

测土配方施肥项目固碳减排计量方法学探讨

程 琨, 潘根兴*, 张 斌, 罗 婷, 李恋卿, 郑金伟, 张旭辉, 韩晓君, 杜彦玲

(南京农业大学农业与气候变化研究中心, 南京 210095)

摘 要: 固碳减排计量是进行减缓气候变化的碳交易机制的基础工作, 而适合项目计量的计量方法学是实现交易的基础工具。我国正在大力推广的测土配方施肥项目在合理利用肥料、提高产量的同时, 也表现出重要的农业温室气体的减排作用。为了给未来编制测土配方施肥方法学标准文本提供依据, 本文从边界和基准线的设定、碳库和关键排放源的选取、固碳减排的计量方法等方面探讨了测土配方施肥项目固碳减排计量方法学问题。

关键词: 配方施肥; 常规施肥; 固碳; 减排; 碳交易; 方法学

中图分类号: X11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2011)09-1803-08

Discussion on the Methodology for Quantifying Carbon Sequestration and Reduction in Greenhouse Gas Emission Under Recommended Fertilization Project

CHENG Kun, PAN Gen-xing*, ZHANG Bin, LUO Ting, LI Lian-qing, ZHENG Jin-wei, ZHANG Xu-hui, HAN Xiao-jun, DU Yan-ling
(Center of Climate Change and Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Recently carbon trading has been developed rapidly in the context of climate change mitigation. While quantifying carbon sequestration and greenhouse gases (GHGs) emission reduction is the basis for carbon trading, it is vital to develop the methodologies that offer great potential for the mitigation of climate change. The judicious use of fertilizers not only increases the production but also reduces greenhouse gas emissions and improves soil carbon storage at the same time. Carbon storage methods, along with the use of carbon trading were illustrated with regard to the setting of the boundary and baseline, the selection of carbon pool and key GHGs emission sources and measurement methods. The methodology to quantifying carbon sequestration and GHGs emission reduction could be used with the purpose to plan the recommended fertilizers application in future.

Keywords: recommended fertilization; regular fertilization; carbon sequestration; greenhouse gas emission reduction; carbon trading; methodology

中国政府在 2009 年哥本哈根联合国气候变化大会上郑重承诺, 到 2020 年单位 GDP 碳排放在 2005 年基础上减少 40%~45%。因此, 需要对国内不同地区和行业增汇减排的计量、核实和认证并开展自主碳减排交易。据政府间气候变化专门委员会(IPCC)有关

统计, 全球农业减排的技术潜力高达每年 5 500~6 000 Mt CO₂ 当量^[1]。中国是农业大国, 2007 年农田甲烷和氧化亚氮排放达 686 Mt CO₂ 当量, 占全国温室气体总排放的 9.2%^[2]。中英可持续农业协作网络“改善养分管理, 促进低碳经济”项目^[3]对中国氮肥利用情况进行调查的结果显示, 中国氮肥生产和施用带来的温室气体排放占全国温室气体总排放的 9%~15%, 但即使减少氮肥用量 30% 也不会造成粮食的减产, 同时可以为中国减排做出重大贡献。本课题组对 1993—2007 年我国农作物生产碳足迹的分析表明, 农业化肥投入引起的碳排放约占农作物生产总碳排放的

收稿日期: 2011-03-19

基金项目: 美国环保协会资助项目: 农村自主减排项目(测土配方施肥)方法学

作者简介: 程 琨(1986—), 男, 山西太谷人, 博士研究生, 研究方向为农业减缓气候变化的计量方法学研究。

E-mail: kuncheng86@yahoo.com.cn

* 通讯作者: 潘根兴 E-mail: pangengxing@yahoo.com.cn

60%,其中氮肥占 95%;我国每吨农作物生产因化肥施用产生的碳排放约 0.07 t^[4]。因此,合理施肥,特别是减少氮肥的过量施用越来越成为农业温室气体减排、实践低碳农业的战略途径^[4]。

我国政府于 2005 年启动实施测土配方施肥补贴项目,全面推广测土配方施肥工作。到 2009 年,测土配方施肥项目区已经覆盖了 2 498 个县单位;项目区主要粮食作物的测土配方施肥技术推广面积达到 90%以上,经济作物、园艺作物应用面积也逐年扩大。项目实施 5 a 来,累计减少不合理施肥 300 万 t,肥料利用率提高了约 3 个百分点,为全国粮食连续增产、农民持续增收做出了重要贡献^[5]。配方施肥项目还表现出明显的温室气体减排作用,通过肥料的高效利用,特别是氮肥的高效利用显著减少了农田氧化亚氮排放量;同时良好施肥条件下,土壤中有有机碳的积累速率会有较大幅度的提高,促进了土壤固碳^[6]。因此,配方施肥项目在增加产量降低生产成本的同时,具有增加土壤碳储量和减少温室气体排放的双赢效果。

近年来,诸多学者对各种固碳减排项目的计量方法学进行了研究,如李玉娥等^[7]对规模化养鸡场、规模化猪场 CDM 项目进行了减排核算方法学研究,董红敏等则对农村户用沼气减排核算方法学进行了探讨^[8]。但是,对配方施肥项目中固碳减排计量方法学还鲜有报道,而作为我国大力推广、固碳减排效果明显的项目,其计量方法学的研究将为我国量化减排、统一计量方法提供理论依据。本研究根据温室气体计量方法学基本原理,讨论和分析配方施肥项目温室气体减排和固碳计量的基本问题,提出方法学编制需要解决的计量关键环节,并探讨构建方法学核心框架。

1 材料与方法

本研究基于《测土配方施肥技术规范(试行)》,并参考已颁布的清洁发展机制(CDM)项目各类方法学,按照“基线的确定→项目边界的认定→泄漏→关键排放源与碳库→计量方法→不确定性分析”的思路,对测土配方施肥项目固碳减排计量方法学的编制进行研究和探讨。

2 结果与讨论

2.1 测土配方施肥项目系统边界和项目基线的认定

测土配方施肥是以肥料田间试验、土壤测试为基础,根据作物需肥规律、土壤供肥性能和肥料效应,在合理施用有机肥料的基础上,提出氮、磷、钾及中、

微量元素等肥料的施用品种、数量、施肥时期和施用方法^[9]。实际上,由于农田活动的特殊性,测土配方施肥项目的基线以及边界的设定与畜牧业减排计量、生物能减排计量和森林恢复减排计量等^[7-8,10]存在一定的差异。

2.1.1 项目基线(Baseline)的确定

基线是指一种能合理代表在没有项目活动情况下的温室气体排放量和碳变化量^[10-11]。李玉娥等^[7]对规模化养鸡场 CDM 项目减排计量中指出,参与该公司的公司将采用厌氧沼气反应器,而假如该公司未采用,将延续以往继续使用厌氧氧化塘处理大量的鸡粪及污水,因此将项目的基线情景设为厌氧氧化塘。那么,根据测土配方施肥定义,测土配方施肥项目旨在为农民提供合理可行的肥料配方,包括品种、用量、用法、施用时间等,计量其固碳减排量的基准线则应当设定为与之相对应的同地未实施测土配方施肥的过去的温室气体排放情景或相似地区未实施测土配方施肥的当前情景。配方项目基线的设定可以有两种方法,一是将欲实施项目农田的温室气体排放和碳库变化设为基线,测定其在项目实施前 1~2 a 的碳变化量和温室气体排放情况。这种方法可以使该田块在实施项目前后的结果相对应,符合项目基线定义的要求;但是,使用该方法的前提是项目参与者已提前 1~2 a 预知该田块要参与测土配方施肥项目,因而使用该方法设定基线有一定的局限性。二是选取在项目实施期内同区域种植模式、施肥方式、土壤理化性质相同的农田作为样地,同时测定项目区和样地有机碳变化和温室气体排放量,最终取所有样地结果的平均值作为基线水平与参与项目农田进行对比。该方法可以避免第一种方法的不足,但在所选取样地的状况需要与项目农田尽量相同,这便需要项目计量者在选取样地时更加谨慎。

2.1.2 测土配方施肥项目边界(Boundary)的认定

项目边界是指项目参与方控制范围内的项目活动的时空范围即空间边界和时间边界^[10-11],前者是空间边界即项目进行计量时所关注的地理范围,而后者是时间边界即项目实施的活动周期的计量范围。

测土配方施肥活动主要发生在种植农作物的田块,因此项目的空间边界应该是参与测土配方施肥的田块。简单地说,是实施测土配方施肥的农田范围。从计量和测量来说,项目空间边界一般是采用固定的边界标记、遥感数据、全球定位系统、国家鉴定的能清晰描绘地形的方式等来勾画和记录的空间位置。

项目计量的时间边界主要根据计量项目的特点和项目组织者碳交易的具体安排来进行设定^[10-11]。测土配方施肥是农业项目,施肥是围绕作物生产进行的农业实践,就一年生作物而言,其减排量核算的时间边界最短可设定为1 a,甚至一个作物生长季;而其土壤固碳量的计量则需要较长的时间边界,特别是利用直接监测的方法进行计量时,由于土壤有机碳2 a内的变化很难监测到,而且短时间内监测结果并不准确,我们一般将碳储量计量的时间边界设定为3 a,甚至5 a以上。而项目时间边界的确定除了根据拟议项目积累碳的速率、减排效果来确定外,还取决于市场的前景以及土地的价值。如果碳汇市场的不确定性很大,造成项目实施的时间不确定,那么,为了更灵活地使用土地,可以选择相对较短的时间边界;反之,可选择较长的时间。

2.1.3 测土配方施肥项目的(温室气体)泄漏(Leakage)问题

泄漏是指发生于项目活动边界之外的、由项目活动引起的、可测定的温室气体排放增加的情形^[10-11]。例如,在实施造林项目过程中,运输苗木、提供肥料等活动都会增加化石燃料的燃烧或温室气体的排放,使项目周边区域的排放增加^[10]。那么,在测土配方施肥项目计量中,应当考虑的是超出施肥田块,但由于测土配方施肥项目的实施而造成的额外排放。由于测土配方施肥项目的实施造成的边界外的排放主要有以下4种:一是项目实施前工作人员需要对欲参与项目农田的土壤养分状况进行分析,从而得到适用于该农田的施肥配方。这需要工作人员从田间采集样品,并带回实验室进行分析,这个过程所带来的排放主要包括样品运输过程中的燃油排放以及实验室分析过程中的能源排放,这些排放发生在边界以外,属于泄漏。二是运输肥料带来的边界外区域的排放。产生这种排放的原因在于:第一,肥料购买量将影响运输工具的载重,购买肥料量多,运输工具载重大将导致耗油量的增加;第二,肥料需求量的差异将影响购买的次数,例如,需肥量少的农户,第一年购买的肥料量可能满足其2~3 a的使用,这将节省运输工具的油耗和温室气体排放量。三是肥料生产工厂的排放。农田肥料施用的减少或增加可能通过对肥料生产商肥料销售量的影响而影响生产商生产肥料的数量;而肥料生产过程中会有大量温室气体的排放^[9],生产量减少或增加都会带来生产过程中排放量的变化。但肥料生产排放的计量与农田生产相互作用可能较小,仅当大范围农田

削减肥料用量时可能影响肥料厂商的生产量;而且,肥料生产企业的排放属于工业排放的范畴,在农业方面计量生产排放是否会造成未来农业和工业双重计量是值得考虑的。因此,肥料工业排放是否应当计入项目泄漏还需要进一步探讨。四是氧化亚氮间接排放。农田有效氮的施用将可能使得氮素通过大气扩散以及径流流失等途径到达边界以外,从而带来氧化亚氮的间接排放,IPCC 2006亦给出了该排放的缺省排放系数,然而氧化亚氮间接排放量较少且该排放系数具有较大的不确定性,使得计量结果可能存在很大的不确定性;而且,对于氧化亚氮间接排放的监测非常困难,增加了计量的难度和不确定性。因此,根据国际方法学编制通行的保守性、成本有效性和降低不确定性的原则,氧化亚氮间接排放在项目计量时可以不予考虑。

2.2 项目温室气体排放与减排途径

2.2.1 农田生态系统碳库和边界内温室气体排放源认定

2.2.1.1 生态系统碳库的选取

通过陆地生态系统固碳,实现温室气体减排是应对全球气候变化的重要手段之一。而碳库包括地上生物量,地下生物量,凋落物,秸秆所含碳及土壤碳库^[11]。有研究表明,全球农业在不同的碳价格下的经济减排潜力为1 600~4 300 Mt CO₂当量,其中90%来自减少土壤CO₂释放(即土壤固碳)^[12]。而良好施肥作为IPCC提倡的优良农田管理做法可以有效增加土壤的碳储存,因此在测土配方施肥项目活动中,土壤碳库的计量不可或缺;而一年生作物在成熟后其地上部分将被移除,地下部分和还田后的秸秆经过一系列的腐殖化过程转变为土壤碳库的一部分,因此农作物碳库将不在计量的范围之内。

2.2.1.2 农田温室气体关键排放源

在农业生产过程中,可能产生温室气体排放的排放源主要有以下几个方面:

(1)农田土壤CO₂排放

土壤呼吸是指土壤释放CO₂并吸收O₂的过程,是土壤与大气进行气体交换的动态过程^[13]。而土壤呼吸主要由有机碳分解、残茬的分解以及根系的呼吸组成^[14]。总的来说,土壤呼吸是生物代谢和物理化学过程的综合作用。影响土壤呼吸的因素很多,如施肥^[15]、耕作^[16]、土地利用方式^[17]、气候变化^[18]等。有研究报道,全球土壤呼吸释放的碳量估计为8 014 Pg·a⁻¹,仅次于全球陆地生态系统总初级生产力的估算值,是燃料燃烧和森林砍伐排放进入大气CO₂量的10倍以上,

是全球碳循环中一个主要的流通途径^[19]。

(2) 淹水稻田甲烷排放

作为主要的温室气体之一,甲烷的100 a尺度的全球增温潜势是二氧化碳的25倍^[1]。甲烷是极端厌氧环境条件下的产物,在淹水环境中,土壤处于厌氧状态,土壤中的有机物质(动植物残体,根系分泌物以及有机肥等)被各类细菌(主要是嫌气性纤维分解菌和果胶分解菌等)组成的复杂链转化成比较简单的基质(如 H_2 、 CO_2 、乙酸、甲酸等),这些基质又被产甲烷菌作用转化成甲烷^[20]。稻田由于其较为特殊的水分管理模式,是大气甲烷的重要排放源之一。据IPCC第4次评估报告^[1]报道,稻田 CH_4 的年排放量为31~112 Tg,占全球总排放的5%~19%。

(3) 农田土壤氧化亚氮排放

氧化亚氮在100 a尺度的增温潜势为二氧化碳的298倍^[1],是一种极重要的农业源温室气体。而农业是大气中 N_2O 最主要的释放源,其贡献达60%^[1]。氧化亚氮是硝化和反硝化过程中的中间产物,农田土壤中有效氮的增加可提高硝化和反硝化率,进而使 N_2O 的排放增加。而这种因化肥和有机肥对农田土壤有效氮的投入带来的该施氮土壤氧化亚氮的排放称之为直接排放。

(4) 农用器械的燃油排放

近年来,农业的发展使得越来越多的农民使用各类农用器械而逐步代替了原始的手工劳作。在播种、耕作、施肥、收获等各个环节都在逐步实现机械化的作业。中国农村统计年鉴显示^[21],我国农业柴油使用量已由2000年的1405万t增加到2007年的2020.8万t,增幅44%。农用器械的使用在提高农业生产效率的同时,也带来了由于其燃油消耗带来的温室气体排放。根据本课题组研究结果^[4],我国2007年农作物生产中由柴油消耗引起的温室气体排放量较1993年增加了1.15倍。

2.2.2 测土配方施肥项目产生的关键减排途径

根据测土配方施肥活动的特点,在进行固碳减排计量时,应当重点考虑边界内由于肥料使用量的差异而造成的排放量差异。因此,本研究认为项目计量应考虑的关键减排途径如以下几个方面:

(1) 农田氧化亚氮的直接减排

化学氮肥的低利用率和过量施用是我国粮食生产面临的一个重要问题,而测土配方施肥将使得氮肥的施用量趋于合理,测土配方施肥化学氮肥施用量与常规施肥的差异,将带来氧化亚氮排放的差异;有机肥

所含氮素同样会带来氧化亚氮的排放,而不同类型有机肥的投入对农田氧化亚氮排放的影响不尽相同^[22],因此在提倡施用有机肥的同时,也应当关注有机肥中所含有效氮对农田氧化亚氮排放的贡献。

(2) 淹水稻田甲烷的直接减排

有机物料的输入将为产甲烷菌提供碳源,而淹水条件下的稻田土壤为产甲烷菌提供了适宜的条件,从而带来了甲烷的排放。在测土配方施肥活动中,对甲烷排放的主要影响因子是肥料的施用状况。前人的研究表明,氮肥施用种类、数量、方式和时间对稻田甲烷排放有着不同的影响^[23];而有机肥的施用一方面为土壤产甲烷菌提供了丰富的产甲烷基质,另一方面,淹水条件下有机肥的快速分解加速稻田氧化还原电位(Eh)的下降,为产甲烷菌的生长提供了适宜的环境条件,从而促进稻田 CH_4 的排放。而不同种类有机肥对稻田甲烷的产生有着不同的影响,邹建文等^[22]发现不同有机肥施用下稻田 CH_4 排放总量为:菜饼>麦秆>牛厩肥>猪厩肥,其原因可能是牛厩肥的有机碳含量较低,而猪厩肥的有机碳大部分以大分子复杂有机物存在,可利用的产甲烷前体较少。测土配方施肥活动中,肥料施用量、施肥次数和方法将可能影响到农田的水分管理模式,Cai等^[24]指出水稻生长期持续淹水,稻田 CH_4 排放量远远高于经历烤田和干湿交替处理的稻田 CH_4 排放量;Toyprayoon等^[25]研究了烤田天数和烤田频度对稻田 CH_4 排放的影响,表明水稻生长期水分排干大大降低了稻田 CH_4 的排放,排水一次及排水两次相对于持续淹水 CH_4 排放量分别降低了29%和36%。因此,测土配方施肥与常规施肥相比,不同的施肥模式以及水分管理措施将使得稻田甲烷排放状况有所差别。

(3) 施肥器械使用的燃油消耗直接减排

农业技术和管理水平的提高使得越来越多的农民采用机械化施肥。机械化施肥可以减少农民手工劳动负担,最重要的是机械施肥可以达到肥料深施、匀施以促进肥料高效利用,提高农作物产量^[26]。但是,机械施肥不可避免的带来了由于机械燃油消耗造成的温室气体排放。施肥量与施肥次数均对机械使用的燃油消耗有所影响,测土配方施肥与常规施肥下的施肥器械温室气体排放也是项目核算边界内排放必须考虑的方面。

2.3 项目温室气体减排计量方法及途径

2.3.1 计量的一般原理

测土配方施肥与常规施肥下施肥状况的差异,带来所述几个关键排放源不同的温室气体排放量。同

时,良好施肥下有机碳积累速率的增加已被诸多学者认同;Wang 等^[6]研究表明,与单施氮肥和化肥相比,有机施肥和化肥配合平衡施肥普遍较大幅度提高了土壤有机碳积累速率。因此,可以得到测土配方施肥项目固碳减排计量的总公式,如下式所示。

$$R_{\text{net}}=N+C+M+O+T$$

式中: R_{net} 为项目净碳汇量,kgC; N 为氧化亚氮直接排放量的差值,kgC; C 为农田有机碳库的变化量的差值,kgC; M 为甲烷排放量的差值,kgC; O 为机械燃油燃烧下温室气体排放量的差值,kgC; T 为肥料运输造成的温室气体排放量的差值,kgC。

从计算式中可以得到在进行计量时所需的数据为:基线情景与项目情景下 N_2O 、 CH_4 以及由施肥器械引起的排放量,两个情景各自的土壤固碳速率,以及两个情景下边界外肥料运输过程中的温室气体排放。其中,施肥器械和肥料运输工具的燃油排放可根据消耗燃油数量,使用燃油燃烧的温室气体排放系数进行计算,根据 IPCC 报道的结果,柴油的排放系数为 $2.64 \text{ kgCO}_2\text{-e}\cdot\text{L}^{-1}$,汽油为 $2.26 \text{ kgCO}_2\text{-e}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[27]。农田土壤温室气体排放量和碳库变化量可通过直接监测法、参考系数法和模型模拟法获得。

2.3.2 温室气体直接监测计量

直接监测法是利用田间试验的方法对温室气体排放和固碳量进行直接监测。农田 N_2O 和 CH_4 排放通量的测定方法主要有微气象学法、静态箱(或动态箱)-气相色谱法及同位素法等^[28],其中静态箱-气相色谱法应用最为广泛^[29]。该方法主要是通过测定一定时间内(一般是30 min内),不同时间点静态箱内温室气体浓度的变化,利用线性回归分析得出箱内温室气体浓度变化率,再将生长季内每次观测值按时间间隔加权累加平均后,便可得到该温室气体的季节排放量。

有机碳储量变化的监测目前主要有以下3种方法:第一种方法是起始终了差减法。这种方法首先测定项目计量起始年有机碳储量,项目实施数年后,再次测定其碳储量,将两次碳储量相差,并除以年数,便可得到有机碳储量年变化量,值为正,则体现为固碳,为负,则说明这几年有机碳库有所损失。已有许多学者利用该方法对农田有机碳变化特征进行了研究^[6,30]。第二种方法是投入-排放法。该方法通过测定计量年度土壤异氧呼吸状况和凋落物、根系、秸秆和有机肥投入状况,来计算投入的碳与土壤排放出的碳的差值,若差值为正,则体现为固碳。第三种方法是连续数年对土壤有机碳储量进行测定,最终采用回归方

法求得方程,便可得到有机碳储量年均变化率。

直接监测法可直观体现监测田块的实际情况,得出的结果有一定的可信度。但直接监测法所得到的结果是各随机采样点的测定结果,其是否可以代表整个田块的状况有一定的不确定性;而且,利用直接监测法的成本较高,在一些条件不能满足的地区可能不适用。

2.3.3 参考系数法估计计量

IPCC 2006 国家温室气体排放清单指南中对 N_2O 和稻田 CH_4 排放量的计算方法进行了详细的介绍,提出了一系列因子的缺省值供参考^[27]。国内外学者也对两种温室气体排放量的计量有很多的研究^[31-33]。其中,我国学者 Zou 等^[32]分析了不同灌溉模式的稻田 N_2O 的排放特征,得出了基于灌溉模式的氧化亚氮排放系数,其计算得出的结果不确定范围大大小于 IPCC 结果;Lu 等^[31]对旱地 N_2O 排放与氮素施用量和降水量进行耦合分析,得出旱作土壤当地的降水量对 N_2O 的排放有显著影响的结论,其统计得到的旱地 N_2O 排放计算方法与 IPCC 相比缩小了不确定性的范围。

IPCC 2006 亦提出了土壤碳库变化计算方法,该方法综合了土地利用、耕作和农业投入3个因子的对土壤碳库的共同作用,并列举了3个因子在不同层次、不同气候区的缺省参考值。本课题组最近的一项研究结果得出在有机无机配合使用情景下,农田有机碳库年变化幅度为3.71%(旱地)和2.09%(水田),而在N、P、K合理配施情景下,有机碳库年变化幅度为2.21%(旱地)和1.26%(水田)^[34]。也有其他学者对我国不同地区不同情境下有机碳变化情况进行了统计分析,在进行项目固碳计量时,可以作为变化因子作为参考。

参考系数法的优点在于成本低,计算方便,而且由于研究得出的系数均为综合大量数据得出,也具有一定的代表性和准确性。但这些系数一般由综合大尺度区域的数据得出,其本身便有一定的不确定性,而在具体地区进行项目计量时,这些系数是否能够代表该地区的实际状况,是值得考虑的。

2.3.4 模型模拟法估计计量

鉴于低成本和模拟结果准确性的提高,近年来模型法已发展得日益成熟,并被诸多学者用来估算农田生态系统有机碳动态变化和温室气体的排放。目前应用最为广泛的是DNDC、Century、RothC 3个模型,而这3个模型经过数年的发展,其模拟结果愈来愈可靠。已有诸多学者运用这3个模型对我国农田生态系

统进行了模拟研究,研究表明,RothC 可以模拟和预测不同施肥措施下我国华北潮土 SOC 变化趋势,但在大量秸秆还田时需调整部分模型参数^[35];该模型对我国东北温带地区黑土有机碳的模拟结果良好^[36]。Li 等研究表明^[37],DNDC 对我国稻田 CH_4 、 N_2O 排放以及有机碳变化模拟效果较好;邱建军等也报道了 DNDC 模型可以较好的模拟东北地区耕地土壤有机碳的变化情况^[38]。此外,Century 模型也可以很好模拟东北黑土区有机碳变化^[39]。

同时,我国学者通过对我国农田的试验和研究,开发了能够很好模拟我国一些区域农田的生态系统模型。黄耀教授团队开发了稻田甲烷排放模型—— CH_4MOD 并对其进行了修正^[40]和验证^[41],结果表明该模型模拟的中国水稻主产区稻田甲烷排放的变化趋势与实测值有良好的一致性。该团队还建立了农田有机碳动态模拟模型^[42],经修正^[43]和验证^[44],其模拟结果能较好反应华东地区农田有机碳变化。

利用模型模拟的方法来计量项目固碳减排量,能够以较少的成本得到比较准确的结果。但在运用该方法时,需要搜集能够运行这些模型的有效数据,并且需要根据当地的农业土壤类型和种植类型调整模型内部参数,以便得到更加可信的结果。

2.4 计量的不确定性分析

进行不确定性评估是进行项目减排计量不可或缺的步骤之一。进行不确定性分析的目的并非是争论从方法学中获得的结果正确与否,而是帮助确定未来改进方法学准确性的优先努力方向和指导项目执行者对方法学的选择决策。对不确定性的研究通常是通过确定不确定性的来源、确定量化不确定性的方法以及确定合并不确定性的方法来进行的。不确定性源的确定需要根据计量的具体方法进行。直接监测法的不确定性源主要是监测过程中的试验误差和随机抽样误差;参考系数法的不确定性主要来自系数的不确定性以及调查数据的不确定性;利用模型估算时存在的不确定性源主要包括初始(引用)值的不确定性、输入参数的不确定性、模型运算法则的不确定性以及与真实数据对比出的不确定性^[45-46]。

关于量化和合并不确定性,《IPCC 2000 年优良做法和指南》建议了一种量化不确定性的方法^[47],即用估计值的 95% 的置信区间来表示不确定性,之后根据不确定性量的合并方式选用相对应的计算方法进行合并,这种量化和合并方法适用于直接监测法和参考系数法;而对于模型模拟结果的不确定性,可以采

用经典的蒙特卡洛模拟方法进行分析。例如,Ogle 等^[48]基于经典的蒙特卡洛模拟发展了一种量化 Century 模型模拟结果不确定性的方法,而 DNDC 模型则推荐采用最敏感因子方法结果对蒙特卡洛模拟进行不确定性分析^[49]。

3 结论

气候变化下各行各业的减排增碳已开始全面展开,开发合理、可行的固碳减排计量方法学是进行碳交易的基础和关键。农业方面减排潜力的可观已被诸多学者证实,在固碳减排减缓气候变化的同时,通过碳交易使得农民在参与项目的同时得到利益,是我们追求的双赢局面。本研究通过参考 CDM 项目方法学的理论框架,将农田固碳理论、温室气体排放理论与测土配方施肥项目相结合,探讨了如何发展适合中国国情的测土配方施肥固碳减排计量方法学,提出了以常规施肥为基准线,施肥下作物生长田块为边界,以有效氮施用带来的氧化亚氮排放、稻田甲烷排放和施肥器械的排放为边界内关键排放源,肥料运输过程中的排放为泄漏,选择农田土壤有机碳库作为计量碳库的一整套方法学理论框架,并提出了 3 种计量方法作为参考。而发展适用于项目参与者、管理者的方法学操作手册将对未来我国农业碳交易提供简单、易行的计量工具。

参考文献:

- [1] IPCC work group III. Mitigation of climate change[R]/Metz B, Davidson O R, Bosch P R, et al. The fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 2007. USA, NY, United Kingdom and New York, Cambridge, Cambridge University Press, 2007.
- [2] Chen G Q, Zhang B. Greenhouse gas emissions in China 2007: Inventory and input-output analysis[J]. *Energy Policy*, 2010, 38: 6180-6193.
- [3] UK-China Project on "Improved Nutrient Management in Agriculture: A Key Contribution to the Low Carbon Economy"[EB/OL]. Beijing, SAIN project, 2010. [http://www.sainonline.org/SAIN-website\(English\)/pages/Projects/lowcarbon.html](http://www.sainonline.org/SAIN-website(English)/pages/Projects/lowcarbon.html)
- [4] Cheng K, Pan G X, Smith P, et al. Carbon footprint of China's crop production: An estimation using agro-statistics data over 1993—2007[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 142(3-4): 231-237.
- [5] 中国农业部测土配方施肥网站[EB/OL]. 中国农业部, 2010. <http://www.moa.gov.cn/ztzl/ctpfsl/Recommended fertilization website>.
- [6] Wang C J, Pan G X, Tian Y G, et al. Changes in cropland topsoil organic carbon with different fertilizations under long-term agro-ecosystem experiments across mainland China[J]. *Sci China Life Sci*, 2010, 53: 858-867.
- [7] 李玉娥,董红敏,万运帆,等. 规模化猪场沼气工程 CDM 项目的减排

- 及经济效益分析[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2580–2583.
- LI Yu-e, DONG Hong-min, WAN Yun-fan, et al. Emission reduction and financial analysis of intensive swine farm using biogas digester to treat manure and developed as a CDM projects[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2580–2583.
- [8] 董红敏, 李玉娥, 朱志平, 等. 农村户用沼气 CDM 项目温室气体减排潜力[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 293–296.
- DONG Hong-min, LI Yu-e, ZHU Zhi-ping, et al. Greenhouse gas emission reduction potential of rural household biogas CDM project [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(11): 293–296.
- [9] 农业部种植业管理司, 全国农业技术推广服务中心. 测土配方施肥技术问答[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 1–4.
- Planting Industry Management Department, National Agricultural Technology Extension Service, Ministry of Agriculture. Questions and answers for soil testing and fertilizer[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005: 1–4.
- [10] 武曙红. 我国 CDM 造林和再造林项目方法学及案例研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006: 1–223.
- WU Shu-hong. The methodologies and case study on afforestation and reforestation project under clean development mechanism in China [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006: 1–223.
- [11] 戴伟娣. 清洁发展机制简介(II)——清洁发展机制方法学理论基础[J]. 生物质化学工程, 2006, 40(2): 50–52.
- DAI Wei-di. Brief introduction to clean development mechanism(CDM): Brief theories on methodology of clean development mechanism[J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2006, 40(2): 50–52.
- [12] Smith P, Martino D, Cai Z C, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2008, 363(1492): 789–813.
- [13] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 119–120.
- HUANG Chang-yong. Soil science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008: 119–120.
- [14] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus*, 1992, 44B: 81–99.
- [15] 刘晓雨, 潘根兴, 李恋卿, 等. 太湖地区水稻土长期不同施肥条件下油菜季土壤呼吸 CO₂ 排放[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2506–2511.
- LIU Xiao-yu, PAN Gen-xing, Li Lian-qing, et al. CO₂ emission under long-term different fertilization during rape growth season of a paddy soil from Tailake region, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2506–2511.
- [16] Barreto R C, Madari B E, Maddock J E L, et al. The impact of soil management on aggregation, carbon stabilization and carbon loss as CO₂ in the surface layer of a Rhodic Ferralsol in Southern Brazil[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 132: 243–251.
- [17] Sheng H, Yang Y S, Yang Z J, et al. The dynamic response of soil respiration to land-use changes in subtropical China[J]. *Global Change Biology*, 2009, 16(3): 1107–1121.
- [18] David T T, Mark G J, Lee E H, et al. Effects of elevated CO₂ and O₃ on soil respiration under ponderosa pine[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38: 1764–1778.
- [19] Raich J W, Potter C S, Bhagawati D. Interannual variability in global soil respiration, 1980–1994[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8: 800–812.
- [20] Holzapfel-Pschorn A, Conrad R, Seiler W. Effects of vegetation on the emission of methane from submerged paddy soil[J]. *Plant and Soil*, 1986, 92(2): 223–233.
- [21] 中国国家统计局农业社会经济调查司. 中国农村统计年鉴[DB]. 北京: 中国统计出版社, 1993–2007.
- Department of Rural Social Economic Survey in National Bureau of Statistics. China rural statistical yearbook[DB]. Beijing: China Statistics Press, 1993–2007.
- [22] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 不同种类有机肥施用对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的综合影响[J]. 环境科学, 2003, 24(4): 7–12.
- ZOU Jian-wen, HUANG Yao, ZONG Liang-gang, et al. Integrated effect of incorporation with different organic manures on CH₄ and N₂O emissions from rice paddy[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(4): 7–12.
- [23] 马静, 徐华, 蔡祖聪. 施肥对稻田甲烷排放的影响[J]. 土壤, 2010, 42(2): 153–163.
- MA Jing, XU Hua, CAI Zu-cong. Effect of fertilization on methane emissions from rice fields[J]. *Soils*, 2010, 42(2): 153–163.
- [24] Cai Z C, Xu H, Zhang H, et al. Estimate of methane emission from rice paddy fields in Taihu region[J]. *China Pedos*, 1994, 4(4): 297–306.
- [25] Towprayoon S, Smakgahn K, Poonkaew S. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from drained irrigated rice fields[J]. *Chemos*, 2005, 59: 1547–1556.
- [26] 嵇洪军, 徐昆, 王伟. 水稻不同施肥方式应用效果试验[J]. 现代化农业, 2010, 9: 15.
- JI Hong-jun, XU Kun, WANG Wei. Effect of different fertilization application methods on rice[J]. *Modernizing Agriculture*, 2010, 9: 15.
- [27] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [M]. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Eggleston H S, Buendia L, Miwa K, et al. (eds). Published: IGES, Japan, 2006.
- [28] 王明星. 中国稻田甲烷排放[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 19–31.
- WANG Ming-xin. Methane emission in China's rice paddy[M]. Beijing: Science Press, 2001: 19–31.
- [29] 王跃思. 大气中痕量化学成分的分析方法研究及实际应用[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 1998.
- WANG Yue-si. The study on the analysis of atmospheric trace chemical composition and its practical applications[D]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 1998.
- [30] Pan G X, Xu X W, Smith P. An increase in topsoil SOC stock of China's croplands between 1985 and 2006 revealed by soil monitoring[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 136(1–2): 133–138.
- [31] Lu Y Y, Huang Y, Zou J W, et al. An inventory of N₂O emissions from agriculture in China using precipitation-rectified emission factor and background emission[J]. *Chemos*, 2006, 65: 1915–1924.
- [32] Zou J W, Lu Y Y, Huang Y. Estimates of synthetic fertilizer N-induced direct nitrous oxide emission from Chinese croplands during 1980–2000[J]. *Environment Pollution*, 2010, 158(2): 631–635.

- [33] Yan X, Yagi K, Akiyama H, et al. Statistical analysis of the major variables controlling methane emission from rice fields[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11: 1131–1141.
- [34] 王成己, 潘根兴, 田有国. 保护性耕作下农田表土有机碳含量变化特征分析: 基于中国农业生态系统长期试验资料[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(12): 2464–2475.
- WANG Cheng-ji, PAN Gen-xing, TIAN You-guo. Characteristics of cropland topsoil organic carbon dynamics under different conservation tillage treatments based on long-term agro-ecosystem experiments across mainland China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2464–2475.
- [35] 王金州, 卢昌艾, 张金涛, 等. RothC 模型模拟华北潮土区的土壤有机碳动态[J]. *中国土壤与肥料*, 2010(6): 16–21.
- WANG Jin-zhou, LU Chang-ai, ZHANG Jin-tao, et al. RothC model simulation of soil organic carbon dynamics of fluvo-aquic soil in Northern China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2010(6): 16–21.
- [36] Yang X M, Zhang X P, Fang H J, et al. Long-term effects of fertilization on soil organic carbon changes in continuous corn of northeast China: RothC model simulations[J]. *Environment Management*, 2003, 32(4): 459–465.
- [37] Li C S, Frohling S, Xiao X M, et al. Modeling impacts of farming management alternatives on CO₂, CH₄, and N₂O emissions: A case study for water management of rice agriculture of China[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19: 1–10.
- [38] 邱建军, 王立刚, 唐华俊. 东北三省耕地土壤有机碳储量变化的模拟研究[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(8): 1166–1171.
- QIU Jian-jun, WANG Li-gang, TANG Hua-jun. Study on the situation of soil organic carbon storage in Arable Lands in Northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(8): 1166–1171.
- [39] 高鲁鹏, 梁文举, 姜 勇, 等. 利用 CENTURY 模型研究东北黑土有机碳的动态变化[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(5): 36–40.
- GAO Lu-peng, LIANG Wen-ju, JIANG Yong, et al. Dynamics of organic C in black soil of Northeast China, simulated by CENTURY model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(5): 36–40.
- [40] 张 稳, 黄 耀, 郑循华, 等. 稻田甲烷排放模型研究: 模型及其修正[J]. *生态学报*, 2004, 24(11): 2347–2352.
- ZHANG Wen, HUANG Yao, ZHENG Xun-hua, et al. Modeling methane emission from rice paddies: Model and modification [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2347–2352.
- [41] 张 稳, 黄 耀, 郑循华, 等. 稻田甲烷排放模型研究: 模型的验证[J]. *生态学报*, 2004, 24(12): 2679–2685.
- ZHANG Wen, HUANG Yao, ZHENG Xun-hua, et al. Modeling methane emission from rice paddies: Model validation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2679–2685.
- [42] 黄 耀, 刘世梁, 沈其荣, 等. 农田土壤有机碳动态模拟模型的建立[J]. *中国农业科学*, 2001, 34(5): 465–568.
- HUANG Yao, LIU Shi-liang, SHEN Qi-rong, et al. Model establishment for simulating soil organic carbon dynamics[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2001, 34(5): 465–568.
- [43] 于永强, 黄 耀, 张 稳. 华东地区农田土壤有机碳动态模拟研究: 模型的验证与灵敏度分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2006, 22(6): 83–93.
- YU Yong-qiang, HUANG Yao, ZHANG Wen. Modeling farmland soil organic carbon dynamics in eastern China: Model validation and sensitivity analysis[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2006, 22(6): 83–93.
- [44] 刘世梁, 黄 耀, 沈其荣, 等. 农田土壤有机碳动态模拟模型的检验与应用[J]. *中国农业科学*, 2001, 34(6): 644–648.
- LIU Shi-liang, HUANG Yao, SHEN Qi-rong, et al. Validation and application of a soil organic carbon model [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2001, 34(6): 644–648.
- [45] Klepper O. Multivariate aspects of model uncertainty analysis: Tools for sensitivity analysis and calibration[J]. *Ecological Modelling*, 1997, 101: 1–13.
- [46] Kros J, De Vries W, Janssen P, et al. The uncertainty in forecasting trends of forest soil acidification[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1993, 66: 29–58.
- [47] IPCC. 2000 IPCC Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories[M]. Japan: IGES, 2000.
- [48] Ogle S M, Breidt F, Eve M D, et al. Uncertainty in estimating land use and management impacts on soil organic carbon storage for US agricultural lands between 1982 and 1997[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(11): 1521–1542.
- [49] 新罕布什尔大学地球海洋与空间研究所. DNDC 模型使用手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2010.
- Institute for the Study of Earth, Oceans and Space, University of New Hampshire. DNDC model manual[M]. Beijing: China Agriculture Science Technology Press, 2010.