

文章编号: 1001-8166(2005)05-0587-04

# 我国农田土壤碳库演变机制及发展趋势 ——第 236 次香山科学会议侧记\*

我国农业具有悠久的历史,以占全球 $1/7$ 的耕地养活了全球 $1/5$ 的人口。同时,我国农业对土壤质量和生态系统功能的影响也倍受世界各国关注。切实摸清生态系统的碳库背景,认识和掌握不同人为利用下的变化与驱动因子,对于合理地提出我国温室气体排放清单和制定相应的控制碳排放和促进碳收集的战略和技术途径有重要的科学意义。

2004 年 9 月 21 ~23 日,来自全国各地的 38 位有关专家学者以“我国农田土壤碳库演变机制及发展趋势”为主题进行学术交流,旨在通过跨学科的学术交流,正确认识和把握国内外科学家对农业土壤碳库及其演变动态的研究结果和趋势,凝练未来 10 年在我国农业土壤碳库及其演变研究上的科学思路、目标与关键科学问题,探索区域和国家尺度的碳库估计和我国农业中促进土壤碳固定的对策。

本次会议设置了最近时期我国农业土壤碳库变化的新认识,农田生态系统碳循环特点与碳库变化,区域尺度土壤有机碳变化估计与存在的问题,我国农业利用管理特点与农田土壤碳问题等四个中心议题。

赵其国院士(中国科学院南京土壤研究所)、潘根兴教授(南京农业大学资源环境学院)、蔡祖聪教授(中国科学院南京土壤研究所)和吴金水教授(中国科学院亚热带农业生态研究所)应邀担任会议执行主席。

## 1 农田土壤碳库—减缓大气 $\text{CO}_2$ 浓度升高的关注点

土壤是地球表层系统中最大而最活跃的碳库之一(1 550 Pg),约为大气圈和生物圈碳库的 2.5 倍。土壤固定与收集大气  $\text{CO}_2$  的容量与潜力成为最近 20 ~30 年间在未找到工业  $\text{CO}_2$  排放控制的替代技术前减缓大气  $\text{CO}_2$  浓度升高的关注点。欧盟和美国、加拿大及 FAO 正在开展一系列的资料收集、数据对比与库量平衡、碳收集潜力预测及其碳收集技术与经济评价等国内国际重大研究合作计划。这些研究将在 IPCC 碳收集评估报告中占有重要的依据与参考地位。

当前,国际社会正在不断加强对控制全球气候变化的努力。《京都议定书》和《全球气候变化框架协议》规定各国减少排放来缓解大气不断升高的  $\text{CO}_2$  浓度。《京都议定书》<sup>3,4</sup> 款提出可以通过增加生态系统碳库来补偿经济发展中的碳

排放。

我国政府自 2002 年开始向国际社会承诺控制全球气候变化的义务,<sup>2003</sup> 年加入碳收集领导人论坛,着手从国家层面上实施缓解气候变化的措施,并启动了“气候变化国家评估报告”项目。但我国关于土壤碳库及其碳收集能力的国家资料与国际社会的需求和国家控制全球气候变化的努力的需求还很不适应。

由于工业发展中  $\text{CO}_2$  排放还没找到有效的替代技术途径,在农业中寻求能源消耗中的碳排放的重新收集与固定成为国际上共同努力的趋势。全球农业利用的土壤覆盖面积是  $4\ 961\ \text{Mkm}^2$ ,耕地为  $1\ 369\ \text{Mkm}^2$ (FAO, 2001),耕地占全球陆地面积的 10.5%。在全球陆地生态系统碳库中只有农业土壤碳库是受到强烈人为干扰而又可以在较短的时间尺度上可以调节的碳库。

赵其国院士在题为“我国农业与农业土壤碳库问题”的主题报告中强调指出,农业土壤碳库及其演变研究有两个层面问题:一是土壤碳库的国际外交层面的问题,即目前农业土壤碳汇潜力及其技术条件已成为国际环境谈判筹码;另一个是科学基础研究层面问题,即农业土壤碳库和碳排放的动态密切影响着大气气体成分与全球气温的变化。潘根兴教授同样认为,促进我国农业土壤碳固定和收集的双赢战略在我国特别重要,必须在政府和科学界得到高度重视。

实际上,国外科学家已提出农业土壤碳收集是经济和环境双赢战略(Win-Win Strategy Lal, 2004)或者唯一在气候控制努力上没有遗憾的技术(No-Regret Strategy Smith, 2004)。美国科学家已经证明森林生态系统(土壤)、草地生态系统(土壤)和农业土壤中存在碳收集效应,并成为布什政府提出以碳收集弥补其全球最高的碳排放的主要依据。

显然,农田土壤碳库研究十分重要。从农业经营管理上来说,保持农业的可持续发展并发挥农业土壤的碳收集能力,对于全球粮食供应与缓解气候变化趋势具有双重的积极意义。

## 2 农田土壤碳库演变机制及发展趋势

潘根兴在“农田土壤碳库演变机制及发展趋势研究的问题”主题报告中较全面地综述介绍了国际科学界对农业土壤碳固定与收集的研究现状。

西方国家由于实行保护性耕作和少免耕,最近时期的农业土壤碳库呈稳定增长的趋势,可以在较显著的水平上弥补其碳排放。据统计,全球农业土壤碳收集潜力为  $0.9 \pm 0.3$  Pg/a, 欧盟 15 国农业土壤的碳收集潜力为  $90 \sim 120$  MTC/a, 美国为  $107$  MTC/a, 全球农业土壤的碳收集潜力差不多是全球每年大气  $\text{CO}_2$  总量的增加值的  $1/3$  或  $1/4$ 。

我国耕地面积为  $1.3 \times 10^{10} \text{ m}^2$  左右, 占我国国土面积的  $1/8$  左右, 以占全球耕地不到 9% 的耕地养活了占全球  $1/5$  的人口。以往农业发展诱发了对土壤肥力和土壤质量的破坏和退化现象, 但高投入高产出的经营将是我国农业的长期趋势, 保持土壤碳库稳定增长不但是控制全球气候变化努力的需要, 更是保障我国农业高产和粮食安全的需要。

潘根兴特别指出, 国外科学家正在对全球已有的农业土壤的长期试验资料进行对比与评估, 但在引用的数百个试验资料中却没有中国资料, 且不是根据一些零散的历史资料估算就是根据国外开发的碳循环模型, 都认为我国农业土壤一直以碳库损失为主要特征, 这可能造成在国际评估报告中不能正确反映我国农业的碳汇效应与可行的碳收集潜力的贡献, 对我国外交十分不利。

我国 2001 年的工业  $\text{CO}_2$  排放为  $1$  Pg/a, 仅次于美国 ( $1.84$  Pg/a), 预计在 2005 年会超过美国达到  $2$  Pg/a, 面临着减排的巨大压力。当前情况下开展农业土壤碳库及其演变十分迫切, 需要组织全国力量进行多学科、多尺度的研究, 解决国家需求, 争取在控制全球气候变化的国际外交中的有利地位。

赵其国院士再三强调, 这是一个关系国家环境外交的大问题, 同时也是关系到农业可持续发展、食物安全与环境安全保障的问题。最重要是我们国家农田土壤碳的源汇本底, 首先要把握清楚, 这个问题责任重大, 必须引起政府和科学界的高度重视。

### 3 我国土壤碳库及其演变态势研究的新进展

土壤碳库的历史变化表明, 人为利用下土壤碳库变化对已发生的全球变化有规模性影响, 但这种损失同样也可以在人为合理管理下得到恢复。本次会议对我国土壤碳库的历史变化尤其是最近时期的变化作了重点探讨, 取得了新的认识。

(1) 从历史变化上评估了我国土壤在人为利用下的碳库变化的总态势。

国外对土壤碳库的历史变化研究十分重视, 采用时空尺度转换和生态系统模型对全球和区域的土壤碳库变化作过估计。目前认为, 人类活动下全球土壤碳库的总消减达到土壤原碳库的 5% 左右, IPCC (1996) 估计全球土壤碳库的历史损失量为  $55$  Pg, 而工业革命以来这种损失的速度比任何一个历史时期都快。

我国发表的有关过去损失资料的文章较少, 仅有吴海彬、潘根兴等做过表层土壤碳库的对比研究工作。国外科学

家对我国土壤碳库的历史变化问题曾有研究结果发表, 提出我国 1950 年以来土壤碳库存在持续消减, 1970 年以来这种损失达到  $70$  Tg/a 的规模等负面看法。尽管这些损失资料尚没有足够的实测资料和模型研究资料予以对比, 但已在国际全球变化研究领域产生重要影响。

与会专家认为: 我国不同区域农业土壤的变化态势在不同的历史阶段表现明显不同, 如 1950—1980 年间, 我国东北土壤的有机碳库损失可能既普遍而又持续时间较长, 南方红壤地区的农业开垦并不一定表现为有机碳的消减, 许多农田的有机质含量表现为升高的趋势, 南方旱地在开垦为水稻田反而促进了有机碳的较快增长, 这些在过去的一些研究报告中已有资料佐证; 农业土壤的有机碳损失很多情况下是由于水土流失, 但从田块尺度的有机碳含量的变化不足以说明土壤碳库的总体变化, 水土流失导致的有机碳会在一定景观中的重分布并在低洼地的积聚; 田块土壤有机质的损失并不一定都表现为向大气的  $\text{CO}_2$  排放, 在西南、西北和华北的碳酸盐岩和石灰性土壤地区, 有机质分解可能涉及向无机碳的转化, 实质上是大气  $\text{CO}_2$  的汇效应。

(2) 会议通过充分的学术交流和资料分析, 对我国土壤碳库值做出了初步估计。

欧美等主要国家在 20 世纪 90 年代初完成了土壤碳库估计和全球土壤碳库总值估计。我国土壤碳库的估计也一直是我国碳循环研究领域科学家的一项重要研究内容。自 20 世纪 90 年代中期以来, 不同学科学者采用第二次全国土壤普查资料和生态系统植被土壤碳库分配模型, 以不同比例的植被图和土壤图为面积依据, 进行了多种估计的探索, 在国内外的相关的杂志发表论文有 9 篇之多, 估计的全国土壤有机碳库值介于  $50 \sim 185$  Pg 间, 相差幅度较大。我国土壤无机碳库的估计资料很少, 潘根兴等 (1999) 曾提出我国土壤无机碳库值为  $60$  Pg。

会议上不同专家介绍了碳库估计值的取得途径和结果, 进行了讨论和争鸣。近 5 年间发表的估计工作有不断趋近的趋势, 吴海斌等 (2003)、王绍强 (2002)、金峰等 (2001, 2002) 和李克让等 (2004) 的估计值介于  $70 \sim 90$  Pg 间。

与会者认为, 我国第二次土壤普查是碳库估计最详尽的资料, 应以此为基础作出我国 1980 年左右的背景土壤碳库估计, 同时认为, 目前应充分利用中国  $1:100$  万土壤图, 尤其是目前全国最详细最完整的全国性土壤数据。部分专家认为典型区域的碳库估计可能更有意义, 可在充分利用遥感或实测资料基础上建立模型来进行。与会专家还讨论了目前影响我国土壤碳库估计不确定性各主要因素。

### 4 我国农业土壤有机碳库储量呈增加趋势

自我国改革开放以来由于农业经营体制的变化以及农业技术的革新, 农业生产大为提高, 农业土壤的土壤肥力质量发生了明显的变化, 这反映在碳库的演变上应该具有积极意义。

蔡祖聪研究员在探讨“我国农田土壤有机质储量变化”

时指出 这段时间内农业土壤有机碳储量是增加的 10 年尺度内都可以观察到良好管理下土壤有机碳增加的现象。这是他在引述大量文献上的研究资料,考虑秸秆还田的增加、收获物生物量的大幅度提高的现实,深入分析有机碳变化的时间因素和影响因素的贡献强度后得出的归还土壤的有机物质总体上呈不断上升趋势的看法。

李忠佩研究员从农田投入有机质平衡的实验及计算出发,对南方红壤地区这一时期表现为有机质的盈余,东北黑土地区总体上仍表现为亏缺,华北平原区基本上稳定或略有增长的情况进行了论证,并从有机质农田角度提出我国低产农田的碳库增加规模为 500 Tg。

来自美国北卡罗来纳大学(North Carolina State University)的吴金水博士在特邀报告中提出了生态系统中氮素对碳固定与收集的限制作用,指出农业土壤中氮素养分及其管理对于促进土壤碳收集是重要的一环。

多位专家在自由发言中提到 1980—2000 年间农业土壤有机质确实存在增加趋势,如四川省的情况,秸秆还田并实行保护性耕作,水田有机质含量升高很快,水田比旱地有机质平均高出 6g/kg,石灰性农田土壤中还可能涉及无机碳的增加,即可贡献为碳汇效应。

与会专家认为,鉴于我国自主的模型开发研究还很薄弱,目前还难以对这些农业管理与生产发展下我国农业土壤碳库增长作出量的估计,迫切需要加强适用于我国土壤和农业实际的模型开发与应用性研究。

蔡祖聪认为,研究最近时期农业土壤有机碳库演变时应关注以下几个问题:目前尚难以给出这时期增加的总库量的规模,其原因是许多报道的试验资料还很不规范或完善;需要发展符合我国农业实情的模型来估计;农业土壤中有机碳库增加是否具有饱和限,因许多试验资料仍未表明已停止增加。

与会专家学者得到如下共识:20 世纪 80 年代以来我国农田土壤有机碳库基本上呈增长趋势,但在区域上表现不同,南方基本上是增长状态,东北黑土区总体上仍可能表现为下降趋势,华北、西南区有明显增加,但西北除灌溉土壤外情况不明;水稻土的有机碳密度高于旱地,增长趋势也比旱地快;这种增长趋势的主导因素是秸秆还田,较于其他因素更有利于农田土壤有机碳贮量的增加;化肥对于促进农田土壤碳库增加具有明显作用;农田中较丰富的有效氮素营养对输入有机质转化为土壤腐殖质是十分有利的;保护性耕作和其他措施的配合是许多试验中有机质快速增长的良好措施;强调“不应拿外国人的模型套中国国情,乱用模型是很危险的”。

## 5 我国农业管理与农田土壤碳收集现状

当前,世界科学家都在努力研究陆地生态系统碳收集潜力与土壤碳固定技术。西方国家已从经济学角度研究促进土壤碳收集的技术经济措施,实行例如碳收集贸易等政策与市场行为。这可能会反映到全球经济与贸易政策中。

目前我国尚拿不出一套包括技术经济在内的促进我国农业土壤碳收集的国家办法。与会代表,交流了我国不同地域农业管理与农田土壤碳收集的现状。

张福锁教授介绍了各种农业管理途径对土壤碳收集的效应,并从生物学角度提出农业土壤碳收集首要地是促进作物同化碳向根际土壤的沉积,蔡典雄研究员依据山西旱作土壤的长期实验结果提出我国北方旱地农业中以结合秸秆还田的少免耕技术为主的保护性耕作技术作为碳收集与高产的战略措施;王敬国教授综述了在华北盐碱土、石灰性潮土和褐土上实施少免耕、良好水分管理、合理配方施肥、粮食作物套种或轮作豆科草本植物等促进土壤碳收集的有效途径;吴文良教授从稳定性同位素角度论证了深根作物玉米种植对土壤深层碳收集的良好作用,吴金水研究员提出水稻秸秆异地还田作为南方丘陵农业带一种实用的碳收集技术策略;张晓平研究员则认为,东北农区适当推迟春耕播种既可避开低温僵苗,又可减少有机质过快分解,是促进土壤碳收集的良好办法。

另外,在南方稻区,稻—油和稻绿肥都是长期证明有效的土壤碳收集的轮作技术,近年来出现的稻—休闲也在碳收集上有良好效果。在东北玉米—大豆轮作是一种很好的保持土壤碳并提高土壤碳储存的轮作管理措施。在南方丘陵地区,通过合适的经济手段可以在相当程度上鼓励农民碳收集的经营行为。也有的专家提出,作为农业土壤碳收集的一种扩张性途径,荒地或休闲地种植生物能作物(固碳作物的种植作为碳收集农业)加以发展也是有前景的。

从目前较为接近的碳库估计来看,世界平均为 12.1 kgC/m<sup>2</sup>。蔡祖聪等(2003—2004)关于我国的报道值介于 8.0—10.5 kgC/m<sup>2</sup>;潘根兴提供的表层土壤碳密度的估计(我国自然土壤约 57 TC/hm<sup>2</sup>,特别是耕作土壤仅 30 TC/hm<sup>2</sup>)表明我国农业土壤碳水平低于世界平均值。这一方面说明我国农业活动确实在历史上损失了较大量的土壤有机碳,可能对全球陆地生态系统碳损失和和大气 CO<sub>2</sub> 浓度上升有重要贡献,但另一方面也说明通过一定措施使农业土壤收集和固定有机碳的潜力存在较大空间。

与会者强调,当前我国迫切需要的是提出自己的研究资料,到底我国农业的碳收集能力可达到多大?采用什么样的配套技术可实现这种收集规模?采用什么样的政策与经济手段来保证这种收集目标的实现?在基础研究层面上,迫切需要解决的问题是不同地区、不同农业作物带各种投入碳收集技术的碳收集效率、与作物生产的关系?收集碳的稳定性与长期和短期效应?

## 6 农业土壤碳库演变的机理问题

农业土壤碳库演变的机理问题在宏观上涉及土地利用下的碳库演变驱动力与农田—土壤过程的响应,在微观上表现为土壤碳的固定与保护机制的特点及其变化。我国农业土壤及其利用类型有广泛的多样性,土地管理与经营干扰与国外的农业情况大相径庭。因此,无论我国农业的集约化程

度还是土壤的被干扰程度都是不能套用国外已有的模式来解释。我国农业土壤碳库演变及其动态的科学问题需要我国科学家自己的研究和认识。

针对“农田土壤有机碳循环过程与机理”问题,吴金水在报告中讨论了农田土壤碳循环所涉及的两个层面的基础科学问题,即区域空间尺度碳转移、分配的特点与田块尺度的土壤过程研究——土壤有机碳转化动力学,指出农田生态系统过程和土壤中生物学过程是土壤有机碳转化动力学的关键所在。他指出,我国目前的研究瓶颈是循环机制与影响因素研究不充分,基于田块尺度的试验研究结果不能很好地进行空间尺度转换,由于不同土壤—气候—作物带下土壤有机碳转化动力学研究很薄弱,描述我国农业土壤有机碳循环的模型构建还很少。土壤有机碳循环计算机模型建立与检验将是我国农业土壤碳库收集基础研究的一项重要内容。

窦森教授从土壤腐殖质分组与稳定性的关系出发,强调了研究不同组分腐殖质在碳收集与固定上的意义,认为微生物在土壤有机质转化上的作用还有待于进一步的研究。

多位专家还从试验资料出发介绍了不同形态土壤有机质在农田土壤碳库演变中的表现特点。一些专家提醒,研究土壤有机碳转化应注意土壤中养分与碳的关系,土壤中轻组份或者大颗粒固定有机碳的物理保护机制及其微生物有效性,环境条件变化对土壤碳转化与固定的影响等等。

## 7 面对双重挑战努力实现双赢目标

我国农业面临高产稳产与生态环境保护的双重挑战,为了我国农业的可持续发展,农田土壤碳循环研究不仅必须回答我国农业土壤碳库在我国陆地碳循环中的份额及其对于全球碳循环的贡献与对大气  $\text{CO}_2$  的影响,而且必须回答农业碳库演变与农业高产稳产的关系,在稳定农业生产保护生态环境中如何促进固碳。

赵其国中肯地指出,对我国农业土壤碳库演变与碳收集潜力的认识,需要从我国的特殊土地利用方式和管理特点出发,应对我国环境外交和农业可持续发展和粮食安全保障的挑战。农业土壤碳库演变与碳收集能力的研究,应在宏观上解决不同区域土壤在其自然条件和人为活动综合作用下碳库动态问题,从微观上解决人为活动对不同利用方式下土壤有机碳库动态的影响机理等一系列科学问题,并概括提出本领域研究的焦点是碳的源与汇问题、演变机理问题、时空分

布问题、调控问题等四个必须回答的科学问题。

与会专家强烈意识到,需要抓住 IPCC 组织碳捕获与收集报告的时机,面对双重挑战,努力实现我国农业土壤碳收集与管理在控制全球气候变化与保障农业高产的可持续发展的双赢目标。

我国土壤有机碳转化与固定机制的研究需要引进全新的科学思路,从地球生物学的高度,考虑人地相互作用,以耕作制下作物过程—土壤过程与微生物学过程的多视角研究我国农业利用下土壤碳库演变的基本过程特点。

我国高产高投入和高度集约化的农业利用与国外尤其是发达国家的农业有很大差别,在碳循环研究上要充分考虑我国农业的这种特殊性,大力加强对农业与农田土壤碳循环研究。

未来 5—10 年我国农业土壤碳库及其演变研究,需要特别关注如下一些重要科学问题:

- 田土壤碳库及其活性与全球变化的关系;
- 高产和集约化农田中养分动态与碳循环特点;
- 高产稳产中持续固碳的机理、措施与碳的稳定性;
- 农田土壤中碳库增加温室气体排放的综合效应。

迫切需要从国家层面摸清以下问题,以应对这种研究需求和制定国家控制全球变化努力的清单:

(1) 开展新一轮土壤普查或耕地土壤肥力与质量调查,搞清第二次土壤普查以来我国农业发展中土壤碳库演变的总体态势,当前农田土壤碳库的实际情况与今后演变的趋势。

(2) 全方位研究我国农业的土地利用机制和高投入(肥料养分、农药等)下农田土壤碳循环过程及其动力学特点。

(3) 高产稳产下土壤固碳的可行措施与时效性。

与会专家呼吁并郑重建议我国政府及科技主管部门尽快通过各种途径支持对农业土壤碳收集与固定中基础科学问题、经济学问题与技术发展的各项研究攻关,在我国气候变化国家评估报告中考虑农业方面对碳收集的影响,并带动相关研究与技术发展工作。土壤碳收集技术研发与推广项目也应纳入国家高技术发展计划和农业高产稳产工程和农业技术攻关计划。

(赵生才 报道)