定生物气候条件下稳定(顶极)生态系统中土壤对有机碳的保持容量(Retention Capacity), 它是特定土壤在一定生物气候条件下有机碳输入与输出的平衡水平, 这种水平是生物量生产下土壤能够转化进入土壤的有机物碳的能力与微生物分解释出碳的能力的平衡。因此, 土壤有机碳的转化与稳定和有机碳对于微生物分解的抗性是土壤固碳容量的实质。因此, 土壤有机碳的转化过程、保护过程和矿化过程都是涉及土壤有机碳固定与稳定的基础过程。

3 土壤碳保护机制是土壤固碳容量的重要基础, 但因不同土壤类型而异

在土壤碳保护机制研究上, 过去从温带森林和草地的土壤有机碳与土壤固相的关系的静态统计出发, 提出了粘粒保护理论, 试图用于说明土壤中有机碳的固定容量及碳固定速率^[36~38]。Paul 等^[39]报道, 美国不同土壤条件下土壤有机碳中酸水解组分与非水解组分的平均驻留时间(MRT)与砂粒含量成反比, 而与粘粒含量成正比。而统计表明, 美国温带地区免耕下土壤有机碳增加最明显, 且增加幅度与粘粒含量成正比^[40]。这些研究支持了在温带土壤中存在粘粒对有机碳的保护作用。最近, Arrouays 等^[41]通过对法国 102 000 个耕作土壤表土的有机碳数据的统计分析, 也认为土壤的质地(粘粒含量)对于土壤碳水平有重要控制作用, 并认为在保护容量高的耕作土壤采取固碳措施比在保护水平低的低碳土壤的固碳更有效。确实, 上述粘粒与有机碳的这

种关系在温带气候条件、粘土矿物相主要是 2B1 型层状硅酸盐粘土矿物的土壤中立^[42]。但是, 一个在全球变化被广泛注意的现象是温带特别是高纬地区土壤碳对于升温下的微生物矿化和分解十分敏感, 即以粘粒为保护机制的土壤碳实际上不十分稳定。早就有资料表明, 温带、寒温带地区土壤有机碳、草地土壤有机碳对于环境条件变化十分敏感, 升温下分解作用与 CO₂ 释放显著提高^[43, 44]。相反, Ogle 等^[28]的统计研究表明, 森林土壤耕作引起的损失在热带最高, 而温带最低, 但免耕下的增加却是热带最多。我们^[45]对我国耕地土壤相对于自然土壤的耕作下有机碳损失的研究也表明, 我国北方土壤损失强度较大, 而热带亚热带地区的土壤却较小; 一个十分有意义的现象是, 我国水稻土有机碳水平较高, 且南方热带亚热带地区的水稻土固碳速率较高, 具有明显较大的固碳潜力^[46, 47], 联系到免耕下土壤有机碳提高反而在热带地区较多等事实, 且热带亚热带地区土壤粘粒以 1B1 型高岭石为主, 其吸附与粘粒保护活性并不如以 2B1 型(蒙皂石或伊利石)为主的温带地区的强, 这说明粘粒保护作用并不能解释广泛的土壤中有有机碳的固定容量与机制, 当还有比温带粘粒保护作用更强的有机碳保护机制存在。

4 团聚体物理保护是土壤固碳容量的重要机制

通过过去很多关于土壤有机碳矿化与 CO₂ 呼吸释放的研究, 认识到土壤中存在对于微生物分解具有不同响应程度的库, 在有机质动力学模型中分别称为快库、慢库和稳定库^[39], 这些库对分解和矿化表现出的不同响应可能与它们的不同结合和保护状态有密切的关系。最近 5 年多来, 团聚体(欧洲土壤学家习惯称为土壤团聚颗粒组, soil particle size fractions)尺度的物理、化学和生物学研究越来越认识到土壤中不同库的保护与稳定化机制的差异。团聚体形成作用被认为是土壤碳固定的最重要机制^[48], 特别是对快库的物理保护。Garten 等^[49]对森林下矿质土壤的有机质密度分组和团聚体颗粒分组的研究显示, 矿质土壤中 70% 以上的有机碳是存在于粉砂和黏粒级的团聚体颗粒组中, 是物理保护的, 而未保护部分与温度的变异有显著的统计负相关, 提示团聚体物理保护对有机碳固定的重要作用。国外的一些研究表明, 免耕虽然确实提高了土壤有机碳储库, 但主要是在最表层(大约 0~10 cm)以内, 并且提高

的主要原因是团聚体内的物理保护作用得到保障。旱地土壤中有有机碳积累特别是免耕下快速的有机碳积累被归结于团聚体形成、稳定和更新的保护,而降低土壤的侵蚀破坏及由此的有机质损失^[50]。目前比较普遍接受的认识是:植物、微生物的碎屑形成微团聚体的核,高碳的新有机物质形成和稳定粗团聚体,而老有机碳封闭于细团聚体中。但仍认为粘粒矿物与高碳的腐殖物质的相互作用(依矿物类型而定)与 SOC 的保护及其容量的大小密切相关^[51]。团聚体中保护的和未保护的有机碳具有不同的更新速率,因而团聚体保护能力或容量是土壤固碳自然潜力的物理基础。但对于团聚体内部的存在状态、结合形态及相关的固定机制研究还较少^[51]。

5 团聚体中物理保护下有机碳与土壤组成分的化学键合而稳定化可能是土壤固碳作用的重要机制

很多培养研究证实,粗团聚体物理保护的快库碳仍是不稳定的,土壤固碳过程应该还涉及土壤碳在团聚体更新中的转化与化学稳定。Clough 等^[52]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-矿物质复合体,即使施用 N 肥下土壤微生物活性提高,微生物仍不能有效地分解之。看来,团聚体内有机质与钙金属形成桥键结构是这些土壤中团聚体中物理保护有机碳的稳定状态,即使在 N 有效性提高的条件下,土壤中钙没有影响有机碳的可降解性。我们曾经提出,水稻土中有机碳不符合黏粒物理保护,而氧化铁可能在有机碳保护与稳定中有重要作用^[42]。最近,我们运用徐建明等^[53]对有机质结合状态的分离提取方法,对南方主要水稻土中团聚体有机碳的结合状态进行了提取分析,表明不同发生起源和矿物学性质的水稻土中有机碳的钙、铁铝键合态的分布不同,水稻土有机碳的氧化稳定性与铁铝氧化物键合量存在显著的正相关⁽¹⁾,这初步证实我们原来关于氧化铁对水稻土中有机碳的固定和化学稳定有重要贡献的推测^[42]。这可以解释南方水稻土中有机碳的快速积累与其较小的温度敏感性。Osher 等^[54]在研究夏威夷火山灰土由森林改为草地和甘蔗田后有机质含量的变化中,通过统计关系也认识

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主要因素,换言之,耕作损失的碳看来与没有与这些化合物的结合有关。Spaccini 等^[55]在对热带非洲森林和森林开垦为农地的土壤团聚体颗粒组中总有机碳和碳水化合物含量的变化的研究中,表明耕作引起的总碳损失在砂质土中明显高于粘质土(酸性、富氧化铁铝)中,并且归结于耕作引起团聚体破坏,使土壤失去了物理保护,细的富有机碳和碳水化合物的颗粒(键合稳定碳)侵蚀流失所致。

6 有机碳的化学转化和稳定可能是碳固定和稳定的最终本质

有机质化学与同位素化学的结合研究的发展,特别是同位素加速质谱仪和¹³C、¹⁵N 核磁共振质谱仪的应用为进一步认识土壤(团聚体)中有机碳的化学稳定作用提供了可能。最近, Mikutta 等^[56]认为,土壤团聚体中存在有机碳的物理保护和化学稳定的双重作用,被保护的有机碳在土壤中经受固有的化学转化和稳定作用,只是目前对于物理保护和化学稳定两种作用对于固碳能力的相对贡献还了解很少。他们通过对选择性溶解的有机碳组分的¹⁴C 和¹³C 的同位素自然丰度研究和 CPMAS¹³C NMR 质谱仪的研究,将不被 6% NaOCl 溶液溶解的碳称为稳定性有机碳,并进一步分为(化学)保护性碳和(化学)抗性碳(recalcitrant C)(分别溶于和不溶于 10% HF),容易被 6% NaOCl 溶液提取的碳是¹⁴C 年轻的碳,而证明 HF 提取的化学保护性碳基本上是与土壤中多聚体铁铝氧化物结合的,而大约不到 1/3 的稳定碳组分是化学抗性碳,它们与矿物质结合状态无关(是有机碳的化学转化的终端状态)。因此,他们提出酸性森林土壤中与非晶质氧化物的结合使物理保护下的有机碳得到化学稳定,认为这种稳定化作用是土壤固碳的最重要的本质机制。

进入土壤的有机物质的化学转化与结构稳定同样在固碳中有十分重要的作用。Liang 等^[57]采用盆栽方法通过¹³C 稳定性同位素测定研究了玉米新碳在快库中的分布,认为水溶性有机碳和微生物碳是新碳的主要归宿。Janssen 等^[58]研究认为,DOC 可能是代表森林土壤中快库碳固定的指标;相似地, Franluebbers 等^[59]的研究提出,较高的 POC/TOC 比率和较高的 POC/PON 比率有利于物理保护的土壤

(1) 宋国菡. 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. 南京农业大学博士学位论文, 2005

固碳。真菌菌根分泌的 DOC 有利于水稳性团聚体形成, 保护的有机碳含量增加^[60]。Gleixner 等^[61]采用热裂解法研究农地种植玉米后土壤有机碳裂解产物中碳水化合物稳定性同位素组成, 提出慢库有机碳的增多与固定可能主要地由于碳水化合物特别是多糖的循环。Cayet 和 Lichtfouse^[62]研究了分别种玉米和小麦 23 年的旱地土壤团聚体中植物来源的 n2 烷烃(C29, C31) 组分的 D^3C_j , 该值随粒径的增大而升高, 不同团聚体粒组中变大, 植物叶子来源的 n2 烷烃(C29, C31) 在粗的团聚体中富集, 并且含 ^{13}C 的 n2 烷烃在粗的团聚体中更为年轻。而国际有机质化学研究专家、意大利 Napoli 大学的 Piccolo 教授的团队最近几年来采用选择性有机组分提取、裂解组分化学鉴定和 CPMAS 联合 ^{13}C 核磁共振光谱分析(CPMAS-NMR) 等技术, 深入研究了土壤中有机碳固定中的有机化学机理, 表明来源于玉米的新碳转移进入腐殖组分中, 新鲜植物残体矿化分解的有机碳化合物主要存在于腐殖物质的亲水组分中, 并可以进一步被疏水组分所稳定, 因而发现土壤中原有有机碳中的稳定组分(腐殖物质)起着新碳的汇的作用, 这是有机碳化学固定的新的研究认识^[63]。因此, 提出了土壤固碳作用及其机制研究的分子有机化学的新领域^[61]。

7 土壤固碳中植物(作物)2微生物作用机制正在受到重视

上述的这些研究都是对土壤中有机碳的库及库间的分配、转化与稳定的土壤研究。由于土壤固碳首先与有机质输入有关, 不同植物(作物)对于输入土壤的有机物质的转化与更新当存在重要的影响。但这方面尚未予以充分注意。在作物对于土壤固碳的影响上, 玉米作为同位素标记作物常常用来研究土壤有机碳的更新, 而不是直接研究作物对固碳与碳稳定影响的机理。目前利用玉米重碳研究土壤有机质与团聚体更新都是假设玉米碳与 C23 作物碳的转化与更新速率相同, 所以根据玉米重碳的自然标记可以估算有机质与团聚体更新速率。但 Paul 等^[39]的研究指出, 利用 D^3C_j 的差异判读出的应该是土壤中快库而不是总库的动态。因此, 该方法在应用于解释总有机碳库变化时可能高估了更新速率。另外一些研究认为, 不同作物下根系分泌物化学组分的差异, 使根际微生物出现选择性利用, 例如对转基因作物对土壤微生物影响的研究提出了不同

作物基因型可能诱发微生物区系的变化, 或者基因蛋白质对微生物的可能改变, 同样可能使土壤有机质的输入物的性质与碳源可利用性发生改变^[64], 因而影响有机质的更新与循环。最近, Kondo 等^[65]用 11 个不同基因型水稻进行不同水分(好气、干燥条件; 好气湿润条件和淹水)及不同氮水平(不施氮和施氮 90 kg hm^{-2}) 下的田间试验, 表明不同基因型的同位素分异比产量的分异更强, 这种同位素分异在不同的水分和氮素水平下都存在。并且, 籼稻的同位素差异比粳稻更明显。高湿和低氮显著促进这种同位素的分异效应, 同种条件下基因型决定的差异比水分的影响更强。不同基因型的同位素分异与水分的蒸散效率有关。看来, 作物及基因型的差异将会影响有机碳的同位素差异, 并由于土壤微生物对不同同位素碳源的选择性利用而可能影响水稻土有机碳更新。在森林土壤中, 不同 C/N 的植物源有机质对于碳固定有重要影响, 含 N 较多的有机物质仅存在于活性碳库中, 而慢库中很少, 因而 N 水平是 CENTURY 模型应用时常常常要修正的参数^[66]。因此, 不同作物当具有不同 C/N 时, 同样会影响输入有机质的更新与碳固定。而 Dijkstra 等^[67]研究了美国 Minnesota 某草地 FACE 试验 5 年下植物种群变化对 N 沉降下土壤碳固定的影响, 表明植物种组成的演变使进入土壤的有机源物质的木质素含量发生变化, 产生富木质素残体的植物种有利于高氮下的土壤固碳。

近年来, 由于稳定性同位素标记与微量样品同位素分析技术以及微生物分子生态技术的发展, 开始重视土壤固碳中微生物的作用。Range2Castro 等^[68]运用 ^{13}C 脉冲标记技术研究了施石灰对草地植物光合作用和植物2土壤碳流的影响, 说明了土壤活性碳组分的同位素丰度以及碳更新速率受到地上部植物和微生物作用的共同影响。早在 1999 年, Puget 等^[69]就研究了团聚体稳定性与有机残体输入的关系, 根据有机物与微生物的存在关系提出依附于团聚体内植物残体的微生物分泌的胞外多糖的稳定作用。Piao 等^[70]通过测定微生物碳的 ^{13}C 稳定性同位素丰度变化, 表明海拔较低地点的残体分解较快, 微生物 D^3C_j 值较高, 这归结于微生物对重碳基质的选择性利用。最近, Billings 和 Ziegler^[71]在运用 PLFA ^{13}C 标记技术探讨 FACE 条件下有机碳转化与碳固定效应时, 发现 FACE 条件下不同基质利用型的细菌群落与相对活性发生了变化, 分解较难分解碳源的细菌群落活性有增强的趋势。Fontaine 等^[72]

指出,在农田生态系统中,植物的碳输入与土壤碳水平是负相关的,当农田中微生物处于养分限制条件时,土壤的碳分解加速,碳库快速消减。他们强调,在土壤碳固定研究中急需了解碳输入与固碳过程间的微生物作用机理。但是,最近我们对太湖地区水稻土在长期施用不同肥料下的碳固定与微生物区系演化的研究中,明确了微生物区系受到不同肥料施用的影响,有机碳积累服从于生物量碳的输入变异,并且单施化肥下微生物对碳基质的利用能力提高,分解矿化提高^[73~76]。这些都提示,土壤固碳速率及过程受到有机碳积累下土壤生境变化而带来的微生物区系变化的调节。

综上所述,土壤碳固定容量与机制的研究已经深入到土壤颗粒(团聚体分组和密度分组)层面的土壤物理-化学-生物学的相互作用及其对土壤有机碳的保护、结合、转化与利用的影响上。关于固碳中土壤有机碳的库变的研究报道很多,已经认识到不同库的保护、结合和化学稳定的一些特点,但对于物理保护作用、化学稳定作用对不同更新速率的库的影响,以及土壤碳固定上的相对重要性还认识不足。土壤碳固定还应考虑农田生态系统中作物的变异、作物和养分管理影响下的微生物(区系与功能)变化及其在固碳过程和机制上的意义。

8 土壤-作物-微生物相互作用是我国农业土壤固碳及其过程研究的深化方向

我国是人口众多、生态脆弱性明显、可利用土地缺少的国度,我国农业具有悠久的历史,但集约化程度高、高产目标下的更强烈的土地利用,在 7% 的国土面积上生产供全球 20% 的人口的食物。通过大面积土地的生物能作物的生产而达到固碳看来不适合国情。然而,从土壤背景有机碳水平和碳库看,我国是低碳密度的国家,农地有机碳水平普遍低于欧美等发达国家,理论上说,在良好管理下我国农地应该具有巨大的固碳自然潜力^[77]。但是,土壤固碳的自然潜力多大,不同作物和农作制下自然潜力存

在多大幅度的变异,通过农作经营实践可以实现潜力的规模和途径是什么,这些是亟待研究阐明的。因此,我国农业土壤的固碳容量与固碳机理的研究应该列为我国当前生态系统碳循环研究、全球变化土壤学研究的重要和优先研究领域。

水稻土是我国特色的人为土壤类型^[78],被国内农学家和土壤学家公认是生产能力高、土壤质量相对较好的农业资源^[79]。我国农业土壤中,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^[45,46,77]。尽管已经明确水稻土的有机碳密度相对于旱地平均高 $C\ 9\ t\ hm^{-2}$,南方水稻土中近 20 多年来的有机碳积累较快^[47,80~83],但目前对这种碳积累趋势中涉及的稳定容量的土壤机制、固碳过程与农作系统过程的关系的认识还严重不足,这制约着对水稻土固碳自然潜力的评估。

水稻土的固碳过程和涉及的农田生态系统中土壤-作物-微生物的相互作用机制可能是这种特殊土壤碳循环的特异性问题。我们和国内同行的一些研究都表明,水稻土新近积累的有机碳与粗团聚体中的物理保护有关^[84],新碳多以为颗粒态^[76]、 $KMnO_4$ 易氧化态、粗和轻(微)团聚体组分的有机碳的增加为表象^{(1,2)[85~87]}。同时,这些粗的或轻的团聚体组分中,伴随有机质的积累微生物量碳和酶活性也表现为增高^(3,4),即水稻土有机碳积累中可矿化碳库增加和微生物活动增强,都可能潜在影响土壤呼吸的增强。我们在太湖地区的观测表明,非植稻季水稻土土壤呼吸平均为 $C\ 0.3\ g\ m^{-2}\ d^{-1}$ 水平^[88],而室内淹水矿化培养下平均为 $CO_2\ C\ 0.13\ \sim\ 0.17\ mg\ g^{-1}\ d^{-1}$ ^[73],这些结果明显低于 Bachelet 等^[89]根据文献上 NPP 与有机质及其土壤呼吸的关系模型估算的中国水稻土平均土壤呼吸 CO_2 释放强度($C\ 0.44\ g\ m^{-2}\ d^{-1}$),并似有低于自然草地、森林和国外农业土壤水平的趋势^[73,74]。这可能意味着水稻土中新近积累的有机碳具有一定的稳定性。但是,采用玉米同位素自然标记的研究却表明,稻田改种玉米 3 年原稻田有机碳就会快速分解^[90],所以这种稳定性也是相对的,稻田改旱作后粗团聚体物理保护的破坏可以使稻田碳失去稳定性。我国的稻作农业正在

(2) 黄雪夏 1 微观耕作尺度下紫色水稻土有机碳固定及碳汇效应. 西南农业大学博士学位论文, 2005

(3) Pan G X, Li L Q, Wu L S, et al. SOC stratification in profile and partitioning in microaggregate size fractions of three typical paddy soils in Tai Lake region, China (Submitted)

(4) 李恋卿 1 几种农业土壤中土壤颗粒的物质分异及其环境意义. 南京农业大学博士学位论文, 2001

向高产和超高产发展, 农田的生物作用和管理条件正在发生变化, 特别是土地利用的多样化(由 20 世纪的稻₂稻轮作向稻₂油、稻₂麦、稻₂菜和稻₂休闲等多种轮作制的转变)和新品种与基因型的推广, 以及水资源限制下稻作农业向节水农业的转变等都将影响稻田土壤的固碳过程及其固碳容量。

9 结语及展望

土壤固碳的研究已经趋向于形成一个以固碳与温室气体减排潜力为目标, 以农田和团聚体为主要研究尺度, 过程和机理研究为主要内容, 多学科、多界面研究为主要途径, 就地观测、原位分析和模型研究为主要方法途径的新兴土壤学分支学科。综合国内外的研究认识, 我们提出土

壤固碳的概念性模型及固碳土壤学的主要研究内容如图 1。我们认为, 土壤固碳将是一个动力学积累和稳定的过程, 更是土壤-作物-微生物相互作用过程的函数。以水稻土为例, 当前急需研究的是稻作农业下土壤-作物-生物相互作用对于土壤碳积累的速率、碳积累中的物理保护、化学结合与稳定的影响及其机制, 特别是动力学过程与机制, 这些研究需要引入地球生物学的思想与研究策略, 采取现代同位素技术、微生物(种群与分子生态)技术、有机质分子表征技术, 认识土壤固碳过程的本质。我们期望, 我国农业土壤固碳研究将得到充实和发展, 为科学评估我国农业土壤固碳潜力和碳管理提供依据, 并为丰富和拓宽我国全球变化生物学研究做出贡献。

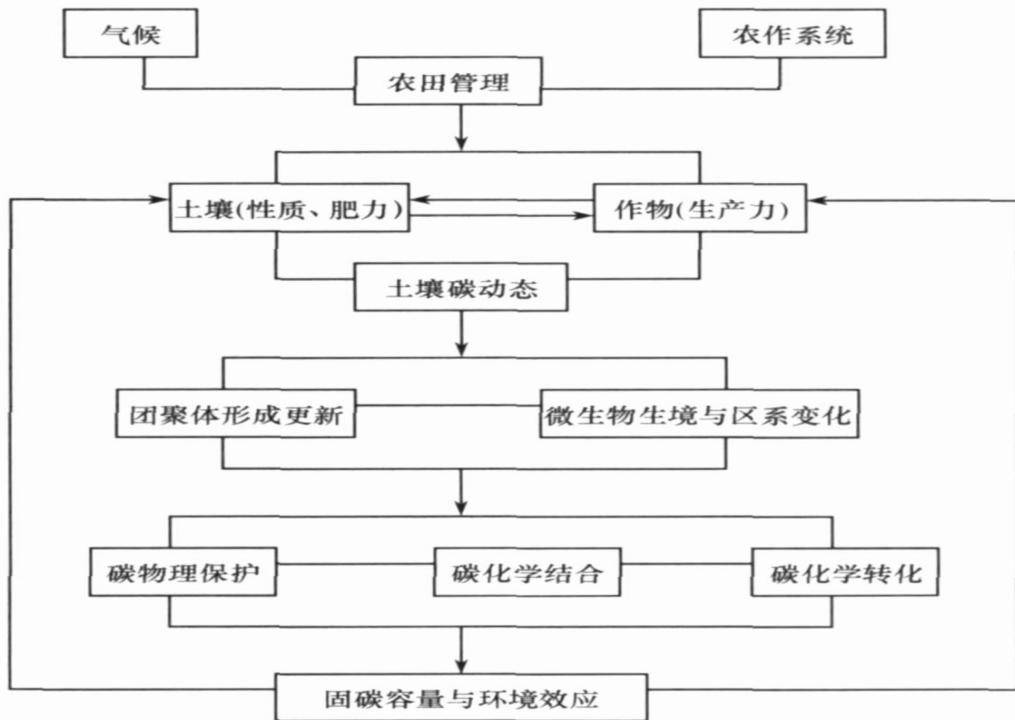


图 1 土壤固碳的概念性机理模型与固碳土壤学的核心研究内容框架

Fig.1 Conceptual model of C sequestration in soils and the core issues of soil C sequestration study

参考文献

- [1] 宋长青, 冷疏影. 21 世纪中国地理学综合研究的主要领域. 地理学报, 2005, 60(4): 546~ 552. Song C Q, Leng S Y. Soil important scientific problems of integrative study of Chinese geography in 5 to 10 years (In Chinese). Acta Geographica Sinica, 2005, 60(4): 546~ 552
- [2] 宋长青, 冷疏影. 当代地理学特征、发展趋势及中国地理学研究进展. 地球科学进展, 2005, 20(6): 595~ 599. Song C Q,

- Leng S Y. Characteristics and trend of modern geography and progresses of geographical research in China (In Chinese). Advances in Earth Science, 2005, 20(6): 595~ 599
- [3] 冷疏影, 宋长青. 陆地表层系统地理过程研究回顾与展望. 地球科学进展, 2005, 20(6): 600~ 605. Leng S Y, Song C Q. Re-view of land surface geographical process study and prospects in China (In Chinese). Advances in Earth Science, 2005, 20(6): 600~ 605
- [4] 曲建升, 孙成权, 张志强等. 全球变化科学中的碳循环研究进展与趋向. 地球科学进展, 2003, 18(6): 980~ 987. Qu J S,

- Sun C Q, Zhang Z Q, et al. Trends and advances of the global change studies on carbon cycle(In Chinese). *Advances in Earth Science*, 2003, 18(6): 980~ 987
- [5] 曲建升, 孙成权. 温室气体减排: 过去, 现在与未来. *地球科学进展*, 2004, 19(6): 1 052~ 1 053. Qu J S, Sun C Q. Mitigation of greenhouse gas: Past, present and future. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(6): 1 052~ 1 053
- [6] IPCC. Special Report on / Carbon Dioxide Capture and Storage0 Ex2 pert/Government Review 102022005 to 070322005 [EB/ OL]. <http://www.ipcc.ch/Last update 200503215>
- [7] Smith P, Martino D, Cai Z, et al. Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture. *Agric. Ecosys. Environ.*, 2006. doi: 10. 1016/j. agee. 2006. 06. 006
- [8] <http://www.ipsl.jussieu.fr/OCMP/mailling2list/archive/msg00285.html> / last modified 102000
- [9] <http://www.ars.usda.gov/research/programs/programs.htm? NP, CODE= 204. Last Modified: 03132003>
- [10] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304: 1 623~ 1 627
- [11] Eve M D, Sperow M, Howerton K, et al. Predicted impact of management changes on soil carbon storage for each cropland region of the conterminous United States. *J. of Soil and Water Conserv.*, 2002, 57(4): 1~ 17
- [12] Apps M J, Kurz W A, Beukema S J, et al. Carbon budget of the Canadian forest production sector. *Environmental Science & Policy*, 1999, 2(1): 25~ 41
- [13] Richman R W, Douglas Jr C L, Albrecht S L, et al. CQUESTR: A model to estimate carbon sequestration in agricultural soils. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 56(3): 237~ 243
- [14] Izaurralde R C, Williams J R, McGill W B, et al. Simulating soil C dynamics with EPIC: Model description and testing against longterm data. *Ecological Modelling*, 2006, 192(3/4): 362~ 384
- [15] Starr G C, Lal R, Malone R, et al. Modeling soil carbon transported by water erosion processes. *Land Degradation & Development*, 2000, 11: 83~ 91
- [16] Bhatti J S, Apps M J, Tamocai C. Estimates of soil organic carbon stocks in central Canada using three different approaches. *Can. J. For. Res.*, 2002, 32: 805~ 812
- [17] Kirschbaum M U F, Paul K I. Modelling C and N dynamics in forest soils with a modified version of the CENTURY model. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34: 341~ 354
- [18] van den Bygaart A J, Gregorich E G, Angers D A, et al. Uncertainty analysis of soil organic carbon stock change in Canadian cropland from 1991 to 2001. *Global Change Biology*, 2004, 10(6): 983~ 994
- [19] Mestdagh I, Lootens P, Cleemput O V, et al. Soil organic carbon stocks in Flemish grasslands: How accurate are they? *Grass and Forage Science*, 2004, 59(4): 310~ 317
- [20] Bowman R A, Reeder J D, Wienhold B J. Quantifying laboratory and field variability to assess potential for carbon sequestration. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 2002, 33(9/10): 1 629~ 1 642
- [21] Brejda J J, Mausbach M J, Goebel J J, et al. Estimating surface soil organic carbon content at a regional scale using the national resource inventory. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2001, 65: 842~ 849
- [22] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land use change: processes and potential. *Global Change Biology*, 2000, 6(3): 317~ 327
- [23] Smith J, Smith P, Wattenbach M, et al. Projected changes in mineral soil carbon of European croplands and grasslands, 1990~ 2080. *Global Change Biology*, 2005, 11(12): 2 141~ 2 153
- [24] Vleeshouwers L M, Verhagen A. Carbon emission and sequestration by agricultural land use: A model study for Europe. *Global Change Biology*, 2002, 8(6): 519~ 530
- [25] Smith P, Andren O, Karlsson T, et al. Carbon sequestration potential in European croplands has been overestimated. *Global Change Biology*, 2005, 11(12): 2 153~ 2 163
- [26] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8(4): 345~ 360
- [27] West T O, Post W M. Soil organic carbon sequestration by and crop rotation: A global data analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2002, 66: 1 930~ 1 946
- [28] Ogle S M, Breidt F J, Paustian K. Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions. *Biogeochemistry*, 2005, 72(1): 87~ 121
- [29] Hibbard K A, Law B E, Reichstein M, et al. An analysis of soil respiration across northern hemisphere temperate ecosystems. *Biogeochemistry*, 2005, 73(1): 29~ 70
- [30] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 71~ 90
- [31] Giardina C P, Ryan M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature. *Nature*, 2000, 404: 858~ 861
- [32] Davidson E A, Trumbore S E, Amundson R, et al. Soil warming and organic carbon content. *Nature*, 2000, 408: 789~ 791
- [33] Melillo J M, Stuedler P A, Aber J D, et al. Soil warming and carbon cycle feedbacks to the climate system. *Science*, 2002, 298: 2 173~ 2 176
- [34] Jones C, McConnell C, Coleman K, et al. Global climate change and soil carbon stocks: Predictions from two contrasting models for the turnover of organic carbon in soil. *Global Change Biology*, 2005, 11(1): 154~ 166
- [35] Akselsson C, Berg B, Meentemeyer V, et al. Carbon sequestration rates in organic layers of boreal and temperate forest soils) Sweden as a case study. *Global Ecology & Biogeography*, 2005, 14(1): 77~ 84
- [36] Hassink J. Effect of soil texture on the size of the microbial biomass and on the amount of C and N mineralized per unit of microbial biomass in Dutch grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(11): 1 573~ 1 581
- [37] Huntington T. Carbon sequestration in an aggrading forest ecosystem in the Southern USA. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1995, 59: 1 459~ 1 467
- [38] Richter H, Lorenz W, Bahadir M. The global equivalence ratio on decomposition laboratory scale combustion experiments. *Chemosphere*, 1999, 39(4): 555~ 562

- [39] Paul E A, Collins H P, Leavitt S W. Dynamics of resistant soil carbon of Midwestern agricultural soils measured by naturally occurring ^{14}C abundance. *Geoderma*, 2001, 104: 239~ 256
- [40] McConkey B G, Liang B C, Campbell C A, et al. Crop rotation and tillage impact on carbon sequestration in Canadian prairie soils. *Soil and Tillage Research*, 2003, 74(1): 81~ 90
- [41] Arrouays D, Saby N, Walter C, et al. Relationships between particle size distribution and organic carbon in French arable topsoils. *Soil Use and Management*, 2006, 22(1): 48~ 55
- [42] 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. *地球科学进展*, 2003, 18(4): 609~ 618. Pan G X, Li L Q, Zhang X H, et al. Soil organic carbon storage of China and the sequestration dynamics in agricultural lands (In Chinese). *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(4): 609~ 618
- [43] Oechel W C, Hastings S J, Vourlitis G, et al. Recent change of Arctic tundra ecosystems from a net carbon dioxide sink to a source. *Nature*, 1993, 361: 520~ 523
- [44] Oechel W C, Vourlitis G L, Hastings S J, et al. Change in Arctic CO_2 flux over two decades: Effects of climate change at Barrow, Alaska. *Ecological Applications*, 1995, 5: 846~ 855
- [45] Song G H, Li L Q, Pan G X, et al. Topsoil organic carbon storage of China and its loss by cultivation. *Biogeochemistry*, 2005, 74: 47~ 62
- [46] Pan G, Li L, Wu L, et al. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils. *Global Change Biology*, 2004, 10: 79~ 92
- [47] 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. *土壤学报*, 2006, 43(1): 46~ 52. Li Z P, Wu D F, Organic carbon content at steady state and potential of C sequestration in subtropical China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1): 46~ 52
- [48] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32: 2 099~ 2 103
- [49] Garten Jr C T, Post W M, Hanson P J, et al. Forest soil carbon inventories and dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian Mountains. *Biogeochemistry*, 1999, 45: 115~ 145
- [50] Unger P W. Aggregate and organic carbon concentration interrelationships of a Tertiary Paleustoll. *Soil & Tillage Research*, 1997, 42: 95~ 113
- [51] Blanco-Canqui H, Lal R. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2004, 23(6): 481~ 504
- [52] Clough A, Skjemstad J O. Physical and chemical protection of soil organic carbon in three agricultural soils with different contents of calcium carbonate. *Aust. J. Soil Res.*, 2000, 38: 1 005~ 1 016
- [53] 徐建明, 赛夫, 袁可能. 土壤有机矿质复合体研究 I. 钙键复合体和铁率键复合体中腐殖质的性状特征. *土壤学报*, 1999, 36(2): 168~ 169. Xu J M, Cheema S U, Yuan K N. Studies on organic-mineral complexes in soil I. Characteristics of humus in calcium-bound and iron/aluminum-bound organic-mineral complexes in soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(2): 168~ 169
- [54] Osher L J, Matson P A, Amundson R. Effect of land use change on soil carbon in Hawaii. *Biogeochemistry*, 2003, 65: 213~ 232
- [55] Spaccini R, Zena A, Igwe C A, et al. Carbohydrates in water-stable aggregates and particle size fractions of forested and cultivated soils in two contrasting tropical ecosystems. *Biogeochemistry*, 2001, 53: 1~ 22
- [56] Mikutta R, Kleber M, Margarets T, et al. Stabilization of soil organic matter: Association with minerals or chemical recalcitrance. *Biogeochemistry*, 2006(77): 25~ 56
- [57] Liang B C, Wang X L, Ma B L. Maize root-induced change in soil organic carbon pools. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2002, 66: 845~ 847
- [58] Janssens A, Lankreijer H, Matteucci G, et al. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests. *Global Change Biology*, 2001, 7(3): 269~ 278
- [59] Franzluebbers A J, Stuedemann J A. Particulate and non-particulate fractions of soil organic carbon under pastures in the Southern Piedmont USA. *Environmental Pollution*, 2002, 116: 53~ 62
- [60] Caravaca F, Alguacil M M, Azcon R, et al. Formation of stable aggregates in rhizosphere soil of *Juniperus oxycedrus*: Effect of AM fungi and organic amendments. *Applied Soil Ecology*, 2005, 891: 1~ 5
- [61] Gleixner G, Poirier N, Bol R, et al. Molecular dynamics of organic matter in a cultivated soil. *Organic Geochemistry*, 2002, 33: 357~ 366
- [62] Cayet C, Lichtfouse E. ^{13}C of plant-derived n-alkanes in soil particle size fractions. *Organic Geochemistry*, 2001, 32: 253~ 258
- [63] Spaccini R, Piccolo A, Haberhauer G, et al. Transformation of organic matter from maize residues into labile and humic fractions of three European soils as revealed by ^{13}C distribution and CPMA-NMR spectra. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51: 583~ 594
- [64] Liu H S, Li L H, Han X G, et al. Respiratory substrate availability plays a crucial role in the response of soil respiration to environmental factors. *Applied Soil Ecology*, 2005, 884: 1~ 9
- [65] Kondo M, Pablico P P, Aragones D V, et al. Genotypic variations in carbon isotope discrimination, transpiration efficiency, and biomass production in rice as affected by soil water conditions and N. *Plant and Soil*, 2004, 267: 165~ 177
- [66] Smith P, Smith J U, Powlson D S, et al. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using seven long-term experimental datasets. *Geoderma*, 1997, 81: 153~ 225
- [67] Dijkstra F A, Hobbie S E, Knops J M H, et al. Nitrogen deposition and plant species interact to influence soil carbon stabilization. *Ecology Letters*, 2004, 7(12): 1 192~ 1 198
- [68] Range-Castro J I, Prosser J I, Scrimgeour C M, et al. Carbon flow in an upland grassland: Effect of liming on the flux of recently photosynthesized carbon to rhizosphere soil. *Global Change Biology*, 2004, 10(1/2): 2 100~ 2 110
- [69] Puget P, Angers D A, Chenu C. Nature of carbohydrates associated with water-stable aggregates of two cultivated soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31: 55~ 63
- [70] Piao H C, Zhu J M, Liu G S. Changes of natural ^{13}C abundance in microbial biomass during litter decomposition. *Applied Soil Ecology*,

- 2005, 896: 1~ 7
- [71] Billings S A, Ziegler S E. Linking microbial activity and soil organic matter transformations in forest soils under elevated CO₂. *Global Change Biology*, 2005, 11(2): 203~ 212
- [72] Fontaine S, Bardoux G, Abbadie L, et al. Carbon input to soil may decrease soil carbon content. *Ecology Letters*, 2004, 7(4): 314~ 320
- [73] Zhang X H, Pan G X, Li L Q. Organic carbon mineralization and CO₂ evolution from paddy topsoil and the temperature dependence. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19: 319~ 326
- [74] Zheng J F, Li L Q, Pan G X, et al. Effect of long term fertilization on SOC mineralization and production of CH₄ and CO₂ under anaerobic incubation from bulk and particle size fractions of a typical paddy soil from Tai Lake Region, China. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 2006. doi: 10.1016/j.agee.2006.07.008
- [75] 张平究, 李恋卿, 潘根兴, 等. 长期不同施肥下太湖地区黄泥土表微生物碳氮量及基因多样性变化. *生态学报*, 2004, 24(12): 2 818~ 2 824. Zhang P J, Li L Q, Pan G X, et al. Influence of long term fertilizer management on topsoil microbial biomass and genetic diversity of a paddy soil from the Tai Lake region, China (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2 818~ 2 824
- [76] 周萍, 张旭辉, 潘根兴. 长期不同施肥对太湖地区黄泥土总有机碳及颗粒态有机碳的影响. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(6): 765~ 771. Zhou P, Zhang X H, Pan G X. Effect of long term different fertilization on content and depth distribution of total and particulate organic carbon of a paddy soil: An example of Huangnitu from the Tai Lake region, China (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(6): 765~ 771
- [77] 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. *地球科学进展*, 2005, 20(4): 384~ 393. Pan G X, Zhao Q G. Study on evolution of organic carbon stock in agricultural soils of China: Facing the challenge of global change and food security(In Chinese). *Advances in Earth Science*, 2005, 20(4): 384~ 393
- [78] 龚子同, 等著. 中国土壤系统分类: 理论、方法、实践. 北京: 科学出版社, 1999. 109~ 194. Gong Z T, et al. eds. *Chinese Soil Taxonomic: Theory, Methodology and Practices* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1999. 109~ 194
- [79] 凌启鸿. 论水稻生产在我国南方经济发达地区可持续发展中的不可替代作用. *科技导报*, 2004, 3: 42~ 45. Ling Q H. The indispensable role of rice production in areas of rapid economical development in South China (In Chinese). *Keji Daobao*, 2004, 3: 42~ 45
- [80] 黄耀, 孙文娟. 近 20 年来我国耕地土壤有机碳含量的变化趋势. *科学通报*, 2006, 7: 8~ 21. Huang Y, Sun W J. The trends of changes in organic carbon content of cropland soils of China over the last 2 decades (In Chinese). *Chinese Science Bulletin*, 2006, 7: 8~ 21
- [81] 张琪, 李恋卿, 潘根兴等. 近 20 年来宜兴市水稻土有机碳动态及其驱动因素. *第四纪研究*, 2004, 4(2): 236~ 242. Zhang Q, Li L Q, Pan G X, et al. Dynamics of topsoil organic carbon of paddy soils at Yixing over the last 20 years and the driving factors (In Chinese). *Quaternary Sciences*, 2004, 4(2): 236~ 242
- [82] 刘守龙, 童成立, 吴金水, 等. 稻田土壤有机碳变化的模拟: SC2 NC 模型检验. *农业环境科学学报*, 2006, 25(5): 1 228~ 1 233. Liu S L, Tong C L, Wu J S, et al. Simulation of changes of soil organic carbon in paddy soils: SCNC model validation (In Chinese). *Journal of Agricultural Environment Science*, 2006, 25(5): 1 228~ 1 233
- [83] Huang X X, Gao M, Wei C F, et al. Tillage effect on organic carbon in a purple paddy soil. *Pedosphere*, 2006, 16(5): 660~ 667
- [84] 李江涛, 张斌, 彭新华, 等. 施肥对红壤性水稻土颗粒有机质形成及团聚体稳定性的影响. *土壤学报*, 2004, 41(6): 912~ 917. Li J T, Zhang B, Peng X H, et al. Effects of fertilization on particulate organic matter formation and aggregate stability in paddy soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(6): 912~ 917
- [85] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土微团聚体有机碳汇的影响. *生态学报*, 2004, 24(12): 2 961~ 2 966. Yuan Y H, Li H X, Huang Q R, et al. Effects of different fertilization on soil organic carbon distribution and storage in microaggregates of red paddy topsoil (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2 961~ 2 966
- [86] Shao J A, Tang X H, Wei C F, et al. Response of CH₄ emission of paddy fields to land management practices at a microcosmic cultivation scale in China. *Journal of Environmental Sciences*, 2005, 17(4): 691~ 698
- [87] Li L Q, Pan G X, Zhang X H, et al. Variation of organic carbon and nitrogen in aggregate size fractions of a paddy soil under fertilization practices from the Tai Lake Region, China. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2007, 87. DOI: 10.11002/jsfa.2806
- [88] 郑聚锋, 张旭辉, 潘根兴, 等. 水稻土基底呼吸与 CO₂ 排放强度的日动态及长期不同施肥下的变化. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(4): 484~ 494. Zheng J F, Zhang X H, Pan G X, et al. Diurnal variation of soil basal respiration and CO₂ emission from a typical paddy soil after rice harvest under long term different fertilizations (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(4): 485~ 494
- [89] Bachelet D, Kern J, Tégl M. Balancing the rice carbon budget in China. *Ecologica Modelling*, 1995, 79: 167~ 177
- [90] 李志鹏, 潘根兴, 张旭辉. 改种玉米连续 3 年后稻田土壤有机碳分布和¹³C 自然丰度变化. *土壤学报*, 2007, 44(2): 244~ 251. Li Z P, Pan G X, Zhang X H. Topsoil organic carbon pool and ¹³C natural abundance changes from a paddy after 3 years corn cultivation (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(2): 244~ 251

CORE ISSUES AND RESEARCH PROGRESSES OF SOIL SCIENCE OF C SEQUESTRATION

Pan Genxing^{*} Zhou Ping Li Lianqing Zhang Xuhui

(Institute of Resource, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract Soil C sequestration has been a research area of increasing significance in study of Earth surface processes and global change. The understanding of capacity, biophysical potential and mechanisms involved in soil C sequestration has been demanded by the assessment of global biophysical potential of GHGs mitigation for the post-Kyoto period. In this paper, the main research achievements in soil C sequestration study are overviewed focusing C capacity and protection mechanisms. While much has been dedicated to the C pools and C sequestration, there is a good number of studies showing that chemical binding, transformation of OC are both involved in C capacity and stabilization as well as the physical protection in coarse particle size fractions. Interaction of soil-plant(crop)-microbes in soil-crop system may exert significant role in C sequestration in cropland soils which will become a frontier of C study by holistic approaches in the near future. Finally, a conceptual model of C sequestration of agricultural soils is proposed and suggestions for further study of C sequestration in China are given with emphasis on the processes under interactive effect of land management and crop production trends in the framework of global change biology systems.

Key words Agricultural soils; C cycling; Global change biology; Soil C pool; Soil C sequestration; Soil Science