

# 土壤碳循环研究及中国稻田土壤固碳研究的进展与问题\*

潘根兴 李恋卿 郑聚锋 张旭辉 周 萍

(南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 南京 210095)

**摘要** 土壤碳循环是与全球气候变化密切相关的重要地球表层系统过程, 是国际地学和生态学界近年来的热点领域。本文简要概述了国际土壤碳循环研究的进展和发展态势, 着重讨论了中国稻田土壤固碳研究已获得的认识。提出碳循环研究越来越走向与生物学的结合, 且越来越依赖于长期试验和观测。中国稻田土壤的固碳水平、潜力已有较丰富的认识和资料积累, 在团聚体尺度上也开展了较多的固碳机理的研究, 包括物理保护、化学结合、生物学的稳定等。无论是野外还是实验室的培养均表明稻田土壤碳矿化潜力较低, 这与团聚体的物理保护有关外, 还与稻田土壤中存在的碳的化学结合而稳定的机制有关; 固碳与农田生态系统生产力和生态服务功能的耦合机制是当前稻田土壤固碳研究的中心内容, 一些研究已经表明生物多样性可能是控制碳稳定和温室气体减排与生产力提高的关键因素。未来研究的重点是定量表征固碳中碳更新的关键环节, 同时需要加强对作物-土壤微生物相互作用对碳输入、转化和固定的影响及机理的研究。中国稻田土壤固碳与农业发展意义值得进一步重视。

**关键词** 碳循环; 土壤有机碳; 稻田; 气候变化; 生物多样性与生产力

**中图分类号** X2 S15 **文献标识码** A

当前, 随着联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第四次评估报告正式提交, 并因此获得 2007 年度诺贝尔和平奖, 以全球变暖为主要表现的全球气候急剧变化及其与不断增加的大气温室气体的关系已经被接受为无可争议的事实, 切实减少温室气体排放、增加碳汇成为缓解气候变化的首要任务<sup>[1]</sup>。促进陆地生态系统碳的固定及其稳定、减少温室气体排放已经被国际社会广泛接受为减缓气候变化的主要途径之一。关于中国土壤特别是农田土壤的固碳减排与应对气候变化的意义我们已有专门报告<sup>[2]</sup>。本文在简要回顾近年来关于土壤碳循环研究进展趋势的基础上, 讨论我国水稻土固碳研究的主要进展和存在问题, 提出今后的研究展望, 期望为今后的进一步研究提供参考。

## 1 关于土壤固碳与气候变化研究的国际趋势

最近 3 年多以来, 陆地生态系统碳循环与全球变化领域主要的研究热点包括: (1) 陆地生态系统

碳汇的现状、动态与未来的演变态势<sup>[3-4]</sup>; (2) 固碳与减排的长期效应及其生态系统服务功能的可持续性<sup>[5]</sup>; (3) 陆地生态系统对气候变化的反馈机制与生态系统生产力、稳定性的关系<sup>[6-7]</sup>。在研究方法学及技术途径上发展的主要趋势是: (1) 地球生物学作为方法学思路和途径越来越得到广泛的运用<sup>[8]</sup>; (2) 生态系统生物多样性与气候变化的相互作用越来越在全球变化研究中得到重视<sup>[9-10]</sup>; (3) 作为地球系统综合观测与监测体系的一部分, 长期的生态系统实验和试验与各系统间耦合模型的开发越来越作为全球变化研究的主要技术依托<sup>[11]</sup>; (4) 地下部生态系统过程与动态研究, 特别是土壤-植物-微生物的相互作用机制成为碳循环与气候变化关系机理研究的主要尺度<sup>[12]</sup>。

土壤碳循环研究主要是对土壤中有有机碳行为的研究 (因为无机碳的更新时间尺度太长)。近年来关于土壤有机碳性质、功能及其变化在全球变化中的意义有许多新的研究认识。土壤碳在全球气候变化中的作用实际上是有有机碳的生物地球化学循环 (大小、尺度、速率) 对气候变化的控制作用。因

\* 国家自然科学基金重点项目 (40231016) 和国际合作重大项目 (40270010092)、教育部重大项目 (2007) 资助

作者简介: 潘根兴 (1958~), 男, 浙江浦江人, 教授, 主要从事土壤碳循环与气候变化研究

收稿日期: 2008-05-16; 收到修改稿日期: 2008-06-01

此,它不但关系着土壤肥力,而且更重要的是关系着在全球气候变化和生物多样性发育上的服务功能<sup>[13]</sup>。Janzen<sup>[14]</sup>提出对有机质(碳)循环的研究,需要更多地注意其对全球生态系统的服务功能,正是基于这一点,全球对于有机农业的呼声不断高涨(有机农业提高了土壤的有机碳含量,同时促进了土壤的生物多样性等生态服务功能<sup>[15]</sup>)。当前,土壤有机质(碳)循环研究的两大代表性方面和重点是:(1)土壤碳库及其增长的潜力、碳汇效应;(2)土壤碳的稳定性与生物利用性及其对气候变化的反馈。为了增进陆地生态系统土壤碳汇,减缓全球气候变化,作为土壤有机碳循环研究的新领域))固碳土壤学应运而生<sup>[16 17]</sup>。概略地说,土壤碳循环与全球变化研究的主要热点和进展是:(1)在土壤有机碳动态与固碳潜力和趋势研究上,已经初步明确全球农业固碳与温室气体减排的自然总潜力(Total biophysical potential)高达 5 500~6 000 Mt CO<sub>2</sub>e q a<sup>-1</sup>,其中 90%来自减少土壤 CO<sub>2</sub>释放(即固定土壤碳),不足 10%可以通过其他温室气体的减排而达到。在地区分布上,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<sup>[18]</sup>。土壤固碳的有效期可达 25~40 a 不同管理下土壤固碳水平和速率有较大差异,免耕下固碳水平远高于其他管理下;草地较农田固碳的有效期限长,在农业上改变轮作(碳流通)较改变耕作(碳保护)固碳有效期限长<sup>[19]</sup>;(2)在土壤固碳机理与生物物理因素控制研究上,认识到土壤有机碳提高和增多来源于作物碳的输入和土壤的固定和稳定作用,不同的施肥管理下、大气 CO<sub>2</sub>浓度升高下有机碳的提高主要归结于前者;而免耕下的提高主要是因为团聚体的保护和稳定,其机制涉及土壤团聚体物理保护<sup>[20-23]</sup>,有机碳在土壤中的化学转化与稳定化<sup>[24]</sup>、与土壤矿物质的结合稳定(除了与黏粒结合保护作用<sup>[25]</sup>外,这种作用还包括土壤中氧化铁的键合保护<sup>[26 27]</sup>,并可能涉及新碳化合物被老碳的捕获<sup>[28 29]</sup>);(3)在土壤有机碳动态与生物区系动态及生物多样性发育的关系研究上,初步明确土壤微生物特别是根际土壤微生物区系的变化是调节积累新碳的进一步动态的主因<sup>[30]</sup>,这反过来影响碳循环对气候变化的反馈<sup>[31]</sup>。不同条件下土壤碳积累的差异不但影响微生物数量,可能更影响其功能群的变化<sup>[32]</sup>。例如 CO<sub>2</sub>升高试验下响应于碳的积累和 C/N 的提高,土壤中真菌数量明显增多,这反过来减缓了新碳的循环速率<sup>[31]</sup>。这也构成观察到的固碳下土壤生物多

样性及其生态系统服务功能的改善的原理<sup>[33]</sup>,有机农业下有机碳明显积累,生物多样性得到维持和提高,微生物功能群的丰富使这种农业模式具有高度可持续性<sup>[15]</sup>。故在生物多样性公约实施中,联合国粮农组织特别重视土壤生物多样性保持与可持续发展<sup>[34]</sup>。我国一些有机无机配合施肥下的稻田和旱地农田生态系统中固碳和生产力提高及其稳定性与生物多样性也呈现十分明显的耦合<sup>[35 36]</sup>(见后述)。因此,土壤固碳与土壤可持续性的密切耦联关系日益成为碳循环与全球变化)可持续发展多学科研究的活跃领域。

但是,关于土壤有机碳积累中碳库,特别是动力学碳库分配及其对气候变化的响应与反馈效应还存在很多不确定性,尤其是在有机质组分的化学结构及其生物学矿化潜力与温室气体释放潜力的关系的认识上有不一致的结果<sup>[17]</sup>。最近, Kemm it 等<sup>[37]</sup>研究认为,土壤本土有机质矿化不受土壤微生物生物量及其活性与区系组成的影响;同理, Vanha2 la 等<sup>[38]</sup>研究不同玉米种植历史的农田土壤有机碳的矿化,表明是老碳更灵敏地响应于升温下的微生物分解;不过,也有报道提出,活性碳库和稳定碳库对于升温的反应是相似的<sup>[39]</sup>。然而, Rinn a 等<sup>[40]</sup>应用土壤芯的田间长期培养方法,研究了添加秸秆对土壤微生物及有机碳矿化的影响,表明升温下土壤微生物生长明显得到促进,土壤中 DOC/DON 明显升高。他们认为,土壤微生物活性是影响全球变化中碳平衡的重要控制因素。然而,对于固碳中的新碳积累是否会因微生物分解的起爆效应而提高土壤有机质矿化而增加温室气体释放,至今没有一致的认识,这因采用单独土壤培养还是根际系统的培养而异<sup>[41, 42]</sup>,以及因野外长期试验还是实验室短期培养而异<sup>[40, 43, 44]</sup>。

## 2 国际农田土壤固碳过程、机制研究的前沿发展方向与趋势

### 2.1 大尺度土壤固碳水平、动态及控制因素的研究和 Meta Analysis 方法的应用

近 5 年来,将 Meta Analysis 方法用于分析不同尺度、不同条件下土壤有机碳动态变化的幅度与控制因素上得到了长足的发展。主要是针对欧美国家的一些主导农业因素,利用调查资料和长期试验资料进行多尺度、多因素统计分析,辨析不同因素对土壤固碳的整体影响与区域差异<sup>[45, 46]</sup>。West 和

Post<sup>[46]</sup>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, 评价了全球通过合理轮作和耕作措施可以促进土壤固碳的潜力; Ogle 等<sup>[47]</sup>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, 评价了不同的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。新近, West 和 Six<sup>[19]</sup>应用这种方法分析美国农田土壤的固碳速率、有效期与饱和容量问题。这种方法在认识土壤的固碳容量、评价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潜力的变化趋势上具有重要的价值。类似的仍将是今后一个时期土壤固碳研究的重要内容。我国学者黄耀和孙文娟<sup>[48]</sup>、吴乐知和蔡祖聪<sup>[49]</sup>应用这种方法分别分析和评价我国农田土壤近 20 年来的固碳趋势, 半定量地估计了我国土壤碳库的增长。新近, 采用类似方法, 对文献上农田土壤有机碳动态资料的统计分析, 我们得以定量揭示自土壤普查以来我国农田土壤表土有机碳库的增长态势<sup>[50]</sup>。

### 212 C、N 同位素技术与微生物分子和群落生态技术的偶联应用

同位素地球化学示踪技术与微生物生态分析技术被联合用于分析土壤 - 植物系统碳的迁移与转化, 特别是根际碳流与微生物利用, 也用来研究对不同组分和动力学碳库的微生物分解。自 Butler 等<sup>[30]</sup>发表了应用稳定性同位素<sup>13</sup>C 标记 - 磷脂脂肪酸 (PLFA) 技术研究根际碳流和碳基质利用的微生物生态差异, 从而认识到在不同的植物生长期, 利用根际碳沉积的微生物区系存在明显的动态变化以来, <sup>13</sup>C/<sup>15</sup>N 同位素标记与 PLFA 偶联分析广泛应用于研究土壤更新中微生物群落变化。Stammer 等<sup>[51]</sup>应用 GC2c2RMS (气相色谱仪 - 同位素质谱仪联用) 研究报道了瑞士一个长期试验地添加玉米秸秆和重金属胁迫下的微生物分解和 <sup>13</sup>C 标记的微生物 PLFA 组成变化, 表明对玉米秸秆输入和分解, 细菌较真菌敏感, 重金属胁迫下秸秆分解较慢。同样, Kandler 等<sup>[31]</sup>应用 <sup>13</sup>C2PLFA 技术研究 FACE 条件下植物 - 微生物相互作用, 通过真菌 <sup>13</sup>C PLFA 的增多而认识到 FACE 下碳基质的改变, 使微生物区系中真菌优势度提高, 从而推断 FACE 条件下碳循环速率可能减缓; Dijkstra 等<sup>[52]</sup>提出了微生物生物量碳同位素测定方法。不久, Schwartz 等<sup>[53]</sup>通过对微生物 DNA 提取技术的改进, 提出了测定微生物

DNA 同位素 C、N 的方法, 这种方法可能较微生物生物量 C、N 同位素测定的分辨率更高且更为可靠。自然和人工标记的 <sup>13</sup>C (<sup>15</sup>N) PLFA 技术可以用来研究土壤微生物对不同植物来源的碳基质的选择性利用、C23 和 C24 植物土壤有机碳的稳定性<sup>[53, 54, 56]</sup>。同位素探针技术还与有机碳组分分组技术 (例如 PyGCMS)、土壤酶分析技术联用, 研究土壤团聚体中碳基质分配与微生物区系变化及酶物质的分布以及与 <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> 同位素分析联用, 研究新碳输入下 (或根际沉积下) 土壤有机碳分解的起爆效应<sup>[56]</sup>。

### 213 作物 - 微生物相互作用作为农田土壤有机碳积累与稳定的主要驱动因素得到越来越多的研究和重视

目前主要是以根际为对象, 研究通过根系沉积的植物新鲜有机碳 (young C) 的输入、转化和分解以及伴随的微生物生态变化, 特别是 DOC 的输入和动态。Liang 等<sup>[56]</sup>采用盆栽方法通过 <sup>13</sup>C 稳定性同位素测定研究了玉米新碳在快库中的分布, 认为土壤中水溶性有机碳 (DOC) 和微生物碳 (SMBC) 是植物贡献的新碳的主要归宿。有研究表明, 输入土壤的 DOC 量的相对多寡与不同作物的根系生长的长度密度指数 (Root length density RLD) 有关<sup>[57]</sup>。关于植物贡献的 DOC 与土壤碳的关系, Janssen 等<sup>[58]</sup>研究认为, DOC 可能是代表土壤中快库碳固定的指标, 相似地, Franzluebbers 等<sup>[59]</sup>的研究提出, 较高的 POC/TOC 和较高的 POC/PON 有利于物理保护的土壤固碳。真菌菌根在利用根系新碳时分泌的 DOC 则有利于水稳性团聚体的形成, 被保护的有机碳含量增加<sup>[60]</sup>。但最近 Max 等<sup>[54]</sup>采用同位素 <sup>13</sup>C 探针技术研究植物根际沉积新碳的去向, 表明其主要贡献于微生物量碳、呼吸碳和转化为土壤本有机质, 而 DOC 并不主要来源于新碳。Butler 等<sup>[30]</sup>报道了应用 <sup>13</sup>C 标记技术研究不同微生物对光合产物根际沉积的利用, 表明在不同生长阶段植物根系沉积的光合产物的化学性质有异, 因而参与这些新碳的微生物种群 (包括细菌和真菌的相对比例) 发生变化。Bader 等<sup>[42]</sup>研究认为, 不同类型作物根系碳沉积的量和碳基质不同, 因而对根际土壤微生物区系的变化和碳基质的影响因作物而异, 但根系沉积均刺激了土壤微生物, 从而提高了根际和本体土壤的有机质矿化。Billings 和 Ziegler<sup>[61]</sup>在运用 <sup>13</sup>C 标记 PLFA 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, 分解较难分解有机碳

的细菌群落活性有增强的趋势。有机碳化学组分与结构对微生物利用影响的研究近年来有日益活跃的趋势。Leinweber等<sup>[62]</sup>对一个长期黑麦草单作农田不同施肥处理下有机碳分解研究认为,土壤有机质的化学组成及稳定性控制微生物呼吸分解和酶活性。而Fontaine等<sup>[63]</sup>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,在农田中微生物处于养分限制条件下,土壤的碳分解加速,碳库快速消滅。他们强调,在土壤碳固定研究中急需了解土壤-作物系统中碳输入与固碳过程间的微生物作用机理。

新近,开始关注同种作物不同的品种和基因型差异对土壤碳循环的影响。Kondo等<sup>[64]</sup>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 $90\text{ kg hm}^{-2}$ )下的田间试验,表明不同基因型的同位素分异较产量的分异更强,这种同位素分异在不同的水分和氮素水平下均存在。并且,籼稻的同位素差异较粳稻更明显。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较水分的影响更强。这种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。例如,Picard等<sup>[65]</sup>最近报道,将玉米的杂交母本与它们的杂交种比较,母本和杂交种根际微生物种群和丛枝菌根的产生量明显不同,这提出了与不同基因型碳基质选择性利用有关的微生物生理生态遗传问题。这些研究足以使科学家认识到,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。Liu等<sup>[66]</sup>通过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导致微生物区系的变化,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,因而影响有机质的更新与循环。Range & Castro等<sup>[67]</sup>运用 $^{13}\text{C}$ 脉冲标记技术研究了施石灰对草地植物光合作用和植物-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的影响。前述Butler等<sup>[30]</sup>的研究也表明,植物生长中由于输出碳源物质的演变诱导了微生物碳源利用的选择性,因而在不同的植物生长阶段,参与活跃有机碳更新的微生物种群表现出动态变化。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,对微生物在碳更新中的作用的了解正在进一步深入。

## 214 野外长期试验和观测正在日益作为农田土壤碳循环与全球变化研究的主要途径

发源于1884年在英国洛桑的土壤-农田生态系统长期试验曾经在土壤肥料、养分利用与高产管理实践等方面对农业发展作出了巨大贡献。今天看来,这些长期试验在土壤碳循环研究中也发挥着越来越明显的作用<sup>[68]</sup>。著名的Rotham2C模型就是在洛桑长期试验的土壤有机碳动态资料上研发的。许多关于全球和区域有机碳动态与土壤固碳容量、潜力和期限的估计来自对这些长期试验的统计和跨地域分析(cross-site study),例如West<sup>[19, 46]</sup>、Izauralde<sup>[69]</sup>等工作。长期试验代表了土壤-农作生态系统的长期和稳定的趋势,因此对于土壤碳循环的长期过程、动态及其生态系统机理研究来说,基于长期试验和观测的研究是十分关键的<sup>[68]</sup>。在分布于全球各大洲的600多个长期试验点(站)上,有许多关于作物生产力、土壤有机质与肥力、土壤碳库的演变的研究<sup>[70]</sup>。农业系统中土壤有机质的长期趋势、有机质与作物生产力以及生物多样性的关系、有机质积累的基本特征都是在长期试验条件下研究而认识的<sup>[71~73]</sup>。为了研究全球气候变化对农田系统碳循环的影响,诸如FACE、土壤或空气升温这样新的长期试验也在全球不同区域布设和进行观测,并开始研究土壤-植物(作物)-微生物相互作用下的碳循环<sup>[30, 31, 44]</sup>。最近几年来,国内学者越来越多地研究长期试验下土壤-作物系统碳积累、生产力以及生物多样性变化等特征(见后述)。当前,国际上试图通过长期试验的网络化推动野外和长期效应的土壤碳循环研究<sup>[74]</sup>。

## 3 中国稻田土壤固碳过程与机理的研究认识

水稻土是我国特色的人为土壤类型<sup>[75]</sup>,而稻作农业被国内农学家和土壤学家共认是生产能力高、土壤质量相对较好的我国特色的农业资源利用方式<sup>[76]</sup>。第二次全国土壤普查时水稻土面积为近 $3 \times 10^7\text{ hm}^2$ 。稻田农业仍然是保证我国粮食安全的主要支撑。在我国农田土壤中,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<sup>[77~79]</sup>。因此,稻田农业固碳与碳循环研究不仅关系到我国农业应对气候变化的能力建

设,而且与我国未来粮食安全和整个农业体系的可持续发展有关。关于稻田固碳研究的主要进展和问题如下:

(1) 对水稻土碳库与有机碳固定潜力已有充分的研究和积累。有许多学者利用第二次土壤普查资料研究和估计了我国水稻土(稻田土壤)的有机碳密度与储量<sup>[80~83]</sup>。已经明确认识到,水稻土具有高的碳密度及显著的固碳能力。水稻土是我国耕地十大土类中面积最大,而唯一一个耕层有机质平均值高达  $25 \text{ g kg}^{-1}$  的耕作土壤,平均表土碳密度为  $46191 \pm 25173 \text{ t hm}^{-2}$ <sup>[77]</sup>,而全国耕作土壤的平均表土碳密度为  $38141 \pm 31115 \text{ t hm}^{-2}$ ,旱地为  $35187 \pm 32177 \text{ t hm}^{-2}$ <sup>[79]</sup>,水稻土高出旱地耕作土壤约  $11 \text{ t hm}^{-2}$ 。近 20 年来,水稻土中普遍存在固碳趋势<sup>[78, 81~84]</sup>,且在南方大于北方<sup>[81]</sup>。李忠佩等对江西红壤丘陵水稻土<sup>[85]</sup>、吴金水课题组对湖南丘陵和洞庭湖湿地<sup>[86]</sup>和我们对太湖地区县域<sup>[84]</sup>等的调查统计研究以及区域尺度的不同利用的农田的比较统计<sup>[87~89]</sup>均充分表明,不同耕作利用下以稻田土壤有机质水平较高,固碳效应显著且速率较旱地快。试验研究和模型的研究均认识到水稻土快速的有机碳积累与水稻生产能力的提高而增加了作物碳对土壤的输入有关<sup>[48]</sup>。当然,施肥、土壤类型、耕作制度和其他农田管理均可以很大程度上影响和调控水稻土的固碳强度,且可以调控的幅度还高于旱地<sup>[90~95]</sup>,因此,水稻土固碳与减排较旱地农田土壤具有更大的潜力。

这方面的研究还表现在对水稻土固碳饱和(固碳容量)水平的初步探索。一些长期试验资料显示,南方水稻土表土有机碳趋近于  $26 \sim 28 \text{ g kg}^{-1}$ ,秸秆还田下特别是免耕下有机碳饱和水平可能明显提高<sup>[84~86, 88, 95~98]</sup>,在云南高产水稻土表土有机碳高达  $35 \text{ g kg}^{-1}$ <sup>[81]</sup>。李忠佩等<sup>[85]</sup>对江西红壤地区的调查表明当前的平衡值约  $20 \text{ g kg}^{-1}$ ;我们对南方几个长期试验稻田土壤的 Cross-site 研究表明,其物理饱和和量可达  $26 \text{ g kg}^{-1}$ <sup>[99]</sup>,这恰好与我们通过对全国有机碳动态资料的 Meta Analysis 分析而提出的稻田土壤有机碳饱和值  $27 \text{ g kg}^{-1}$  相当<sup>[50]</sup>。这些结果高于尹云峰等<sup>[100]</sup>对华北平原旱地的平衡值 ( $< 10 \text{ g kg}^{-1}$ ) 估计,也明显高于应用 DNDC 模拟的南方地区农田土壤有机碳饱和值  $10 \sim 15 \text{ g kg}^{-1}$ <sup>[101]</sup>。

关于土壤表土固碳水平与全土固碳水平的关

系、固碳中碳库的土壤分配与分布的关系还很少报道。我们对太湖地区三种典型的发生类型(潴育型、侧渗型、脱潜型)的土壤碳库水平与土壤剖面分配的研究表明,水稻土碳库主要 ( $60\% \sim 70\%$ ) 分布在表土  $30 \text{ cm}$  深度,随着有机碳的积累,有机碳的表土分配提高<sup>[102]</sup>。而 20 a 的长期不同肥料处理下黄泥土有机碳密度差异仅表现在表土,而深层土壤差异不显著<sup>[81]</sup>。因此,由表土碳密度推测估计全土的碳密度时,会因土壤类型和有机碳水平的差异而存在更大的不确定性;表土碳库增加与全土库量增加的关系对于合理估计稻田固碳减排的总潜力是十分关键的,需要对不同的土壤发生类型的水稻土、不同的农作管理实践(轮作与耕作、施肥、栽培品种的沿革)的影响作进一步的定量解析,以合理估计稻田土壤全土固碳潜力,特别是深层固碳的潜力。

(2) 在团聚体水平上对水稻土固碳机理进行了多方面探讨。近几年来,对南方红壤性水稻土、太湖地区水稻土、四川紫色盆地水稻土在不同施肥和耕作轮作下的有机碳积累与团聚体分布有很多的研究。作为一种共同的趋势,稻田有机碳积累伴随着粗团聚体的形成和增多,而细团聚体 ( $< 250 \text{ Lm}$ ) 相应减少,新积累的碳主要赋存于  $> 250 \text{ Lm}$  团聚体<sup>[99, 102~108]</sup>,特别是活性较高的颗粒态有机碳 (POM) 主要存在于较粗的团聚体<sup>[98, 103, 108~110](1)</sup>。这就认识到新碳在较粗团聚体中的物理保护,因为这些团聚体中微生物量和酶活性明显高于较细的粉砂级团聚体<sup>[110, 111]</sup>。对江汉平原不同利用下土壤的团聚体与有机碳积累的比较也表明,稻田土壤的团聚体有机碳物理保护能力高于旱地土壤<sup>[112]</sup>。不同土壤发生类型、不同管理方式间团聚体有机碳的积累量具有明显差异。对南方三种代表性水稻土 20 a 以上长期试验下团聚体有机碳分配进行了对比研究,红壤性水稻土、紫色水稻土和太湖地区典型的潴育型水稻土(黄泥土)中,良好施肥和耕作管理下有机碳的物理保护能力以红壤性水稻土为最强,紫色水稻土形成和稳定粗团聚体的能力较弱<sup>[99]</sup>。进一步进行团聚体中有机碳结合形态的研究发现,粗团聚体中积累的有机碳化学活泼性较高 (LOC/TOC 比值较大),而较细的团聚体中则较低。不同土壤对比,同样是粗团聚体中,红壤水稻土中铁铝氧化物结合态占优势,而紫色水稻土中以

钙结合态明显较高,它们分别与 LOC/TOC 比值成负的和正的相关关系。而良好管理下积累的新碳以氧化铁结合态较多<sup>[113]</sup>。这些结果使我们认识到,作物根系输入新碳首先通过粗团聚体的物理保护而积累,进而经受团聚体内不同的化学保护作用使积累有机碳得到稳定,水稻土中活跃的氧化铁在键合和稳定新碳中可能有重要的作用。这种作用在不同土壤中的差异会表现为利用不同团聚体有机碳的微生物区系的差异及相应微生物矿化潜力的差异<sup>[114 115]</sup>。特别地,红壤性水稻土 DCB 浸提氧化铁的稳定性可能是我们观察到的红壤性水稻土有机碳积累较快、矿化潜力较低且温度敏感性较弱的原由<sup>(2)</sup>。但是,对于新碳的不同组分及其在团聚体的分配和经受的化学变化的研究很少。对团聚体颗粒态有机碳进行 NMR 波谱研究初步表明,团聚体颗粒态基本碳骨架结构相似,以烷氧碳为主,良好施肥和耕作下芳香碳增多,即芳构化程度提高<sup>[116]</sup>。相似地,吴金水课题组在湖南稻田中也观察到,有机碳积累中虽然活性有机碳比例提高,但芳香化合物显得增多<sup>[117]</sup>。邵景安等<sup>[118]</sup>应用热裂解和红外光谱法研究长期免耕下积累的有机碳的化学结构的变化,同样观察到垄作免耕下有机碳的芳构化和缩合度升高,而氧化稳定性增强。这些研究相互印证了稻田固碳过程中有机碳化学结构的稳定化趋势。

(3) 对稻田土壤积累新碳的生物可利用性与矿化稳定性积累了初步的认识。积累新碳的生物学可利用性关系到稻田土壤的生物活性与固碳减排的实效。国内黄耀、吴金水课题组较早开展了稻田土壤呼吸与 CO<sub>2</sub> 释放的实验室培养和野外观测研究<sup>[91 119~121]</sup>。近来开始用涡度相关塔观测稻田土壤呼吸与 CO<sub>2</sub> 通量,初步揭示了稻田土壤的碳汇效应<sup>[91]</sup>。李玲等<sup>[121]</sup>采用 <sup>14</sup>C 标记秸秆研究新碳对农田土壤有机碳的激发效应 (Priming effect), 尽管不能忽视其存在<sup>[119]</sup>, 但明显弱于旱地<sup>[121]</sup>。实验室培养研究表明,水稻土土壤好气呼吸与有机碳矿化速率及升温敏感性低于森林土壤和旱地<sup>[122 123]</sup>。尽管土壤中氮素水平常常是影响土壤呼吸的最活跃因子<sup>[119 123]</sup>, 稻田的高土壤有机碳水平 (因而全氮水平

也可能较高)与呼吸矿化并不呈线性关系,不同施肥下有机碳矿化速率反而是积累有机碳低的土壤中高,有机无机配合施肥不但促进了碳积累,而且降低了土壤呼吸与排放通量<sup>[115 122]</sup>,这与孟磊等<sup>[96]</sup>、尹云峰等<sup>[100]</sup>对华北平原潮土施有机肥与不施有机肥相比有机碳含量提高而呼吸降低的结果一致。水稻土积累有机碳矿化稳定性较高,还从其呼吸和 CO<sub>2</sub> 释放与相应的湿地土壤的对比得到旁证。湿地土壤排水或开垦后呼吸释放强烈升高<sup>[124]</sup>。我们最近发现,长江中下游湖泊湿地的有机碳矿化潜力数倍于其开垦后数十年的稻田<sup>(3)</sup>,这可能是湿地土壤在开垦 10 年内有机碳快速损失<sup>[125 126]</sup>和湿地土壤排水后土壤呼吸强烈而产生很高的 CO<sub>2</sub> 通量的原因<sup>(4)</sup>。看来,这些湿地起源的水稻土也具有了某种碳保护和稳定机制。这些认识从另一个侧面佐证了水稻土有机碳具有较高的稳定性,因而能够表现出较快和较稳定的积累。这可能是我国稻田农业在应对气候变化的固碳减排上的特殊优越性。

另外,无论是好气还是厌气培养下,稻田土壤有机碳矿化的动力学表现为一个极短的、速率递增的高矿化阶段,继之是一个较长的、速率递减的强矿化阶段和一个持续稳定的低矿化阶段<sup>[115 123]</sup>;通常,第一个阶段持续 1~3 d 其矿化量与 DOC、易氧化碳 (LOC) 有关,而其他阶段与活性有机碳关系不密切<sup>[115 122 123]</sup>。对于红壤性水稻土的好气矿化而言,不是总有机碳而是有机碳的活性分数 (LOC/TOC) 与总矿化速率有关<sup>[115]</sup>。这些结果使我们联想到水稻土有机碳积累特征不仅可以用碳的库比例 (如微生物商、呼吸商率和代谢商),而且可能通过一些碳组分分配及其矿化的动力学库间的关系来表征。

(4) 在水稻土固碳与生物区系、多样性的发育和演变以及生态系统服务功能的变化等方面的探索日益增多。近年来越来越关注固碳过程中生物特别是微生物区系的变化及其生态系统功能的演变。较多的研究是注意到土壤的微生物活性、微生物商的变化,以及土壤中酶活性的变化。不同施肥、耕作的长期试验均表明,良好的管理实践,特别

(2) Zheng J F, Zhang X H, Li L Q, et al. Influence of long-term fertilization on CO<sub>2</sub> production and temperature dependence of aerobic mineralization in a Chinese red earth paddy topsoil. 未发表

(3) 张祥霖, 郑聚锋, 林凡, 等. 皖江湿地与开垦后稻田有机碳矿化潜力比较. 未发表

(4) 郑聚锋, 潘根兴, 吴新民, 等. 安徽升金湖湿地土壤呼吸日动态及其温度效应. 未发表

是有机无机配合施肥下微生物量、土壤酶活性均表现为明显的提高, 这是土壤肥力和质量提高的基础<sup>[127]</sup>。刘守龙等<sup>[128]</sup>比较了中亚热带不同地域和几个不同的长期试验的有机碳与微生物量碳的关系, 相应于有机碳的积累水平, 稻田土壤的微生物量商 (SMBC/TOC) 显著高于旱地和其他利用方式。因此提出稻田土壤具有较高微生物量维持能力。对太湖地区一个长期不同肥料处理下的典型水稻土)) 黄泥土进行了土壤和微团聚体的微生物区系分布研究, 不同的长期施肥实践在改变土壤碳积累过程中, 微生物/土壤动物和杂草等生物区系发生了明显分异, 固碳和有机碳积累提高了真菌/细菌比<sup>(5)</sup>, 提高了细菌的多样性和动物/杂草的多样性<sup>[35, 129, 130]</sup>。同时, 发现稻田生产力及其稳定性和固碳速率与生物多样性存在良好的耦合关系<sup>[35]</sup>。这些结果与尹力初等<sup>[131]</sup>对黄淮海平原潮土的杂草多样性在不同的有机无机施肥处理间的差异和生产力特征的差异类似。最近, 张逸飞等<sup>[132]</sup>注意到不同施肥长期试验下微生物功能群和酶活性功能在不同施肥处理间的差异, 提出功能群和酶活性的差异可能是不同施肥生产力和土壤肥力质量的表征指标; 太湖地区一个长期不同施肥试验下稻田甲烷氧化活性与产甲烷菌多样性成反比<sup>[133]</sup>; 另外, 对一个红壤性水稻土长期不同施肥下土壤的好气和厌气培养下的矿化研究发现, 厌气培养下土壤有机碳矿化率显著低于好气条件, 且两种条件下土壤有机碳矿化率对温度敏感性的影响因素不同, 好气条件下  $Q_{10}$  与游离氧化铁显著相关, 而在淹水条件下则与微生物商呈显著相关, 这提示稻田土壤土著微生物功能群对厌气条件的适应性<sup>(6)</sup>。不同粒径团聚体微生物区系的研究也提示, 新碳积累的粗团聚体微生物生物量碳明显富集, 产甲烷菌多样性较高, 而老碳富集的 < 2 Lm 团聚体颗粒组中细菌多样性较高, 产甲烷细菌种类较少, 多样性低<sup>[114]</sup>; 这些结果初步揭示了有机碳积累中不同粒径土壤团聚体组成发生变化, 导致微生物生境发生变化和随之的微生物多样性的变化, 从而影响有机碳的生物学稳定性(矿化与温室气体产生潜力)。因此, 稻田固碳对于土壤质量的提高和稻作高产稳产是双赢的。这在我国农业与全球变化上有重要的意义。

#### 4 农田特别是稻田土壤固碳研究存在的问题与展望

综合以上的研究进展和认识, 我们可以勾勒出稻田土壤的固碳机理可能是: 团聚体有机碳固定中首先是输入新碳的物理保护, 进一步经受化学转化与结构稳定化, 同时因碳库性质和分配的改变也导致团聚体尺度微生物生境的多样化和微生物区系演变、功能群及酶活性等肥力服务功能的变化, 促进多样性生物区系的发展, 从而稳定了生态系统过程。因而, 有机碳固定的机制可以概括为粗团聚体物理保护 - 化学结合与稳定 - 微生物区系与功能群适应性等三个相互作用和相互依存的过程。其不同条件下的变化是稻田有机碳动态的实质。不过, 在稻田土壤固碳过程与机理的认识上, 还存在如下问题: (1) 观察到的表土有机碳积累与全土碳分配、团聚体分配的关系如何? 如何定量表征固碳容量与碳库关系? (2) 土壤新碳积累的分配与作物输入、转化、保护与稳定等几个碳转化环节的定量关系如何还不清楚, 特别是碳固定中作物输入新碳的组分、结构及其与氧化与矿化稳定性的关系缺乏了解; (3) 有机碳积累中团聚体分配与微生物生境的改变, 如何产生适应性和多样性微生物区系的演替, 有机碳积累与观察到的矿化与温室气体产生潜力的非线性关系, 是否是由于新碳的稳定性与微生物区系改变下分解活性的变化有关, 且相互间是何种关系为主导, 这种关系随土壤发生类型和管理等条件的改变会产生何种变化? 有机碳积累中生物多样性的变化与优势种群和适应性种群的分布和活性又是什么关系, 功能群变化与微生物量的变化是否耦合? (4) 水稻生产中高产的新品种和新基因型对作物 - (根际) 土壤 - 微生物间的碳流通以及适应性微生物种群变化存在什么影响? 这种影响是否会影响到固碳速率与微生物分解和温室气体产生与排放强度?

我们认为, 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。我国的稻作农业正在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

(5) 牛文静, 张平究, 郑聚锋, 等. 长期不同施肥对太湖地区水稻土微生物区系与功能活性的影响. 未发表

(6) 郑聚锋. 长期不同施肥条件下南方代表性水稻土土壤有机碳矿化与  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  产生研究. 南京农业大学博士学位论文, 2007

样化(由 20 世纪中期较普遍的稻 - 稻轮作向稻 - 油、稻 - 麦、稻 - 菜和稻 - 休闲等多种轮作制的转变)和新品种与基因型的推广等均将影响稻田土壤的固碳过程及其固碳容量与服务功能。阐明和辨析这些影响的强度及其机制, 无论对于固碳减排还是稻作农业可持续发展均具有极重要的意义。

## 参考文献

- [ 1 ] UNFCCC, Fact Sheet The Need for Mitigation. <http://unfccc.int/press/items/2794.php> 2008
- [ 2 ] 潘根兴. 中国土壤有机碳库量及其演变与应对气候变化. 气候变化研究进展, 2008 在印. Pan G X. On the soil organic carbon pool: its the evolution and the significance in climate change mitigation of China (In Chinese). *Advances in Climate Change Research* 2008, in press
- [ 3 ] Houghton R A. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Global Change Biology*, 2005, 11: 945~ 958
- [ 4 ] Raupach M P, Rayner P J, Barrett D J, et al. Model data synthesis in terrestrial carbon observation methods: data requirements and data uncertainty specifications. *Global Change Biology* 2005, 11: 378~ 397
- [ 5 ] Adams JM, Piovoso G. Long series relationships between global interannual CO<sub>2</sub> increment and climate: Evidence for stability and change in role of the tropical and boreal temperate zones. *Chemosphere*, 2005, 59: 1595~ 1612
- [ 6 ] Luo Q Y, Belotti W, Williams M, et al. Risk analysis of possible impacts of climate change on South Australian wheat production. *Climatic Change* 2007, 85: 89~ 101
- [ 7 ] Worrall F, Burt T, Adanson J, et al. Predicting the future carbon budget of an upland peat catchment. *Climatic Change*, 2007, 85: 139~ 158
- [ 8 ] Sotta E D, Velkcamp E A, Guimaraes B R, et al. Landscape and climatic controls on spatial and temporal variation in soil CO<sub>2</sub> efflux in an Eastern Amazonian Rain forest, Caxiuanã, Brazil. *Forest Ecology and Management* 2006, 237: 57~ 64
- [ 9 ] The Royal Society. Biodiversity-climate interaction: Adaptation, mitigation and human livelihoods. [www.royalsoc.org](http://www.royalsoc.org) 2007.
- [ 10 ] Bamosky A D. Climatic change, refugia and biodiversity: Where do we go from here? An editorial comment. *Climatic Change* 2008, 86: 29~ 32
- [ 11 ] Nature Editorial. Patching together a world view. *Nature*, 2007, 450: 761
- [ 12 ] Johnston C A, Groffman P, Breshears D, et al. Carbon cycling in soil. *Frontiers in Ecology and the Environment* 2004, 2 (10): 522~ 528
- [ 13 ] Manlay R, Feller C, Swift M J. Historical evolution of soil organic matter concepts and their relationships with the fertility and sustainability of cropping systems. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 2007, 119: 217~ 233
- [ 14 ] Janzen H H. The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it? *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38: 419~ 424
- [ 15 ] Mader A, Fleberbach D, Dubois L, et al. Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science*, 2002, 296: 1694~ 1697
- [ 16 ] McCarl B A, Metting F B, Rice C. Soil carbon sequestration. *Climatic Change* 2007, 80: 1~ 3
- [ 17 ] 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. *土壤学报*, 2007, 44 (2): 327~ 337. Pan G X, Zhou P, Li L Q, et al. Core issues and research progresses of soil science of C sequestration (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica* 2007, 44 (2): 327~ 337
- [ 18 ] IPCC Climate Change 2007 Mitigation. Intergovernmental Panel on Climate Change 2007, 63~ 67
- [ 19 ] West T O, Six J. Considering the influence of sequestration duration and carbon saturation on estimates of soil carbon capacity. *Climatic Change* 2007, 80: 25~ 41
- [ 20 ] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 2099~ 2103
- [ 21 ] 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
- [ 22 ] Unger P W. Aggregate and organic carbon concentration in relationships of a Torrenitic Paleosol. *Soil and Tillage Research*, 1997, 42: 95~ 113
- [ 23 ] Pullman M M, Marinissen J C Y. Physical protection of mineralizable C in aggregates from long-term pasture and arable soil. *Geoderma* 2004, 120: 273~ 282
- [ 24 ] Mukuta R, Kleber M, Margarets T, et al. Stabilization of soil organic matter: Association with minerals or chemical recalcitrance. *Biogeochemistry* 2006, 77: 25~ 56
- [ 25 ] 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): 1573~ 1581
- [ 26 ] Osher L J, Matson P A, Amundson R. Effect of land use change on soil carbon in Hawaii. *Biogeochemistry*, 2003, 65: 213~ 232
- [ 27 ] Kêkê Knabner J, Chenu C, Kandeler E, et al. Biological and physicochemical processes and control of soil organic matter stabilization and turnover. *European Journal of Soil Science* 2006, 57 (4): 425
- [ 28 ] 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 <sup>13</sup>C distribution and CP2 MAS NMR spectra. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51: 583~ 594
- [ 29 ] Piccolo A, Spaccini R, Nieder R, et al. Sequestration of a biologically labile organic carbon in soils by humified organic matter. *Climate Change*, 2004, 67: 329~ 343
- [ 30 ] Butler J L, Williams M A, Bottomley P J, et al. Microbial community dynamics associated with rhizosphere carbon flow. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, 69(11): 6793~ 6800



- [ 31 ] Kandel E, Mosier A R, Morgan J A, et al. Transient elevation of carbon dioxide modifies the microbial community composition in a semiarid grassland. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40( 1): 162~ 171
- [ 32 ] Grandy A S, Robertson G P. Land use intensity effects on soil organic carbon accumulation rates and mechanisms. *Ecosystems*, 2007, 10: 59~ 74
- [ 33 ] Catovsky S, Bradford M A, Hector A. Biodiversity and ecosystem productivity: implications for carbon storage. *Oikos*, 2002, 97( 3): 443~ 448
- [ 34 ] UNEP. Convention on Biological Diversity. Agricultural biodiversity. Soil biodiversity and sustainable agriculture. Paper submitted by the Food and Agriculture Organization of the United Nations. UNEP/CBD/SBSTTA/7/1. [www.cbd.int/doc/mec2ings/sbstta/sbstta207/information/sbstta2072en2112en.doc](http://www.cbd.int/doc/mec2ings/sbstta/sbstta207/information/sbstta2072en2112en.doc)
- [ 35 ] 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土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
- [ 36 ] 冯伟, 潘根兴, 强胜, 等. 长期不同施肥方式对稻油轮作田土壤杂草种子库多样性的影响. *生物多样性*, 2006, 14( 6): 461~ 469. Feng W, Pan G X, Qiang S, et al. Influence of long-term fertilization on soil seed bank diversity of a paddy soil under rice/rape rotation ( In Chinese). *Biodiversity Science*, 2006, 14( 6): 461~ 469
- [ 37 ] Kemmitt S J, Lanyon C V, Waite I S, et al. Mineralization of native soil organic matter is not regulated by the size, activity or composition of the soil microbial biomass: A new perspective. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40( 1): 61~ 73
- [ 38 ] Vanhala P, Karhu K, Tuomi M, et al. Old soil carbon is more temperature sensitive than the young in an agricultural field. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39( 11): 2 967~ 2 970
- [ 39 ] Fang C M, Smith P, Moncrieff J B, et al. Similar response of labile and resistant soil organic matter pools to changes in temperature. *Nature*, 2005, 433: 57~ 59
- [ 40 ] Rima J, Wamang B, Meyers P A, et al. Combined organic and inorganic geochemical reconstruction of paleodepositional conditions of a Pliocene sapropel from the eastern Mediterranean Sea. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 2007, 66( 11): 1 969~ 1 986
- [ 41 ] H<sup>3</sup>ggblm M M, Youngster L K G, Somsamak P, et al. Anaerobic biodegradation of methyl tertbutyl ether (MTBE) and related fuel oxygenates. *Advances in Applied Microbiology*, 2007, 62: 1~ 20
- [ 42 ] Bader N E, Cheng W. Rhizosphere effect of populus fromontii roots masks the temperature sensitivity of soil organic carbon respiration. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39: 600~ 606
- [ 43 ] Ståhl L, Christensen T R. Below ground carbon turnover and greenhouse gas exchanges in a subarctic wetland. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39: 1 689~ 1 698
- [ 44 ] Pendall E, King J Y. Soil organic matter dynamics in grassland soils under elevated CO<sub>2</sub>: Insights from long-term incubations and stable isotopes. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39( 10): 2 628~ 2 639
- [ 45 ] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8: 345~ 360
- [ 46 ] West T O, Post W M. Soil organic carbon sequestration by tillage and crop rotation: A global data analysis. *Soil Sci Soc Am J*, 2002, 66: 1 930~ 1 946
- [ 47 ] 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
- [ 48 ] 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
- [ 49 ] 吴乐知, 蔡祖聪. 基于长期试验资料对中国农田表土有机碳含量变化的估算. *生态环境*, 2007, 16( 6): 1 768~ 1 774. Wu L Z, Cai Z C. Estimation of the change of topsoil organic carbon of croplands in China based on long-term experimental data ( In Chinese). *Ecology and Environment*, 2007, 16( 6): 1 768~ 1 774
- [ 50 ] Xu X W, Smith P, Pan G X, et al. Quantifying topsoil organic carbon increase, duration and potential capacity in china's crop-land by monitoring data over 1985~ 2006. *Global Change Biology*, 2008, in press
- [ 51 ] Stemmer M, Watzinger A, Blochberger K, et al. Linking dynamics of soil microbial phospholipid fatty acids to carbon mineralization in a <sup>13</sup>C natural abundance experiment. Impact of heavy metals and acid rain. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39( 12): 3 177~ 3 186
- [ 52 ] Dijkstra P, Ishizu A, Doucet R R, et al. <sup>13</sup>C and <sup>15</sup>N natural abundance of the soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38: 3 257~ 3 266
- [ 53 ] Schwartz E, Błasiewicz S, Richard D, et al. Natural abundance of <sup>15</sup>N and <sup>13</sup>C of DNA extracted from soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39( 12): 3 101~ 3 107
- [ 54 ] Williams M A, Myrold D D, Bottomley P J. Carbon flow from <sup>13</sup>C<sub>2</sub>labeled clover and ryegrass residues in to a residue-associated microbial community under field conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39: 819~ 822
- [ 55 ] Vågen T G, Wash M G, Shepherd K D. Stable isotopes for characterization of trends in soil carbon following deforestation and land use change in the highlands of Madagascar. *Geoderma*, 2006, 135: 133~ 139
- [ 56 ] 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
- [ 57 ] Piper A, Erich M S, Porter G A, et al. Root growth effects on soluble C and P in manured and nonmanured soils. *Plant and Soil*, 2006, 283: 353~ 366
- [ 58 ] Janssens A, Lankreijer H, Matteucci G, et al. Productivity over-

- shadows temperature in deterring soil and ecosystem respiration across European forests. *Global Change Biology*, 2001, 7(3): 269~ 278
- [ 59 ] Franzluebbers A J, Stuedemann J A. Particulate and nonparticulate fractions of soil organic carbon under pastures in the Southern Piedmont USA. *Environmental Pollution*, 2002, 116: 53~ 62
- [ 60 ] Caravaca F, Aguacil 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, 89(1): 1~ 5
- [ 61 ] Billings S A, Ziegler S E. Linking microbial activity and soil organic matter transformations in forest soils under elevated CO<sub>2</sub>. *Global Change Biology*, 2005, 11: 203~ 212
- [ 62 ] Leinweber P, Jandl G, Baum C, et al. Stability and composition of soil organic matter control respiration and soil enzyme activities. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40: 1496~ 1505
- [ 63 ] Fontaine S, Bardoux G, Abbadie L, et al. Carbon input to soil may decrease soil carbon content. *Ecology Letters*, 2004, 7: 314~ 320
- [ 64 ] 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
- [ 65 ] Picard C, Baruffa E, Bosco M. Enrichment and diversity of plant-probiotic microorganisms in the rhizosphere of hybrid maize during four growth cycles. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(1): 106~ 115
- [ 66 ] 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
- [ 67 ] Range Castro J J, Prosser J I, Scrimgeour C M, et al. Carbon flow in upland grassland. Effect of liming on the flux of recently photosynthesized carbon to rhizosphere soil. *Global Change Biology*, 2004, 10: 2100~ 2108
- [ 68 ] Richter D, Hofmocker B, Callahan M A, et al. Long-term soil experiments. Keys to managing earth's rapidly changing ecosystems. *Soil Sci Soc Am J*, 2007, 71: 266~ 279
- [ 69 ] Izaurralde R C, Williams J R, McGill W B, et al. Simulating soil C dynamics with EPIC: Model description and testing against long-term data. *Ecological Modelling*, 2006, 192: 362~ 384
- [ 70 ] Center on Global Change. Duke University. Long-term soil soil system studies. <http://luse.env.duke.edu/db/inventory/luse> 2008
- [ 71 ] Davea D, Dobemann A, Ladhaa J K. Do organic amendments improve yield trends and profitability in intensive rice systems? *Field Crops Research*, 2003, 83: 191~ 213
- [ 72 ] Blanco Canqui H, Lal R. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2004, 23(6): 481~ 504
- [ 73 ] Paul E A, Collins H P, Leavitt S W. Dynamics of resistant soil carbon of midwestern agricultural soils measured by naturally occurring <sup>14</sup>C abundance. *Geoderma*, 2001, 104: 239~ 256
- [ 74 ] 潘根兴. 全球土壤变化暨生态系统长期试验国际研讨会侧记. *地球科学进展*, 2008, 23(2): 219~ 220. Pan G X. Report of the workshop on global soil change and long-term ecosystem experiments (In Chinese). *Advances in Earth Science*, 2008, 23(2): 219~ 220
- [ 75 ] 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. *Chinese Soil Taxonomic Classification: Theory, Methods and Practices* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1999. 109~ 194
- [ 76 ] 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. On the indispensable role of rice cultivation in sustainable development in area with developed economy of South China (In Chinese). *Science and Technology Review*, 2004(3): 42~ 45
- [ 77 ] 潘根兴, 赵其国, 蔡祖聪. 5京都市议定书6生效后我国耕地土壤碳循环研究若干问题. *中国基础科学*, 2005, 7(2): 12~ 18. Pan G X, Zhao Q G, Cai Z C. Issues on C cycling studies of cropland soil of China in commitment to Kyoto Protocol (In Chinese). *China Basic Science*, 2005, 7(2): 12~ 18
- [ 78 ] Pan G X, Li L Q, Zhang Q, et al. Organic carbon stock in topsoil of Jiangsu Province, China, and the recent trend of carbon sequestration. *Journal of Environmental Sciences*, 2005, 17(1): 1~ 7
- [ 79 ] Song G H, Li L Q, Pan G X. Topsoil organic carbon storage of China and its loss by cultivation. *Biogeochemistry*, 2005, 74: 47~ 62
- [ 80 ] 金峰, 杨浩, 蔡祖聪, 等. 土壤有机碳密度及储量的统计研究. *土壤学报*, 2001, 38(4): 523~ 528. Jin F, Yang H, Cai Z C, et al. Calculation of density and reserve of organic carbon in soils (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(4): 523~ 528
- [ 81 ] Pan G X, Li L Q, Wu L S, et al. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils. *Global Change Biology*, 2003, 10: 79~ 92
- [ 82 ] Liu Q H, Shi X Z, Weindorf D C. Soil organic carbon storage of paddy soils in China using the 1B1, 00Q, 000 soil database and their implications for C sequestration. *Global Biogeochem Cycles*, 2006, 20: GB3024. doi: 10.1029/2006GB002731
- [ 83 ] Xie Z B, Zhu J P, Liu G, et al. Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s. *Global Change Biology*, 2007, 13: 1989~ 2007
- [ 84 ] 张琪, 李恋卿, 潘根兴等. 近20年来宜兴市域水稻土有机碳动态及其驱动因素. *第四纪研究*, 2004, 24(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, 24(2): 236~ 242
- [ 85 ] 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 C content at steady state and potential of C sequestration of paddy soils in subtropical China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1): 46~ 52
- [ 86 ] 刘守龙, 童成立, 吴金水, 等. 稻田土壤有机碳变化的模拟: SNC模型检验. *农业环境科学学报*, 2006, 25(5): 1228~

- 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 Agro-Environment Science*, 2006, 25(5): 1 228~ 1 233
- [ 87 ] 程先富, 史学正, 于东升, 等. 江西兴国县农田土壤固碳潜力 20 a 变化研究. *应用与环境生物学报*, 2007, 13(1): 37~ 40. Cheng X F, Shi X Z, Yu D S, et al. Change in carbon sequestration potential of cropland soil for 20 years in Xingguo county of Jiangxi, China (In Chinese). *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2007, 13(1): 37~ 40
- [ 88 ] 许信旺, 潘根兴, 侯鹏程. 不同土地利用对表层土壤有机碳密度的影响. *水土保持学报*, 2005, 19(6): 193~ 200. Xu X W, Pan G X, Hou P C. Impact of different land use on topsoil organic carbon density in Anhui province, China (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(6): 193~ 200
- [ 89 ] 许泉, 芮雯奕, 何航, 等. 不同利用方式下中国农田土壤有机碳密度特征及区域差异. *中国农业科学*, 2006, 39(12): 2 505~ 2 510. Xu Q, Rui W Y, He H, et al. Characteristics and regional differences soil organic carbon density in farmland under different land use patterns in China (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(12): 2 505~ 2 510
- [ 90 ] 邹焱, 苏以荣, 路鹏, 等. 洞庭湖区不同耕种方式下水稻土壤有机碳、全氮和全磷含量状况. *土壤通报*, 2006, 37(4): 671~ 674. Zou Y, Su Y R, Lu P, et al. Contents of paddy soil organic carbon, nitrogen and phosphorus under different cultivation ways in Dongting Lake region (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(4): 671~ 674
- [ 91 ] 朱咏莉, 吴金水, 周卫军, 等. 亚热带稻田生态系统 CO<sub>2</sub> 排放及影响因素. *中国环境科学*, 2005, 25(2): 151~ 154. Zhu Y L, Wu J S, Zhou W J, et al. CO<sub>2</sub> emission from the paddy ecosystem in subtropical region and its influence factors (In Chinese). *China Environmental Science*, 2005, 25(2): 151~ 154
- [ 92 ] 李新爱, 童成立, 蒋平, 等. 长期不同施肥对稻田土壤有机质和全氮的影响. *土壤*, 2006, 38(3): 298~ 303. Li X A, Tong C L, Jiang P, et al. Effects of long-term fertilization on soil organic matter and total nitrogen in paddy soil (In Chinese). *Soils*, 2006, 38(3): 298~ 303
- [ 93 ] 侯鹏程, 徐向东, 潘根兴. 不同土地利用方式对农田表土有机碳库的影响)) 以太湖地区吴江市为例. *南京农业大学学报*, 2007, 32(2): 68~ 72. Hou P C, Xu X D, Pan G X. Influence of land use change on topsoil organic carbon stock: a case study of Wujiang Municipality (In Chinese). *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2007, 32(2): 68~ 72
- [ 94 ] Huang X X, Wei C F, Gao M, et al. Tillage effects on soil organic carbon distribution and storage in purple paddy soil. *Pedosphere*, 2006, 16(5): 660~ 667
- [ 95 ] 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. *自然资源学报*, 2006, 21(1): 118~ 125. Liu S L, Tong C L, Zhang W J, et al. Simulation of carbon sequestration potential of paddy soils in Hunan Province, China (In Chinese). *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(1): 118~ 125
- [ 96 ] 孟磊, 蔡祖聪, 丁维新. 长期施肥对土壤碳储量和作物固定碳的影响. *土壤学报*, 2005, 42(5): 769~ 776. Meng L, Cai Z C, Ding W X. Carbon contents in soils and crops as affected by long-term fertilization (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(5): 769~ 776
- [ 97 ] 王利刚, 邱建军, 马永良, 等. 应用 DNDC 模型分析施肥与翻耕方式对土壤有机碳含量的长期影响. *中国农业大学学报*, 2004, 9(6): 15~ 19. Wang L G, Qiu J J, Ma Y L, et al. Apply DNDC model to analysis long-term effect of soil organic carbon content under different fertilization and plough mode (In Chinese). *Journal of China Agricultural University*, 2004, 9(6): 15~ 19
- [ 98 ] 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态含量及深度分布的影响. *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 fertilization on content of total and particulate organic carbon and their depth distribution 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
- [ 99 ] 周萍, 宋国茵, 潘根兴, 等. 长期试验下三种典型水稻土有机碳积累机制研究 I: 团聚体保护作用. *土壤学报*, 在印. Zhou P, Song G H, Pan G X, et al. SOC accumulation in three major types of paddy soils under long-term agroecosystem experiments from south China I: Physical protection in soil microaggregates (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, in press
- [ 100 ] 尹云锋, 蔡祖聪. 不同施肥措施对潮土有机碳平衡及固碳潜力的影响. *土壤*, 2006, 38(6): 745~ 749. Yin Y F, Cai Z C. Effect of fertilization on equilibrium levels of organic carbon and capacities of soil stabilizing organic carbon for fluvoaquic soil (In Chinese). *Soils*, 2006, 38(6): 745~ 749
- [ 101 ] 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. *农村生态环境*, 2005, 21(4): 6~ 11. Han B, Wang X K, Ouyang Z Y. Saturation levels and carbon sequestration potential of soil carbon pools in farmland ecosystems of China (In Chinese). *Rural Eco-Environment*, 2005, 21(4): 6~ 11
- [ 102 ] Pan G X, Wu L S, Li L Q, et al. Organic carbon stratification and size distribution of three typical paddy soils from Taihu Lake region, China. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(4): 463~ 465
- [ 103 ] 周萍, 潘根兴. 长期不同施肥对黄泥土水稳性团聚体颗粒态有机碳的影响. *土壤通报*, 2007, 38(2): 256~ 261. Zhou P, Pan G X. Effect of different long-term fertilization treatments on particulate organic carbon in water-stable aggregates of a paddy soil (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(2): 256~ 261
- [ 104 ] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响. *土壤学报*, 2006, 43(3): 422~ 429. Li H X, Yuan Y H, Huang Q R, et al. Effects of fertilization on soil organic carbon distribution in various aggregates of red paddy soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3): 422~ 429
- [ 105 ] 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
- [ 106 ] 唐晓红, 邵景安, 高明, 等. 保护性耕作对紫色水稻土团聚体组成和有机碳储量的影响. 应用生态学报, 2007, 18(5): 1 027~ 1 032. Tang X H, Shao J A, Gao M, et al Effects of conservational tillage on aggregate composition and organic carbon storage in purple paddy soil ( In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology* 2007, 18(5): 1 027~ 1 032
- [ 107 ] 唐晓红, 邵景安, 黄雪夏, 等. 垄作免耕下紫色水稻土有机碳的分布特征. 土壤学报, 2007, 44(2): 235~ 243. Tang X H, Shao J A, Huang X X, et al Distribution of soil organic carbon in purple paddy field under longterm non-tillage ridge culture ( In Chinese). *Acta Pedologica Sinica* 2007, 44(2): 235~ 243
- [ 108 ] 黄欠如, 胡锋, 袁颖红, 等. 长期施肥对红壤性水稻土团聚体特征的影响. 土壤, 2007, 39(4): 608~ 613. Huang Q R, Hu F, Yuan Y H, et al Effects of longterm fertilization on aggregates characteristic of red paddy soil ( In Chinese). *Soils* 2007, 39(4): 608~ 613
- [ 109 ] 徐江兵, 何园球, 李成亮, 等. 不同施肥处理红壤生物活性有机碳变化及与有机碳组分的关系. 土壤, 2007, 39(4): 627~ 632. Xu J B, He Y Q, Li C L, et al Relationship between biologically active organic carbon pool and carbon fractions in upland soils different in fertilization ( In Chinese). *Soils* 2007, 39(4): 627~ 632
- [ 110 ] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 等. 长期施肥对水稻土颗粒有机碳和矿物结合态有机碳的影响. 生态学报, 2008, 28(1): 353~ 360. Yuan Y H, Li H X, Huang Q R, et al Effects of longterm fertilization on particulate organic carbon and mineral organic carbon of the paddy soil ( In Chinese). *Acta Ecologica Sinica* 2008, 28(1): 353~ 360
- [ 111 ] Li L Q, Zhang X H, Pan G X, 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(6): 1 052~ 1 058
- [ 112 ] 谭文峰, 朱志锋, 刘凡, 等. 江汉平原不同土地利用方式下土壤团聚体中有机碳的分布与积累特点. 自然资源学报, 2006, 21(6): 973~ 980. Tan W F, Zhu Z F, Liu F, et al Organic carbon distribution and storage of soil aggregates under land use change in Jianghan Plain, Hubei Province ( In Chinese). *Journal of Natural Resources* 2006, 21(6): 973~ 980
- [ 113 ] 周萍, 宋国茜, 潘根兴, 等. 三种南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究 II 团聚体内有机碳的化学结合机制. 土壤学报, 在印. Zhou P, Song G H, Pan G X, et al C sequestration in three typical paddy soils under longterm agroecosystem experiments from South China II Chemical binding forms of soil organic carbon ( In Chinese). *Acta Pedologica Sinica* in press
- [ 114 ] Zhang P J, Zheng J F, Pan G X, et al Changes in microbial community structure and function within particle size fractions of a paddy soil under longterm fertilization treatments from the Tai Lake region, China. *Colloid and Surfaces B: Biointerface* 2007, 58: 264~ 270
- [ 115 ] Zheng J F, Zhang X H, Li L Q, et al Effect of longterm fertilization on C mineralization and production of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> under anaerobic incubation from bulk samples and particle size fractions of a typical paddy soil. *Agriculture Ecosystem and Environment* 2007, 120: 129~ 138
- [ 116 ] 周萍, Piccolo A, 潘根兴, 等. 长期不同施肥处理下水稻土颗粒有机质的结构性质变异. 土壤学报, 在印. Zhou P, Piccolo A, Pan G X, et al Structure variation of particulate organic matter of paddy soil under longterm different fertilization ( In Chinese). *Acta Pedologica Sinica* in press
- [ 117 ] 陈桂秋, 黄道友, 苏以荣, 等. 红壤丘陵区土地不同利用方式对土壤有机质的影响. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 256~ 260. Chen G Q, Huang D Y, Su Y R, et al Effects of soil organic matter in hilly red soils from mid-subtropics region under various utilization patterns ( In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science* 2005, 24(2): 256~ 260
- [ 118 ] 邵景安, 唐晓红, 魏朝富, 等. 保护性耕作对稻田土壤有机质的影响. 生态学报, 2007, 27(11): 4 434~ 4 442. Shao J A, Tang X H, Wei C F, et al Effects of conservation tillage on soil organic matter in paddy rice cultivation ( In Chinese). *Acta Ecologica Sinica* 2007, 27(11): 4 434~ 4 442
- [ 119 ] 黄耀, 刘世梁, 沈其荣, 等. 环境因子对农业土壤有机碳分解的影响. 应用生态学报, 2002, 13(6): 709~ 714. Huang Y, Liu S L, Shen Q R, et al Influence environmental factors on the decomposition of organic carbon in agricultural soils ( In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology* 2002, 13(6): 709~ 714
- [ 120 ] 任秀娥, 童成立, 孙中林, 等. 温度对不同黏粒含量稻田土壤有机碳矿化的影响. 应用生态学报, 2007, 18(10): 2 245~ 2 250. Ren X E, Tong C L, Sun Z L, et al Effects of temperature on organic carbon mineralization in paddy soils with different clay content ( In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology* 2007, 18(10): 2 245~ 2 250
- [ 121 ] 李玲, 肖和艾, 吴金水. 红壤旱地和稻田土壤中有有机底物的分解与转化研究. 土壤学报, 2007, 44(4): 669~ 674. Li L, Xiao H A, Wu J S Decomposition and transformations of organic substrates in upland and paddy soils in red earth region ( In Chinese). *Acta Pedologica Sinica* 2007, 44(4): 669~ 674
- [ 122 ] 郑聚锋, 张旭辉, 潘根兴, 等. 水稻土基底呼吸与 CO<sub>2</sub> 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): 485~ 494. Zheng J F, Zhang X H, Pan G X, et al Diurnal variation of soil basal respiration and CO<sub>2</sub> emission from a typical paddy soil after rice harvest under longterm different fertilizations ( In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science* 2006, 12(4): 485~ 494
- [ 123 ] Zhang X H, Li L Q, Pan G X. Top soil organic carbon mineralization and CO<sub>2</sub> evolution of three paddy soils from South China and the temperature dependence. *Journal of Environmental*

- Sciences 2007, 19(3): 319~ 326
- [ 124 ] 宋长春, 王毅勇. 湿地生态系统土壤温度对气温的响应特征及对 CO<sub>2</sub>排放的影响. 应用生态学报, 2006, 17(4): 625~ 629. Song C C, Wang Y Y. Responses of soil temperature in wetland ecosystem to air temperature and their effects on CO<sub>2</sub> emission ( In Chinese ). Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(4): 625~ 629
- [ 125 ] 迟传德, 许信旺, 吴新民, 等. 安徽省升金湖湿地土壤有机碳储存及分布. 地球与环境, 2006, 34(3): 59~ 64. Chi C D, Xu X W, Wu X M, et al. Storage and distribution of soil organic carbon in Shengjin Lake wetland, Anhui, China ( In Chinese ). Earth and Environment, 2006, 34(3): 59~ 64
- [ 126 ] 林凡, 李志鹏, 张旭辉, 等. 皖江自然湿地土壤碳密度及开垦为农田后的变化. 湿地科学, 2008, 6(2): 192~ 197. Lin F, Li Z P, Zhang X H, et al. Organic carbon density of soil of wetland and its change after cultivation along the Yangtze River in Anhui Province, China ( In Chinese ). Wetland Science, 2008, 6(2): 192~ 197
- [ 127 ] 陈安磊, 王凯荣, 谢小立, 等. 不同施肥模式下稻田土壤微生物生物量磷对土壤有机碳和磷素变化的响应. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2733~ 2738. Chen A L, Wang K R, Xie X L, et al. Responses of microbial biomass P to the changes of organic C and P in paddy soils under different fertilization systems ( In Chinese ). Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(12): 2733~ 2738
- [ 128 ] 刘守龙, 苏以荣, 黄道友, 等. 微生物商对亚热带地区土地利用及施肥制度的响应. 中国农业科学, 2006, 39(7): 1411~ 1418. Liu S L, Su Y R, Huang D Y, et al. Response of  $C_{mic} / C_{org}$  to land use and fertilization in subtropical region of China ( In Chinese ). Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(7): 1411~ 1418
- [ 129 ] Xiang C G, Zhang P J, Pan G X, et al. Changes in diversity, protein content and amino acid composition of earthworms from a paddy soil under different long-term fertilizations in the Tai Lake region, China. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(6): 1667~ 1674
- [ 130 ] 李儒海, 强胜, 邱多生, 等. 长期不同施肥方式对稻油两熟制油菜田杂草群落多样性的影响. 生物多样性, 2008, 16(2): 118~ 125. Li R H, Qiang S, Qiu D S, et al. Effects of long-term different fertilization regimes on the diversity of weed communities in oilseed rape fields under rice-oilseed rape cropping system ( In Chinese ). Biodiversity, 2008, 16(2): 118~ 125
- [ 131 ] 尹力初, 蔡祖聪. 长期定位施肥小麦田间杂草生物多样性的变化研究. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 57~ 59. Yin L C, Cai Z C. The change of the weed biodiversity in wheat field under a long-term located fertilization ( In Chinese ). Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13(3): 57~ 59
- [ 132 ] 张逸飞, 钟文辉, 李忠佩, 等. 长期不同施肥处理对红壤水稻土酶活性及微生物群落功能多样性的影响. 生态与农村环境学报, 2006, 22(4): 39~ 44. Zhang Y F, Zhong W H, Li Z P, et al. Effects of long-term different fertilization on soil enzyme activity and microbial community functional diversity in paddy soil derived from quaternary red clay ( In Chinese ). Journal of Ecology and Rural Environment, 2006, 22(4): 39~ 44
- [ 133 ] 郑聚锋, 张平究, 潘根兴, 等. 长期不同施肥下水稻土甲烷氧化能力及甲烷氧化菌多样性的变化. 生态学报, 2008, 28(10). 在印. Zheng J F, Zhang P J, Pan G X, et al. Changes in methane oxidation potential and diversity of methanotrophs of a paddy soil under long-term different fertilizations ( In Chinese ). Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10). in press

## PERSPECTIVES ON CYCLING AND SEQUESTRATION OF ORGANIC CARBON IN PADDY SOILS OF CHINA

Pan Genxing, Li Lianqing, Zheng Jufeng, Zhang Xuhui, Zhou Ping

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

**Abstract** C cycling of soils is a critical process of Earth surface system closely related to global climate change. This review paper summarizes the main achievements of studies on C cycling of paddy soils of China while highlighting the global trends. C cycling processes and the C footprints have been increasingly characterized by means of molecular microbiology in conjunction with C and N isotopes tracing methodologies. Soil productivity and the ecological services are being focused when dealing with C sequestration and mitigation in agriculture. Long-term ecosystem experiments are increasingly involved in monitoring and modeling C cycling and the dynamics. While many studies of C sequestration have demonstrated well the C storage and stock in paddy soils, much attention has been paid to C sequestration processes in scale of microaggregates regarding the formation, turnover and the physical protection and transformation of C input to paddies. Some of laboratory incubations and field monitoring works have clarified that C in paddy soils is more or less stable with relatively low mineralization rates both under aerobic and anaerobic conditions, which may suggest that C in paddy soils is

more intense protected and chemically bound to soil components such as oxyhydrates rich in them. As a global trend, the coupling mechanism of C sequestration and crop productivity as well as the ecological services are being challenged. It is evidenced in some of studies that biodiversity may have controls on C cycling and GHGs production coping with the crop productivity. However, quantitative characterization of C turnover and C sequestration processes is still in debt of paddy soils. The interactive effects of crop-soil-microbe on C sequestration and GHGs production from paddy soils deserve further holistic studies with new hypothesis. The role of C sequestration in China's climate change mitigation should be further evaluated for a better climate policy of agriculture.

**Key words:** C cycling, Soil organic carbon, Paddy soils, Climate change, Biodiversity and productivity