

旱地测土配方施肥温室气体减排碳交易量核算

高春雨, 高懋芳[※]

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘 要: 碳排放交易是促进全球温室气体减排, 减少全球二氧化碳排放所采用的市场机制。测土配方施肥对于减少中国集约化农业生产区化肥施用量, 减排温室气体 (greenhouse gas, GHG) 具有重要作用。该研究按照碳交易方法学的基本流程, 撰写了基于 DNDC (denitrification-decomposition) 模型的测土配方施肥减排 GHG 的碳交易计量方法, 并以山东省桓台县为例, 测算了该县实施测土配方施肥减排 GHG 的可交易碳贸易量。主要结论有 1) 桓台县麦-玉轮作系统施肥存在着氮、磷过量, 钾基本适度的现象, 氮、磷、钾平均施肥量达到了 515.1、289.5 和 145.7 kg/hm²。2) 山东省桓台县麦-玉轮作系统实施测土配方施肥可交易的碳贸易量为 26 485.8 t (以 CO₂ 当量计, 下同), 其中农田减排占 35.3%、氮肥生产减排占 58.3%、磷肥生产减排占 6.8%、钾肥增加排放 0.01 万 t, 占-0.4%。各个乡镇由于耕地面积及施肥量的不同, 减排量存在一定的差异。3) 按照 2016 年 3 月深圳碳交易市场中国核证减排量价格计算, 桓台县实施农田测土配方施肥 GHG 减排项目可实现总收入 1 286.4 万元, 满足小型碳交易项目要求。4) 以 DNDC 模型为主要计量工具的测土配方施肥碳交易方法学, 可以实现县域或更大区域实施测土配方施肥减排碳交易量核算, 对未来测土配方施肥 GHG 减排碳交易项目的实施具有重要意义。

关键词: 模型; 肥料; 温室气体; 测土配方施肥; 碳交易方法学; DNDC 模型

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.031

中图分类号: X511

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-12-0212-08

高春雨, 高懋芳. 旱地测土配方施肥温室气体减排碳交易量核算[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 212-219. doi:

10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.031 <http://www.tcsae.org>

Gao Chunyu, Gao Maofang. Quantitative analysis of carbon trade of upland greenhouse gas emission reduction from precise fertilization[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(12): 212-219. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.031 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

清洁发展机制 (clean development mechanism, CDM) 是《京都议定书》确定的温室气体减排的灵活履约机制之一, 2005 年 2 月 16 日开始正式实施。CDM 碳交易项目是指附件一国家与非附件一国家缔约方合作, 在发展中国家实施温室气体减排项目, 实现促进发展中国家可持续发展和协助发达国家缔约方实现议定书下的温室气体减排目标^[1]。截至 2016 年 3 月, 在 CDM 执行理事会注册的 CDM 碳交易项目共 7695 个, 已核证减排量达到 16 600 万 t^[2], 中国碳交易起步早, 碳减排潜力大^[3], 是世界上最大的 CER (certified emission reduction) 供应国^[4]。CDM 项目减排量交易是出售一种项目, 必须采用科学的方法计算、测量、核实和核准^[5]。CDM 执行理事会 (executive board, EB) 批准的方法学共 249 项。农业 CDM 项目发展相对滞后。目前, 在 CDM 执行理事会注册的农

业 CDM 项目仅为 132 个, 占项目总数的 1.66%, 这主要是由于农业 CDM 项目方法学不完善、市场主体缺失、交易成本大等原因造成的。与农业相关的经执行理事会批准的方法学共 8 项, 仅占方法学总量的 3.2%, 涉及畜禽粪便管理、生物质发电、酸性土壤农田大豆玉米轮作系统、调整水稻种植水肥管理措施减排甲烷等几个方面^[2]。由于农业 CDM 项目具有减少贫困、改善环境等众多优点, 农业碳贸易方法学以及项目开发将成为中国 CDM 发展的重要趋势^[6-7]。自 2012 年 6 月以来, 受全球气候变化谈判进展缓慢等影响, 全球碳交易市场经历了前所未有的曲折, 碳交易价格也随之大大幅度下跌, 进而影响了全球农业碳交易市场项目开发。自《京都议定书》第一期承诺在 2012 年底到期之后, 中国不承担减排义务的局面已一去不复返, 中国碳交易市场将由此前的主要作为出售方参与 CDM, 变为以企业为主的多主体参与的碳排放权交易。2013 年以来, 中国在深圳等 7 省市建立了碳交易试点, 中国自愿减排信息交流平台正式运行, 国家发改委已将 CDM 项目中 52 个使用频率较高、适用性较好的方法学转化成为第一批国内自愿减排的方法学, 全国统一的碳市场计划于 2016 年运行^[8-10]。

农田测土配方施肥具有巨大的减排潜力, 根据《2014 年中国统计年鉴》计算, 2013 年, 中国农田氮肥施用量达到 2 394 万 t, 是 1980 年的 2.56 倍。2005 年, 农业活动 N₂O 排放量达到 2 910 万 t (以 CO₂ 当量计, 下同),

收稿日期: 2015-07-02 修订日期: 2015-12-15

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(31200337)和 973 计划(2012CB417105)。

作者简介: 高春雨, 男, 黑龙江双城市人, 副研究员, 博士, 主要从事农业碳贸易、农业生态等方面的研究。北京 北京中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 100081。Email: gaochunyu@caas.cn

※通信作者: 高懋芳, 女, 山东五莲人, 副研究员, 博士, 主要从事农业生态、碳氮循环监测与模拟等方面的研究。北京 北京中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 100081。Email: gaomaofang@caas.cn

占中国 N_2O 排放总量的 74.0%^[11]。研究表明,目前中国化肥利用率只有 50%~60%^[12],假如施入的氮肥能被作物完全吸收,那么满足作物生长发育所需要的氮肥量会大大减少, N_2O 的释放量也会相应降低^[13]。GAINS (greenhouse gas and air pollution interaction synergies) 模型估计,通过减少氮肥施用量可以减少 6% 的农田土壤 N_2O 排放量^[14],如果能够通过改进施肥技术,中国可降低 30% 的氮肥施用量^[15]。玉米小麦过量施肥是中国农业生产集约区普遍现象,许多田块氮肥施用量达到了 250~350 kg/hm²,远高于 150~190 kg/hm² 的适宜水平,减量施肥具有一定的空间^[16]。2005 年,中国开始实施测土配方施肥,实施测土配方施肥 GHG 减排碳交易对于减少农田施肥量,增加农民收入,实现农业的可持续发展具有重要的意义,属于碳交易项目应该重点支持的领域。目前已经实现测土配方施肥在所有农业县的覆盖,《全国农业可持续发展规划(2015—2030 年)》指出要普及和深化测土配方施肥。然而,目前还没有建立实施测土配方施肥减排温室气体的碳交易方法学,尚未开展实施测土配方施肥减排 GHG 碳交易的可行性研究。

本研究提出以 DNDC 模型为主要计量工具的测土配方施肥 GHG 减排碳交易计量方法,并以中国集约农业生产区-山东省桓台县为案例,测算了农田实施测土配方施肥的减排潜力。本研究旨在为旱地实施测土配方施肥减排碳交易准备方法学,并评估以县域为单元实施测土配方施肥减排碳交易的可行性,对于明确测土配方施肥减排潜力,促进农田测土配方施肥碳交易项目实施具有一定的理论和现实意义。

1 旱地测土配方施肥温室气体减排碳交易方法学构建

一个完整的碳交易方法学包括技术和措施、项目边界、基准线、项目排放、额外性分析、泄露、监测等部分^[17]。

1.1 技术和措施

1) 测土配方施肥是指根据土壤测试结果、田间试验、作物需肥规律、土壤供肥特点和农业生产要求,在合理施用有机肥的基础上,提出氮、磷、钾、中量元素、微量元素等肥料数量与配比及其适时、适法施用的科学施肥方法。

2) 通过布点取土样、测试土壤、配方施肥,在保证产量的前提下,减少旱地农田化肥、尤其是氮肥投入,降低农田 N_2O 的排放量及化肥生产耗能。

3) 在应用测土配方施肥前,农户基本按照习惯或经验施肥,施肥量尤其是氮肥用量大于测土配方施肥量。

4) 为便于监测和保证项目实施的规模,必须集中连片实施测土配方施肥。

5) 实施项目前,组织农技推广部门,聘请相关专家,以村为单元,向农户传授测土配方施肥的相关知识与技术。

6) 不允许改变作物种植类型,不允许改变除测土配方施肥外的其他管理措施。

7) 项目参加者必须和项目开发者签订协议,项目开发者与农户签订协议,项目实施所获得的减排量归项目开发者所有,项目实施后农户将按照协议施用配方肥。

8) 本方法不仅适用于特定县(市)测土配方温室气体减排,还可应用到其他更大区域范围。

1.2 边界

项目边界包括拟实施测土配方施肥项目区域所包含旱地农田农作物种植的地理位置,以及化肥生产企业的化肥生产过程(表 1)。

表 1 项目边界内的排放源和气体选择
Table 1 Emission sources and gases included within project boundary

情景 Scenario	排放源 Source	气体 Gas	计入/排除 Included/ Excluded	理由/解释 Justification/Explanation
基准线 Baseline	农田排放	N_2O	计入	主要排放源
		CH_4	排除	基准线和项目排放差别不大
		CO_2	排除	基准线和项目排放差别不大
	化肥生产	N_2O	排除	不排放
		CO_2	计入	化肥生产耗能排放
		CH_4	排除	不排放
项目线 Project activity	农田排放	N_2O	计入	主要排放源
		CH_4	排除	基准线和项目排放差别不大
		CO_2	排除	基准线和项目排放差别不大
	化肥生产	N_2O	排除	不排放
		CO_2	计入	化肥生产耗能排放
		CH_4	排除	不排放

1.3 基准线

1.3.1 基准线定义

项目的基准线是指在不实施项目情况下,常规旱地种植农田产生的 N_2O 排放量以及化肥生产过程中 CO_2 的排放量。常规施肥指当地实施测土配方前 3 年平均施肥量(主要指氮、磷、钾肥)、施肥品种和施肥方法。

采用分层抽样方法获取施肥及相关田间管理数据,依据测土配方区域村级(镇级)产量标准按高低顺序进行排序,再以施肥量为辅助资料逐单位进行累计,计算抽样距离,采用随机取点,对称等距抽样方法,抽选调查村。每个分区抽取 3~5 个村,采用简单随机抽样的方法选择农户。利用下式计算前三年(即常规施肥条件下)农户的施肥量。

$$F_{y,d,j} = \sum_{i=1}^n (F_{d,i,j} \cdot R_j) / n \quad (1)$$

式中 $F_{y,d,j}$ 为第 y 年 d 施肥分区 j 种肥料常规施用量(折纯量), kg/hm²; $F_{d,i,j}$ 为第 d 施肥分区第 i 个农户 j 种肥料施用量, kg/hm²; R_j 为第 j 种养分所占的比例, %; n 表示抽样农户数, y 表示常规施肥第 1、2、3 年。

利用式(2)可以计算出前 3 年的各配方区平均施肥(氮、磷、钾)量。

$$F_{\text{regular},d,j} = \sum_{y=1}^3 F_{y,d,j} / 3 \quad (2)$$

$F_{\text{regular},d,j}$ 为第 d 施肥分区 j 种肥料的常规施用量(折纯量), kg/hm²。

1.3.2 常规施肥条件下旱地农田 N_2O 排放量

建立测土配方区域农田 GHG 排放 GIS (geography information system) 数据库, 包括气象、土壤、作物、施肥、秸秆还田等信息, 运用 DNDC 模型模拟常规施肥条件下旱地农田 N_2O 的排放量。DNDC 模型一般以土壤的最大、最小有机碳含量运转两次, 估算农田 N_2O 的排放区间, 以平均值作为项目农田 N_2O 的排放量 ($BE_{y,l}$)。

$$BE_{y,l} = \sum_{d=1}^n N_2O_d \quad (3)$$

式中 $BE_{y,l}$ 为常规施肥第 y 年农田 N_2O 排放量, t; N_2O_d 为测土配方施肥 d 分区农田 N_2O 排放量, t。

1.3.3 常规施肥情况下化肥生产的 CO_2 排放量

化肥的生产需要消耗煤炭、天然气、石油等化石能源, 其计算公式为

$$BE_{y,f} = \sum_{d=1}^n (FN_d EF_{NCO_2} + FP_d EF_{PCO_2} + FK_d EF_{KCO_2}) \quad (4)$$

式中 $BE_{y,f}$ 为常规施肥情况下第 y 年化肥生产的 CO_2 排放量, t (以 CO_2 当量计, 下同); FN_d 、 FP_d 、 FK_d 分别为肥力分区 d 氮肥、磷肥、钾肥的施用量, t; EF_{NCO_2} 、 EF_{PCO_2} 、 EF_{KCO_2} 为氮、磷、钾肥生产的排放系数, t/t (以 CO_2 当量计, 下同)。

FN_d 、 FP_d 、 FK_d 计算公式为

$$FN_d = \sum_{i=1}^n AR_{i,d,N} SA_{i,d} / 1000 \quad (5)$$

式中 FN_d 为 d 施肥分区氮肥施用量, t; $AR_{i,d,N}$ 为 d 施肥分区第 i 种作物的氮肥施用量, kg/hm^2 ; $SA_{i,d}$ 为 d 施肥分区第 i 种作物的播种面积, hm^2 。 FP_d 、 FK_d 采用和 FN_d 相同的计算公式。

排放系数来源于当地主要化肥品种生产企业的调查值或采用 IPCC (intergovernmental panel on climate change) 缺省数据。

1.3.4 基准线温室气体排放总量

$$BE = \sum_{y=1}^3 (BE_{y,l} \times 298 + BE_{y,f}) / 3 \quad (6)$$

式中 BE 为基准线温室气体排放量, t (以 CO_2 当量计, 下同); $BE_{y,l}$ 为第 y 年 (常规施肥第 1、2、3 年) 农田 N_2O 的排放量, t; $BE_{y,f}$ 为第 y 年 (常规施肥第 1、2、3 年) 化肥生产 CO_2 排放量, t (以 CO_2 当量计, 下同); 298 为氧化亚氮相对于二氧化碳的增温潜势。

1.4 项目线

项目排放包括实施测土配方施肥区域内旱地农田引起的 N_2O 排放量、农业化肥生产过程中的 CO_2 排放量。在估算项目温室气体排放量之前, 需要进行土壤测试与农田肥力分区, 以便确定区域施肥量。

1.4.1 项目条件下旱地农田 N_2O 排放的确定

与基准线相同, 项目农田 N_2O 排放量采用 DNDC 的方法进行估算。

$$PE_{y,l} = \sum_{d=1}^n N_2O_d \quad (7)$$

式中 $PE_{y,l}$ 为项目条件下第 y 年农田 N_2O 的排放总量, t。

1.4.2 项目条件下生产化肥的 CO_2 排放量

$$PE_{y,f} = \sum_{d=1}^n (FN_d EF_{NCO_2} + FP_d EF_{PCO_2} + FK_d EF_{KCO_2}) \quad (8)$$

式中 $PE_{y,f}$ 为项目条件下第 y 年下所施肥料生产的 CO_2 排放量, t (以 CO_2 当量计, 下同);

FN_d 、 FP_d 、 FK_d 的计算方法与基准线相同。

1.4.3 项目条件下的温室气体总排放量

$$PE_y = PE_{y,l} \times 298 + PE_{y,f} \quad (9)$$

式中 PE_y 为项目条件下第 y 年 GHG 排放总量, t (以 CO_2 当量计, 下同)。

1.5 泄露

化肥在施入农田之前, 需要进行运输、储存、施用, 在基准线和项目排放量估算中, 均未考虑上述几个方面, 有存在泄露的可能; 在化肥生产耗能中, 只计算了生产过程煤、电能耗, 但相关材料的耗能未考虑其中, 这也可能增加了泄露; 如果项目所用的技术、设备是从另外一个项目转移过来, 则该项目存在泄露; 同时, 如果项目区的减量施肥增加了其他地区施肥量, 则认为存在泄露问题。需要说明的是, 计算泄露的结果可能为正也可能为负。目前, 中国华北平原集约农业生产区普遍存在过量施肥问题, 项目区化肥量减少不会影响其他化肥施用区施肥量变化, 不存在负泄漏, 忽略了化肥运输、储运和施用过程中的耗能, 低估了项目的减排量, 符合碳交易保守性原则。

1.6 监测

1) 参加项目的农户是重要的监测对象, 需要监测的变量包括以下几个方面: ①种植作物面积、品种; ②不同作物施肥品种及肥料用量 (氮磷钾); ③不同种植作物每公顷产量。

2) 随机调查参与项目的农户是否接受了有关测土配方施肥方面的培训, 是否对自己地块的土壤肥力、配方肥品种及施用量充分了解。

3) 在播种施肥和灌水施肥的两个关键时期, 项目第三方应组织农业肥料领域的专家, 实地调查农户是否按照项目组织实施单位、专家推荐实施测土配方施肥工程。

4) 为检验模型的模拟精度, 拟采取田间试验的方式, 模拟测土配方施肥与传统施肥两种施肥方式下, 农田 N_2O 的排放规律, 验证并校正模型。

①试验设计。选择 1~2 测土配方施肥区, 进行典型作物的 N_2O 气体测定, 每种作物设置 3 个处理 (常规施肥、测土配方施肥与对照), 3 次重复。

②基础土样采集。在试验点运用 5 分法采集基础土样 (0~20 cm), 测试指标有土壤有机质含量、N、P、全量 K、速效 K、pH 值、土壤含水量、容重及质地。

③田间记录。准确记录施肥、灌溉、除草的时间与用量。

④气象数据。建立小型气象站, 获取降雨量、最高气温、最低气温等数据。

⑤气体采样。

采样时间：在小麦、玉米生长期采集气体，每天早上 9—11 点采样，施完基肥后连续取样两周，如遇降水适当延长，降水、施肥、浇水连续采气 5 d，其他时间 3 d 采样 1 次，冬天特别冷的时候 1 周取 1 次。

目前，测定农田温室气体的主要方法包括静态箱法、微气象法、涡度相关等。考虑到成本、技术成熟情况，静态箱法是较为实用和可行的方法。

5) 项目的减排量是基准线排放量减去项目排放量和泄漏量。

$$ER_y = BE - PE_y - LE_y \quad (10)$$

式中 ER_y 指第 y 年项目减排量， t (以 CO_2 当量计，下同)； BE 指基准线排放量， t (以 CO_2 当量计，下同)； PE_y 指项目线排放量， t (以 CO_2 当量计，下同)； LE_y 指第 y 年项目泄漏量， t (以 CO_2 当量计，下同)。

2 桓台县测土配方施肥碳交易项目背景与参数获取

2.1 项目地点介绍

桓台县位于 $36^{\circ}51'50'' \sim 37^{\circ}06'00''N$ ， $117^{\circ}50'00'' \sim 118^{\circ}10'40''E$ ，总面积 509 km^2 ，辖 11 个镇 335 个行政村，1 个街道办事处和 1 个开发区，总人口 49.7 万人，其中农村人口 41.7 万人。桓台县是中国重要的商品粮生产基地，据《桓台县 2009 年统计年鉴》，全县现有耕地 2.5 万 hm^2 ，农作物总播种面积 4.96 万 hm^2 ，该区耕作制度较为单一，基本上以一年两熟的小麦玉米套种为主，小麦播种面积 2.3 万 hm^2 ，玉米播种面积 2.4 万 hm^2 ，粮食总产量 40.3 万 t ，蔬菜、棉花、大豆种植面积有限，仅占总播种面积的 4.7%。长期以来，过量施肥问题在桓台县普遍存在^[14]，该县是中国以传统小麦玉米为主要种植模式的集约农业生产区，是实施测土配方施肥碳交易的理想地点。

2.2 DNDC 模型与点位模拟

本研究利用 DNDC 模型模拟桓台县测土配方施肥碳交易项目基准线和项目线条件下 N_2O 排放，模型运行需要构建区域尺度空间数据库，并对模型进行验证。DNDC 模型是研究土壤碳、氮生物地球化学过程的机理模型，应用较为广泛，是温室气体排放量估算的重要方法之一^[18-20]。点位模拟时需要输入气象、土壤、植被、管理等相关数据，区位模拟是在点位模拟基础上的进一步扩展，在区域模拟之前，必须进行点位试验，验证、校正模型。区域模拟所需数据见表 2。

项目组在桓台县设有麦-玉轮作系统长期定位试验站，设计了常规施肥、优化施肥等处理，周期性观测农作物生长以及 N_2O 排放，运用模型对小麦、玉米轮作系统的 N_2O 排放量进行了模拟，结果表明，模型模拟结果基本捕捉到了实测到的各处理在施肥后引发的 N_2O 较大排放峰，模型模拟结果与田间实测的 N_2O 排放峰出现的时间、季节动态变化规律和总排放量均有较好的拟合结果^[21-22]。国内众多其他学者也运用 DNDC 模型对中国农业生产集约区农田 N_2O 排放进行了大量的模拟研究，并取得了较好的结果^[23-26]。因此，DNDC 模型可进行大区

域农业土壤 N_2O 排放量的估算。

表 2 DNDC 模型区位运行所需输入参数

Table 2 Input parameters required by DNDC model for regional modelling

数据库 Database	输入参数 Input parameters
气象数据库 Meteorological database	各模拟单元逐日最高气温、最低气温、降雨量
土壤数据库 Soil database	各模拟单元的氮沉降、土壤有机碳、土壤黏度、pH 值、土壤容重
作物数据库 Crop database	各模拟单元单作及轮作系统播种面积
施肥数据库 Fertilization database	各模拟单元不同作物施肥量
作物灌溉数据库 Crop irrigation database	各模拟单元有效灌溉率
种植和收获数据库 Planting and harvest database	各模拟单元单作及轮作系统的作物播种与收获日期
犁地深度数据库 Till depth database	各模拟单元单作及轮作系统犁耕日期及深度
畜禽数据库 Livestock database	各模拟单元养殖类型、头数、饲喂率、粗蛋白含量、地板面积
秸秆还田数据库 Residue retention database	各模拟单元不同作物类型的秸秆还田率

2.3 区域模拟参数获取

根据数据来源，本研究选取桓台县 11 个乡镇作为基本模拟单元建立区域模拟数据库。其中气象数据包括降雨量、最高气温、最低气温等，来源于中国气象局桓台县气象站；土壤数据包括容重、有机质含量、质地、pH 值、水分特征曲线、营养物质含量等，主要通过现场采样、实验室分析获得；作物数据包括作物品种、轮作模式、种植面积、产量等，主要来源于桓台县 2009 年统计年鉴，具体包括玉米、小麦、蔬菜、棉花、花生 5 种作物；畜禽饲养量数据来源于桓台县 2009 年统计年鉴，饲喂率、粗蛋白含量、地板面积等相关参数通过调研获得；农田管理数据包括化肥施用日期、犁地深度、灌溉、秸秆还田等，通过调研获得。作者对玉米-小麦轮作系统施肥量以及化肥生产耗能进行了重点调研。

采用分层抽样的方法，对桓台县 11 个乡镇 28 个村 276 户农户的化肥施用量进行了调研。从表 3 可以看出，桓台县小麦氮肥（折纯）施用量在 $221.5 \sim 423.5 \text{ kg/hm}^2$ 之间，平均为 266.6 kg/hm^2 ，玉米氮肥施用量在 $201.2 \sim 348.9 \text{ kg/hm}^2$ 之间，平均为 248.5 kg/hm^2 ，小麦-玉米轮作系统氮肥平均施用量为 515.1 kg/hm^2 。小麦-玉米轮作系统磷、钾肥平均施用量分别为 289.5 kg/hm^2 和 145.7 kg/hm^2 。

调研表明，蔬菜、棉花氮肥施用量分别为 527.1 、 405.1 kg/hm^2 。根据山东省土壤肥料总站提供的资料，桓台县小麦的推荐施肥量为 $N180 \sim 240 \text{ kg/hm}^2$ 、 $P_2O_5 120 \sim 150 \text{ kg/hm}^2$ 、 $K_2O 0 \sim 75 \text{ kg/hm}^2$ ，玉米的推荐施肥量为 $N 120 \sim 150 \text{ kg/hm}^2$ 、 $P_2O_5 60 \text{ kg/hm}^2$ 、 $K_2O 0 \sim 75 \text{ kg/hm}^2$ ，本研究采用区间的最大值，这符合碳贸易要求的保守性原则。蔬菜推荐施肥量为 $N 350 \text{ kg/hm}^2$ ， $P 145 \text{ kg/hm}^2$ ， $K 500 \text{ kg/hm}^2$ ，棉花推荐施肥量为 $N 300 \text{ kg/hm}^2$ ， $P 80 \text{ kg/hm}^2$ ， $K 180 \text{ kg/hm}^2$ ^[27]。与测土配方施肥推荐量相比，桓台县实际施肥量总体上存在着氮、磷过量，钾略有不足现象。

表 3 桓台县玉米小麦施肥量 (折纯)
Tab.3 Fertilizer application amount of corn-wheat system in Huantai county

kg·hm⁻²

乡镇 Town	小麦 Wheat			玉米 Corn		
	N	P	K	N	P	K
索镇 Suozhen	237.0	137.7	70.8	242.7	118.0	69.6
起凤 Qifeng	423.5	168.2	67.2	348.9	92.5	90.8
邢家 Xingjia	230.5	168.9	67.1	255.0	143.6	89.9
田庄 Tianzhuang	265.5	155.7	72.6	224.1	127.4	90.5
荆家 Jingjia	245.3	165.6	56.9	201.2	91.9	70.1
马桥 Maqiao	300.8	182.3	60.5	204.3	100.8	80.6
陈庄 Chenzhuang	293.5	222.2	33.1	243.6	95.6	46.8
新城 Xincheng	225.9	165.5	65.8	249.9	140.8	88.1
周家 Zhoujia	242.0	177.3	70.5	267.8	150.8	94.3
唐山 Tangshan	221.5	172.0	84.4	243.5	141.7	86.4
果里 Guoli	246.9	143.4	73.8	252.8	122.9	72.5
平均 Average	266.6	169.0	65.7	248.5	120.5	80.0

2.4 肥料生产耗能

对桓台县的施肥调研结果表明, 目前绝大多数农户施用尿素或复合肥。因此, 本研究主要通过对山东联盟化工和河北沧州大化的尿素生产调研获取氮肥生产耗能

数据。从表 4 可以看出, 两个尿素生产企业生产 1t 尿素平均能耗为 895 kg 标准煤, 排放 2 231.2 kg CO₂。生产过程中需要消耗 CO₂ 和水, 其中, CO₂ 来自合成氨过程中产生的废气, 将此忽略不计。

表 4 生产 1 t 尿素耗能
Table 4 Energy consumption of urea production per ton

公司名称 Corporation	原煤 Raw coal/ kg(以 ce 计)	电 Electricity/kW·h	蒸汽 Steam/t	二氧化碳 CO ₂ /m ³	水 Water/t	综合能耗 Total energy consumption/kg(以 ce 计)	折算 CO ₂ CO ₂ equivalentweight /kg
山东联盟化工* Shandong Lianmeng Chemical	696	972	1.2	800	10	816	2034.3
河北沧州大化 Hebei Cangzhou Dahua	660	1005	1.2	800	10	974	2428.2
平均值 Average	678	988.5	1.2	800	10	895	2231.2

注: *联盟化工数据系调查计算得到, 电力(当量)按照 0.1229 kg·kW⁻¹·h (用于计算火力发电)进行计算。原煤的折能系数按 0.7143 kg·kg⁻¹ (以标准煤计)计算。1 kg 标准煤减排 2.493 kg CO₂。ce 表示标准煤。
Note: Lianmeng chemical data was calculated according to the investigation. Electricity was calculated using 0.1229 kg standard coal per kWh (thermal power). Energy factor of raw coal was 0.7143 kg·kg⁻¹. CO₂ reduction was 2.493 kg for 1 kg standard coal. ce means standard coal.

磷钾肥的生产耗能折算系数参考刘万秋^[28]的研究成果, 生产 1t P₂O₅ 需要消耗 8 390 MJ, 折合标准煤 0.29 t, 相当于排放 0.72 t CO₂; 生产 1 t K₂O 需要消耗 4 220 MJ, 折合标准煤 0.14 t, 相当于排放 0.36 t CO₂。

3 结果与分析

3.1 基准线条件下温室气体排放

由表 5 可知, 基准线条件下, 各排放源 CO₂-e 排放共 98 812.2 t, 其中农田排放 27 911.6 t, 占 28.3%, 生产氮肥排放 63 835.0 t, 占 64.6%, 磷肥生产排放 5 544.9 t, 占 5.6%, 钾肥生产排放 1 520.7 t, 占 1.5%。可以看出, 氮肥生产和农田排放是基准线的主要排放源。从各乡镇排放量看, 索镇、起凤镇、田庄镇、荆家镇排放总量超过了 10 000 t, 陈庄镇、新城镇、唐山镇、果里镇排放量在 6 500~10 000 t 之间, 邢家镇、马桥镇、周家镇排放量在 4 500~6 500 t 之间, 各乡镇之间排放量差别主要是由于耕地面积及施肥量的差异造成的。从农田排放构成看, 单位耕地面积农田 N₂O 排放量为 2.36 kg/hm², 小麦-

玉米轮作系统是桓台县农田 N₂O 的主要排放源, 其排放总量为 23 724.9 t, 占排放总量的 85%, 蔬菜施肥量较大, 排放总量为 2 590.2 t, 占排放总量 9.3%, 棉花、花生、大豆排放量为 1 596.5 t。

3.2 项目线条件下温室气体排放

由表 6 可知, 项目条件下, 各排放源 CO₂-e 排放共 72 326.4 t, 其中农田排放 18 561.5 t, 占 25.7%; 氮肥生产排放 48 389.1 t, 占 66.9%; 磷肥生产排放 3 745.0 t, 占 5.2%, 钾肥生产排放 1 631.0 t, 占 2.3%。可以看出, 氮肥生产和农田排放也是项目线的主要排放源。从各乡镇排放量看, 索镇、荆家镇的排放总量超过了 10 000 t, 起凤镇、田庄镇、新城镇、果里镇的排放量在 6 000~10 000 t 之间, 邢家镇、马桥镇、陈庄镇、周家镇、唐山镇排放量在 3 000~6 000 t 之间。从农田排放构成看, 小麦-玉米轮作系统排放总量为 16 111.4 t, 占排放总量的 86.8%, 蔬菜排放总量为 1 280.7 t, 占排放总量 6.9%, 棉花等其他作物排放量为 1 169.4 t, 占 6.3%。

表 5 基准线温室气体排放
Table 5 Greenhouse gas emission for base line

项目 Items	索镇 Suozhen	起凤 Qifeng	邢家 Xingjia	田庄 Tianzhuang	荆家 Jingjia	马桥 Maqiao	陈庄 Chenzhuang	新城 Xincheng	周家 Zhoujia	唐山 Tangshan	果里 Guoli	合计 Total
氮肥 Nitrogen fertilizer	8 011.6	8 028.0	3 681.2	6 911.4	7 832.3	3 014.3	5 206.1	5 499.8	4 466.0	4 598.7	6 585.6	63 835.0
磷肥 Phosphorus fertilizer	637.3	501.0	349.7	603.6	736.1	260.3	467.9	545.1	439.1	466.9	537.9	5 544.9
钾肥 Potassium fertilizer	180.8	166.0	90.5	178.6	214.5	68.6	69.9	147.8	119.2	130.4	154.5	1 520.7
农田 Farmland	6 962.8	3 790.7	1 211.5	2 361.4	3 069.9	1 266.1	2 096.1	2 042.9	1 414.8	1 503.1	2 192.2	27 911.6
合计 Total	15 792.4	12 485.7	5 332.9	10 054.9	11 852.9	4 609.3	7 840.0	8 235.6	6 439.2	6 699.1	9 470.2	98 812.2

表 6 项目线条件下温室气体排放
Table 6 GHG emissions under project scenario

项目 Items	索镇 Suozhen	起凤 Qifeng	邢家 Xingjia	田庄 Tianzhuang	荆家 Jingjia	马桥 Maqiao	陈庄 Chenzhuang	新城 Xincheng	周家 Zhoujia	唐山 Tangshan	果里 Guoli	合计 Total
氮肥 Nitrogen fertilizer	6 472.8	4 249.9	2 920.4	5 468.5	6 492.0	2 308.4	3 759.3	4 419.6	3 339.8	3 858.4	5 100.1	48 389.1
磷肥 Phosphorus fertilizer	507.6	319.7	224.2	428.4	485.0	180.1	294.0	343.9	258.4	305.6	398.2	3 745.0
钾肥 Potassium fertilizer	195.1	176.0	88.4	169.4	257.7	75.1	121.4	151.8	115.0	118.4	162.7	1 631.0
农田 Farmland	3 768.3	1 559.9	969.3	1 861.2	2 850.3	906.6	1 381.0	1 201.4	820.0	1 329.7	1 913.8	18 561.5
合计 Total	10 943.8	6 305.4	4 202.3	7 927.5	10 084.9	3 470.2	5 555.6	6 116.7	4 533.2	5 612.1	7 574.8	72 326.4

3.3 项目减排量计算

根据农田 N₂O 减排的碳贸易方法学， $ER_y=BE_y-PE_y-LE_y$ ，计算出桓台县农田 N₂O 的减排总量为 26 485.8 t（表 7）。其中农田减排 9 350.1 t，占 35.3%，其中小麦-玉米轮作系减排占农田减排总量的 81.4%，蔬菜减排占 14%，棉花、大豆减排占 4.6%；氮肥生产减排 15 445.9 t，占 58.3%；磷肥生产减排 1 799.9 t，占 6.8%；

钾肥增加排放 110.1 t，占-0.4%。分乡镇看，索镇、起凤镇的减排量分别达到 484 8.6 t 和 6 180.3 t，这主要是由于这两个乡镇施肥量过大造成的；田庄镇、荆家镇、陈庄镇、新城镇、周家镇、果里镇的减排量在 1 700 t~2 300 t 之间；邢家镇、马桥镇、唐山镇的减排量较低，在 1 700 t 以下，主要是因为该地区耕地面积小、氮肥施用量较少。

表 7 桓台县农田测土配方施肥 GHG 减排项目碳贸易量
Table 7 N₂O mitigation from wheat-corn rotation system under soil testing and fertilizer recommendation project in Huantai county

项目 Items	索镇 Suozhen	起凤 Qifeng	邢家 Xingjia	田庄 Tianzhuang	荆家 Jingjia	马桥 Maqiao	陈庄 Chenzhuang	新城 Xincheng	周家 Zhoujia	唐山 Tangshan	果里 Guoli	合计 Total
氮肥 Nitrogen fertilizer	1 538.8	3 778.1	760.8	1 442.9	1 340.3	705.9	1 446.8	1 080.2	1 126.2	740.3	1 485.5	15 445.9
磷肥 Phosphorus fertilizer	129.7	181.4	125.5	175.1	251.2	80.2	173.9	201.2	180.7	161.3	139.7	1 799.9
钾肥 Potassium fertilizer	-14.3	-10.0	2.1	9.1	-43.1	-6.5	-51.4	-4.0	4.2	12.0	-8.2	-110.1
农田 Farmland	3 194.5	2 230.8	242.2	500.2	219.6	359.5	715.1	841.5	594.8	173.4	278.4	9 350.1
合计 Total	4 848.6	6 180.3	1 130.6	2 127.4	1 768.0	1 139.1	2 284.4	2 118.9	1 906.0	1 087.0	1 895.4	26 485.8

桓台县实施麦-玉轮作系统测土配方施肥 GHG 减排碳交易项目预计年减排 CO₂-e 26 485.8 t，10a 共计减排 26.5 万 t，符合小型 CDM 项目的要求。按照中国碳交易网公布的 2016 年 3 月深圳碳交易 CCER（china certified emission reduction）交易价格（48.57 元/t），可实现碳交易项目总收入 1286.4 万元，年均收入 128.6 万元。

4 结论与讨论

本研究以 DNDC 模型为主要工具提出了测土配方施肥温室气体（green house gas，GHG）减排的碳交易方法学，通过实施测土配方施肥，合理降低农田施肥量，减

少农田 N₂O 气体的排放及化肥生产耗能。明确提出基准线是过去 3a 平均化肥施用量情况下农田 N₂O 排放及化肥生产耗能，项目线是指实施测土配方施肥情况下农田 N₂O 排放及化肥生产过程耗能，并明确了边界、基准线、项目线、泄露、监测等相关技术及规程，实现了与 DNDC 模型的有效对接，该方法具有快速、成本可控等特点，既适用于国际 CDM 碳交易市场，也适用于国内自愿减排碳交易市场，本研究为农业测土配方施肥以及精准施肥碳交易方法学的最终确立提供了有力支撑，为最终实现农田温室气体减排碳交易打下了基础。

以桓台县为例，建立旱地测土配方施肥 GHG 减排

CDM 碳贸易方法学, 计算出可交易的碳贸易量为 2.7 万 t, 氮肥生产减排占主体, 达到 58.3%, 其次是农田减排, 达到 0.9 万 t, 占 35.3%, 其中小麦-玉米轮作系统减排占农田减排总量的 81.4%。按照 2016 年 3 月的深圳碳交易的市场价格, 项目期可实现碳交易收入 1286.4 万元。这证明了以县域为单元实施测土配方施肥 GHG 减排碳交易是可行的, 氮肥施用和氮肥生产减排是未来减排的重点。项目的实施对于农业温室气体减排, 改善农田生态环境和公众健康, 增加农户收入具有重要意义。

本研究还存在一些不足之处, 首先在考虑化肥生产耗能中, 没有考虑运输、储存、施用等过程能耗, 各乡镇均按照统一的测土配方施肥量进行计算, 尽管这符合碳贸易的保守型原则, 但实际上低估了碳交易量。基准线的施肥量应为前三年的化肥平均施用量, 本研究用 1 年的数据替代, 不够精确。以县域为单元, 开展测土配方施肥分区、组织管理制度、施肥行为研究、探讨区域及重要作物, 如蔬菜的测土配方施肥碳交易项目的可行性, 深入开展农田减排技术集成是下一步的研究重点。

[参 考 文 献]

- [1] 高广生. 中国清洁发展机制项目开发指南[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [2] Framework Convention on Climate Change. Annual Report of the EB to the CMP [EB/OL]. 2015-05. http://cdm.unfccc.int/Reference/EB_CMP_rep/index.html.
- [3] Wang Zhengchao, Mu Hailin, Li Huanan. Analysis of China's CO₂ emission and carbon trading potential[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 281: 704—709.
- [4] 韩松, 秦路, 张建伦. 国际农业土壤碳交易机制发展现状、问题及启示[J]. 世界农业, 2014(8): 38—42.
Han Song, Qin Lu, Zhang Jianlun. Present situation, problems and enlightenment of international agricultural soil carbon trading[J]. World Agriculture, 2014(8): 38—42. (in Chinese with English abstract)
- [5] Zhang Yingjie, Xu Qunjie, Sun Mojie, et al. Clean Development Mechanism and Carbon Trading Market Construction in China[J]. Advanced Materials Research, (616/618): 1500—1504..
- [6] 高春雨, 李宝玉, 邱建军. 我国农业 CDM 的发展现状、障碍与对策措施[J]. 中国沼气, 2009, 27(6): 11—14.
Gao Chunyu, Li Baoyu, Qiu Jianjun. The current situation, obstacles and countermeasures of agricultural CDM development[J]. China Biogas, 2009, 27(6): 11—14. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王英姿, 黄毅斌, 翁伯琦, 等. 中国农业 CDM 发展现状 & 潜力研究[J]. 福建农林大学学报: 哲学社会科学版, 2010(4): 26—29.
Wang Yingzi, Huang Yibin, Weng Boqi, et al. Research on current situation and potential of agricultural CDM development in China, Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Philosophy and Social Sciences. 2010(4): 26—29. (in Chinese with English abstract)
- [8] Wang Qiang. China has the capacity to lead in carbon trading[J]. Nature. 2013, 493(7432): 273.
- [9] Liu Yu, Feng Shenghao, Cai Songfeng, et al. Carbon emission trading system of China: a linked market vs. separated markets[J]. Frontiers of Earth Science. 2013, 7(4): 465—479.
- [10] 张晴. 中国自愿减排交易平台上线碳交易市场再进一步[N]. 中国高新技术产业导报, 2013-11-4(A06).
- [11] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报[M]. 北京: 中国经济出版社, 2013.
- [12] 巨晓棠. 氮肥有效率的观念及意义——兼论对传统氮肥利用率的误解[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 921—933.
Ju Xiaotang. The concept and meanings of nitrogen fertilizer availability ratio-discussing misunderstanding of traditional nitrogen use efficiency[J]. Acta Pedologica Sinica. 2014, 51(5): 921—933. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王彩绒, 田霄鸿, 李生秀. 土壤中氧化亚氮的产生及减少排放量的措施[J]. 土壤与环境, 2001, 10(2): 143—148.
Wang Cairong, Tian Xiaohong, Li Shengxiu. Nitrous oxide emissions from soils and strategy for reducing N₂O emission[J]. Soil and Environmental Sciences, 2001, 10(2): 143—148. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李迎春. 中国农业氧化亚氮排放及减排潜力研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.
Li Yingchun. Agricultural Nitrous Oxide Emissions and Mitigation Potential in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [15] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783—795.
Ju Xiaotang, Gu Baojing. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(4): 783—795. (in Chinese with English abstract)
- [16] 吴文良, 张新明, 宗栓金. 桓台县麦玉两熟系统化肥投入及土壤养分资源研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(2): 67—79.
Wu Wenliang, Zhang Xinming, Zong Shuanjin. Chemical fertilizers input and soil nutrient resources in winter wheat-corn rotation system in Huantai County[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11(2): 67—79. (in Chinese with English abstract)
- [17] 高春雨. 县域农田 N₂O 排放量估算及其减排碳贸易案例研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
Gao Chunyu. Case Study on Estimation of N₂O Estimations from Cropland and its Carbon Trade at County Scale[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [18] Li C S, Frolking S, Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: I. Model structure and sensitivity[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97: 9759—9776.
- [19] Gilhespy S L, Anthony S, Cardenas L, et al. First 20 years of DNDC (De Nitrification De Composition): Model evolution[J]. Ecological Modelling. 2014, 292: 51—62.
- [20] Giltrap D L, Li C S, Saggar S. DNDC: A process-based model of greenhouse gas fluxes from agricultural soils[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment. 2010, 136(3/4): 292—300.
- [21] 邱建军, 王立刚. 环渤海区域农业碳氮平衡定量评价及调控技术研究[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [22] Yan Guangxuan, Yao Zhisheng, Zheng Xunhua, et al. Characteristics of annual nitrous and nitric oxide emissions from major cereal crops in the North China Plain under alternative fertilizer management[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2015(207): 67—78.

- [23] 李虎. 黄淮海平原农田土壤 CO₂ 和 N₂O 释放及区域模拟评价研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2006.
Li Hu. Study on soil CO₂ and N₂O Emissions in Agro-ecosystem and Regional Model-based Evaluation in Huang-huai-hai Plain[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [24] 甄兰. 应用 DNDC 模型和 GIS 技术研究区域氮肥管理的环境效应[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.
Zhen Lan. Environmental Effect of Regional Nitrogen Fertilizer Management Using DNDC Model and GIS Techenology[D]. Beijing: China Agricultural University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [25] 徐文彬, 洪业汤, 陈旭晖, 等. 贵州省旱地土壤 N₂O 释放及其环境影响因素[J]. 环境科学, 2000, 21(1): 7—11.
Xu Wenbin, Hong Yetang, Chen Xuhui, et al. N₂O emission from upland soils in Guizhou and its environmental controlling factors[J]. Environment Sciences, 2000, 21(1): 7—11. (in Chinese with English abstract)
- [26] 高秀文. 华北高产粮区土壤温室气体排放及碳氮平衡研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2003.
Gao Xiuwen. Greenhouse Gases Emission From soil and Carbon-Nitrogen Budget in the Northern China Plain With High Productivity[D]. Beijing: China Agricultural University, 2003. (in Chinese with English abstract)
- [27] 张福锁, 陈新平, 陈清, 等. 中国主要作物施肥指南[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009.
- [28] 刘万秋. 山东省昌邑市主要农作物能源消耗调查与评价[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
Liu Wanqiu. Investigation and Assessment on Major Crop's Energy Consumption of Changyi City in Shandong[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010. (in Chinese with English abstract)

Quantitative analysis of carbon trade of upland greenhouse gas emission reduction from precise fertilization

Gao Chunyu, Gao Maofang^{*}

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Carbon trading is the market mechanism to reduce global greenhouse gas (GHG) emissions. Soil testing and formulated fertilization play an important role in reducing the fertilizer application and GHG emissions in intensive agricultural production area of China. In this paper, the methodology of upland GHG emission reduction in soil testing and formulated fertilization was proposed according to the basic process of carbon trade methodology. Huantai County, Shandong Province was chosen for the case study of tradable carbon calculation. The main conclusions were as follows: 1) Boundary of the project included the geolocation of upland crops and the production process of chemical fertilizers. Baseline of the project was CO₂ emission in chemical fertilizer production and N₂O emission in upland crop planting without soil testing and formulated fertilization, while the project activities were GHG emissions in above processes under soil testing and formulated fertilization. 2) In Huantai County, too much nitrogen and phosphorus fertilizer were added to the cropland, while potassium fertilizer was suitable. The average application amounts of nitrogen, phosphorus and potassium in wheat-corn rotation system were 515.1, 289.5 and 145.7 kg/hm², respectively. The investigation of nitrogen fertilizer production enterprises showed that the average CO₂ emission for the production of 1 t urea was 2.23 t (CO₂ equivalent, the same as below). 3) The tradable carbon from soil testing and formulated fertilization was 26 485.8 t, and the farmland emission reduction, nitrogen fertilizer production reduction and phosphatic fertilizer production reduction accounted for 35.3%, 58.3% and 6.8%, respectively. Potassium production increased by 110 t emission, accounting for -0.4%. The situation was different in every town of the county because of the different crop area and fertilization. GHG reduction for Suozhen Town and Qifeng Town was 4848.6 and 6 180.3 t, respectively. The main reason was that too much fertilizer was used in these 2 towns. GHG reduction in Tianzhuang, Jingjia, Chenzhuang, Xincheng, Zhoujia and Guoli was between 1 700 and 2 300 t. GHG reduction in Xingjia, Maqiao and Tangshan was lower than 1 700 t, mainly because less fertilizer was used in these towns. 4) According to the carbon price of Shenzhen carbon trading market in March 2016, the emission reduction projects of soil testing and formulated fertilization in Huantai County could reach 12.86 million yuan, with 1.286 million yuan every year, which met the project requirement of small carbon trade. 5) The carbon trading methodology system that adopted the Denitrification and Decomposition (DNDC) model as the main measurement tool could achieve the carbon emission reduction calculation. The study has great significance to the implementation of GHG carbon emission reduction project from soil testing and formulated fertilization.

Keywords: models; fertilizers; greenhouse gases; soil testing and formulated fertilization; carbon trade methodology; DNDC model