

我国小麦生产主要能耗投入品相关温室气体排放研究

李 锋

(中国人民大学环境学院, 北京 100872)

摘 要:我国农业生产长期以来坚持粮食主要立足国内生产的政策,在全球关注气候变化、协商温室气体减排的情况下,为保障主要粮食生产的能耗和排放需求,必须着手研究粮食生产的能源消耗和温室气体排放问题。在前人研究的基础上,本研究探索了基于农业生产投入费用成本进行能源消耗和温室气体排放估算的方法。通过分析我国种植业主要能源投入品分类统计情况,将主要的能源消耗投入品(简称主要能耗投入品)锁定在化肥、农家肥、农药、农膜、租赁作业和燃料动力,依据我国有关公开数据信息进行了分析和估算。以小麦为例的研究结果表明,我国2010年小麦生产温室气体总排放估算值3.78亿tCO₂当量,单位面积排放量18.23tCO₂·hm⁻²,其中主要能耗投入品相关温室气体排放约为0.88亿tCO₂当量,单位面积排放量为4.25tCO₂·hm⁻²,占23.30%,其他为麦田呼吸排放量。根据小麦生产的主产品和副产品含碳量的分析,2010年小麦生产汇集约3.07亿tCO₂,占小麦生产过程排放量约81.25%,净排放量约为0.71亿t,比较小麦生产过程温室气体排放和汇集能力得出,2010年小麦生产过程温室气体排放和汇集的平衡产量约为6.83t·hm⁻²,低于此单产值表现为净排放,高于此单产值则表现为净汇集。案例研究表明,运用此方法可以对我国种植业生产的分年度、分农产品的能源消耗排放和汇集能力进行分析,研究结果可以为我国参加国际气候农业领域谈判、制定相关政策提供决策参考。

关键词:气候变化;农业生产;小麦;温室气体;能源消耗;碳汇

中图分类号:S512.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)05-1041-09 doi:10.11654/jaes.2014.05.030

Greenhouse Gas Emissions from Major Energy Consumption in Wheat Production in China

Li Feng

(School of Environment, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

Abstract: Agricultural production is a main source of greenhouse gas (GHG) emission. However, there is limited information available about estimates of GHG emissions from agriculture-related energy consumption in China. Here we developed a method based on agricultural inputs and their costs to estimate energy consumption and GHG emissions in crop production. By bottom-up analysis and statistics, we found that major agricultural inputs included chemical fertilizer, manure, pesticides, plastic films, machinery and energy. In wheat production, the total GHG emissions were 378 million tons carbon dioxide equivalent, or 18.23 tons carbon dioxide equivalent per hectare in China in 2010, of which emissions from major agricultural inputs were about 88 million tons carbon dioxide equivalent, accounting for 23.30% of the total GHG emissions. The carbon dioxide absorbed by wheat was about 307 million tons in China in 2010, being 81.25% of the total GHG emissions. The net emissions from wheat production were 71 million tons. Calculation showed that the wheat yields should be 6.83 tons per hectare so that zero emissions of GHGs could be obtained in wheat production (total GHGs emissions equals total GHGs absorption by wheat).

Keywords: climate change; agricultural production; wheat; greenhouse gases; energy consumption; carbon sink

气候变化已经成为全球关注的问题。政府间气候变化专门委员会(简称IPCC)第五工作组报告,全球平均陆地和海洋表面温度的线性趋势计算结果表

明,在1880—2012年期间温度升高了0.85(0.65~1.06)℃。自1750年以来,由于人类活动,大气中CO₂、甲烷(CH₄)和N₂O等温室气体的浓度均已增加,2011年分别约超过工业化前水平的40%、150%和20%。极有可能的是,观测到的1951—2010年全球平均地表温度升高的一半以上是由温室气体浓度的人为增加

收稿日期:2014-01-26

作者简介:李 锋(1980—),男,博士研究生,主要研究方向:能源与环境资源经济学。E-mail:lifeng01@caas.cn

和其他人为强迫共同导致的。为应对全球气候变化,国际社会开展了至今近30年的谈判,着手协商温室气体排放控制目标^[1],IPCC组织全球科学家对包括农业在内的人类活动温室气体排放和气候变化的影响进行了长期的模拟研究^[2],伴随有关研究的深入,关于气候对农业的影响^[3-4]、农业低碳发展和减排温室气体^[5]的作用等方面的认识逐步得到加强,农业在气候变化中的作用自2005年开始明显得到提升^[6]。

农业生产活动是温室气体产生的重要源。根据我国政府公布的《中国应对气候变化国家方案》^[7]、《中华人民共和国气候变化初始国家信息通报》^[8]和2013年2月公布的《气候变化第二次国家信息通报》^[9],2005年我国温室气体排放当量达到约70.46亿t CO₂,相比1994年,我国CO₂、甲烷、N₂O排放分别增长了1.09倍、0.3倍、0.5倍;甲烷排放中,农业活动排放占56.62%,能源活动占34.71%;N₂O排放中,农业活动排放占73.79%。

除农业活动相关的温室气体排放之外,农业生产直接关联的能源消耗包括农药、化肥、饲料等^[10-11],也会产生大量的温室气体。国内科研人员对全国农业生产系统能源和投入品的温室气体排放进行了测算和历史分析^[12],对农业领域^[13-14]和小麦^[15]、水稻^[16]等农业生产减排的措施开展了研究。这些研究结果为我国掌握气候变化领域农业现状以及农业温室气体减排提供了较好的指导建议。在气候制度旨在约束温室气体排放的情况下,为保障我国粮食生产需要,必须关注农业生产尤其是粮食生产相关的能源投入和温室气体排放问题。

针对国内农业温室气体现状和历史分析中过于依赖国外排放系数的问题,应加强研究契合我国农业生产实际的能耗和排放系数,以利于当前应对气候制度谈判和将来落实有关制度。本文的研究范围聚焦于主要粮食生产的能源消耗和温室气体排放问题,选择小麦为例,初步分析我国小麦生产主要能耗投入品相关的生产能耗及其温室气体排放情况,进行小麦产品的碳汇分析,并与主要能耗投入品排放进行比较分析。

1 材料与方法

1.1 指标选择依据

我国对农产品生产的成本和费用,区分种植业和饲养业两种情况形成了较为完善的分类和调查指标体系(《国家发展改革委关于实施新农产品成本调查核算指标体系的通知》(发改价格[2004]207号)),也

按照抽样统计方法规定了调查和汇总流程,较为科学、准确、完整地反映了我国主要农产品生产成本和收益情况,成为政府研究制定农村经济政策服务的重要依据。本文使用该体系中种植业成本费用指标体系,以及国家发展和改革委员会价格司编制的《全国农产品成本收益资料汇编》年度小麦生产的费用成本数据。

1.1.1 农业生产主要能耗投入品指标的选择

国家发展改革委农产品成本调查核算指标体系中种植业产品的总成本分为生产成本和土地成本,生产成本分为物质与服务费用和人工成本,物质与服务费用进一步分为直接费用和间接费用。其中,直接费用分为11项:种子费、化肥费、农家肥费、农药费、农膜费、租赁作业费、燃料动力费、技术服务费、工具材料费、修理维护费、其他直接费用;间接费用分为5项:固定资产折旧、保险费、管理费、财务费、销售费。

按照该指标体系的结构,与小麦生产相关的完整投入要素中,土地成本是存在成本或土地租赁的机会成本,与能源投入无关;生产成本中人工成本,涉及劳动人员的用工时间和能量消耗,不属于明确的直接能耗品,在本研究中暂不作为分析对象;物质与服务费用中的间接费用包括金融和财务等费用,鉴于费用比例较低且与能源投入不构成直接关系,故在本研究中暂不分析。鉴于种子、技术服务、工具材料、维修护理等其他费用也不属于明确的直接能耗投入,因此,本研究将小麦生产直接相关的能源投入集中于直接费用中的主要部分,将其定义为“主要能耗品投入成本”,包括:化肥费、农家肥费、农药费、农膜费、租赁作业费、燃料动力费。

1.1.2 费用成本数据

本研究使用了《全国农产品成本收益资料汇编2012》^[17]中2010年小麦生产成本收益表中主产品产量数据,费用用工明细表中的费用价值数据(见表1),以及化肥投入明细表中化肥使用实物量数据(见表2)。

1.2 主要能耗品的能耗分析

1.2.1 化肥分析

小麦生产过程的化肥投入主要分为氮肥、磷肥、钾肥、复混肥四种。

(1)氮肥。我国尿素生产以煤基工艺为主,煤基尿素在合成氨基础上进一步化学合成得到,我国2011年合成氨生产的生产原料中煤炭百分比76%,故本研究以我国中型煤基尿素为基础测算2010年我国尿素

表 1 我国 2010 年小麦生产单位面积投入和产出数据

Table 1 Main inputs and output in wheat production per unit area in China in 2010

统计内容	统计值
主产品产量/kg·hm ⁻²	5 550.30
化肥费/元·hm ⁻²	1 777.35
农家肥费/元·hm ⁻²	147.15
农药费/元·hm ⁻²	196.05
农膜费/元·hm ⁻²	0.60
租赁作业费/元·hm ⁻²	1 811.40
燃料动力费/元·hm ⁻²	5.40

表 2 我国 2010 年小麦生产单位面积化肥施用折纯量

Table 2 Amounts of pure fertilizers for wheat production per unit area in China in 2010

统计内容/kg·hm ⁻²	统计值
化肥折纯用量合计	377.25
1.氮肥	145.20
尿素	121.50
碳铵	23.40
其他氮肥	0.30
2.磷肥	16.50
过磷酸钙	13.95
3.钾肥	1.35
氯化钾	0.90
4.复混肥	214.20
(1)复合肥	211.50
二铵	60.90
三元素复合肥	113.55
(2)混配肥	2.70

能耗和温室气体排放系数。

我国中型煤基尿素单位能耗推算:根据《中国化肥工业年鉴 2005 年—2006 年》^[18],我国 2004 年中型煤基尿素的单位能耗为 1 555.49 kg 煤·t⁻¹ 尿素、1 032.57 kWh·t⁻¹ 尿素,使用我国合成氨单位能耗的年度变化推算 2010 年尿素的单位能耗。根据《中国节能减排发展报告 2013》^[19],我国 2005 年和 2010 年合成氨生产单位综合能耗分别为 1650 kg 标准煤·t⁻¹ 和 1587 kg 标准煤·t⁻¹,假设 2004—2010 期间能耗按照固定比率下降,则 2010 年能耗为 2004 年能耗的 95.45%。由此估算我国 2010 年中型煤基尿素单位煤耗为 1 484.76 kg 煤·t⁻¹ 尿素、单位电耗为 985.62 kWh·t⁻¹ 尿素。我国原煤与标准煤的换算系数为 0.714 3 kg 标准煤·kg⁻¹ 原煤^[20],我国火电厂 2010 年供电煤耗为 333 g 标准煤·kWh⁻¹ (中国工业节能与清洁生产协会等,2013),

据此估算我国 2010 年中型煤基尿素的单位能耗(电耗已转换为标准煤耗)为 1 388.78 kg 标准煤·t⁻¹ 尿素。

本文以单位合成氨折纯量的能耗代表碳铵和其他氮肥的能耗水平,根据我国 2010 年合成氨的单位能耗计算。

(2)磷肥。我国 2010 年 1—11 月国内磷肥生产折纯量 1701 万 t,国内需求 1200 万 t 左右^[21],说明我国磷肥自给有余,应以国内生产能耗代表实际消费磷肥的能耗。我国小麦生产使用磷肥包括过磷酸钙和其他磷肥,以过磷酸钙为主。

根据 2007 年 4 月 22 日国家发展和改革委员会公告第 24 号《磷肥行业清洁生产评价指标体系(试行)》,过磷酸钙生产综合能耗评价基准值为 15 kg 标准煤·t⁻¹,过磷酸钙折纯五氧化二磷比例为 16%。

本文以重过磷酸钙作为“其他磷肥”的代表。根据 2007 年《磷肥行业清洁生产评价指标体系(试行)》,重过磷酸钙综合能耗评价基准为 180 kg 标准煤·t⁻¹,其折纯五氧化二磷比例为 46%。

(3)钾肥。我国钾肥自给率近年逐步提高,于 2010 年达到 50%,2011 年为 58%(中国化工学会化肥专业委员会等,2012),故基本可以国内生产能耗代表实际消费钾肥的能耗。

氯化钾生产能耗排放系数:我国天津市 2011 年公布的兑卤法生产氯化钾单位产量综合能耗限额为 3350 kg 标准煤·t⁻¹ 氯化钾(DB 12/046.40—2011 氯化钾单位产量综合能耗计算方法及限额)。本文以天津市地方标准限额作为我国 2010 年氯化钾综合能耗估计值。

本文以硫酸钾作为“其他钾肥”的代表。我国 2013 年公布的硫酸钾单位产品能源消耗限额为:水盐体系法(海水、卤水)不大于 522 kg 标准煤·t⁻¹ 硫酸钾(GB 29439—2012 硫酸钾单位产品能源消耗限额)。本文以 2012 的国标限额作为我国 2010 年硫酸钾生产综合能耗估计值。

(4)复混肥。我国 2010 年小麦生产使用复混肥包括磷酸二铵、三元素复合肥、其他复合肥和混配肥。磷酸二铵为氮磷双效化肥,根据《化肥折纯量参考计算表》,磷酸二铵中有效成分比例计算其折纯量。考虑成本收益资料数据中无法区分“其他复合肥”和“混配肥”的各有效成分,本文假定这部分化肥成分比例等同于三元素复合肥,根据《化肥折纯量参考计算表》的三元素复合肥中铵磷钾肥的折纯百分比计算其折纯

量(见表3)。

以上述氮磷钾肥测算排放系数中合成氨、重过磷酸钙、氯化钾分别作为三种有效成分的代表,采用上述的能耗系数估算复混肥生产过程能耗。

表3 我国部分复合肥折纯量参考值

Table 3 Reference values for calculating pure fertilizers for compound fertilizers in China

折纯物	磷酸二铵	铵磷钾肥
氮	18%	12%
五氧化二磷	46%	24%
氧化钾		12%

注:资料来源于《化肥折纯量参考计算表》。

1.2.2 农家肥分析

考虑到农家肥在堆腐过程中包含有畜禽生产粪肥、转移物料、混合粪料等生产过程,也需要农民投入适当的劳动、运输机械消耗,不同地域差异较大且难以科学计量,为简化估算农家肥生产过程温室气体排放量,本研究假定农家肥的单位价值能耗排放量与化肥平均水平相同。根据化肥能耗估算值,计算得出单位价值化肥的能耗量,据此估算农家肥生产过程能耗。

1.2.3 农药费分析

根据《中国节能减排发展报告 2013》,我国 2011 年单位化学农药生产综合能耗为 1.294 t 标准煤·t⁻¹ 农药,比 2010 年下降 14.1%。计算得出我国 2010 年化学农药原药生产综合能耗为 1.51 t 标准煤·t⁻¹ 农药。

1.2.4 农膜费分析

农膜的主要原料为乙烯,本文以乙烯的生产能耗代表农膜的生产能耗。根据《中国节能减排发展报告 2013》,我国 2010 年生产单位乙烯的综合能耗为 950 kg 标准煤·t⁻¹ 乙烯。

1.2.5 租赁作业费和燃料动力费分析

我国 2010 年小麦生产投入租赁作业费和燃料动力费合计 1 816.80 元·hm⁻²,其中排灌费中水费为 81.60 元·hm⁻²,扣除水费后为 1 735.20 元·hm⁻²。本文假定我国 2010 年小麦生产的机械作业和燃料动力均来自农用柴油。本文仅考虑农用柴油燃烧排放温室气体,不计算其生产过程的能耗。

1.3 温室气体源汇分析

1.3.1 主要能耗投入品生产过程 CO₂ 排放

化肥、农家肥、农药、农膜生产过程能耗的 CO₂ 排放为其生产过程能耗与单位标准煤的 CO₂ 排放系数相乘进行估算。

单位标准煤的 CO₂ 排放测算:标准煤的热当量值为 29 307 kJ·kg⁻¹ 标准煤(2050 中国能源和碳排放研究课题组,2009),根据 IPCC 国家温室气体清单指南 2006 年版计算无烟煤、褐煤平均 CO₂ 排放系数为 99 650 kgCO₂·10 亿 kJ⁻¹,计算得出单位标准煤的 CO₂ 排放量为 2.92 kgCO₂·kg⁻¹ 标准煤。

农用柴油以其燃烧的 CO₂ 排放量进行估算。租赁作业和燃料动力以农用柴油燃烧排放计算 CO₂ 排放。我国柴油的能量折算系数为 42 652 kJ·kg⁻¹ 柴油(2050 中国能源和碳排放研究课题组,2009),根据 IPCC 温室气体排放清单指南 2006 年版中柴油的燃料排放 CO₂ 系数为 74 100 kgCO₂·10 亿 kJ⁻¹,推算得出我国单位柴油燃烧排放 CO₂ 量为 3.16 kgCO₂·kg⁻¹ 柴油。

1.3.2 氮肥使用过程 N₂O 排放

小麦生产中因使用氮肥而排放一定量的 N₂O。IPCC 温室气体排放清单指南 2006 年版中,氮肥的 N₂O 排放因子设定为 1%(质量百分比,N₂O 的氮/氮肥的氮)。

化肥和农家肥中均含有氮肥成分。农家肥有猪圈粪、牛圈粪、麦秸堆肥、玉米秸秆堆肥等种类,其氮、磷、钾的有效养分比例也不相同,可以确定的是各种农家肥里都含有氮、磷、钾三种肥料。本文假定单位价值农家肥与单位化肥的平均有效成分相同,推算得出我国 2010 年小麦生产单位面积农家肥投入中氮元素投入量 16.65 kg·hm⁻²。根据上述化肥使用中氮肥用量、复合肥成分分析结果和农家肥中氮元素投入量,估算小麦生产过程氮肥使用过程的 N₂O 排放量。

IPCC 第五次评估报告第一工作组报告中,N₂O 的 100 年尺度上的温室效应为 298 个 CO₂ 当量。本文以此系数将 N₂O 换算为 CO₂ 当量。

1.3.3 小麦种植过程中农田 CO₂ 排放

小麦生长过程中的呼吸作用会排放 CO₂,土壤有机质的氧化作用也排放 CO₂。根据文献公布的研究实验结果,我国农田的 CO₂ 排放通量中,施肥麦田平均为 262 mg·m⁻²·h⁻¹,排放通量范围为 120~400 mg·m⁻²·h⁻¹[22]。本文假定以该文献研究结果作为我国 2010 年小麦生产过程 CO₂ 排放通量估计值。

根据《农业技术经济手册(修订本)》,我国小麦部分东北地区春小麦品种的生长期为 75~85 d,即出苗至成熟[23]。根据肖军主编的《农村种植-春小麦》,小麦的生长过程(从种子萌芽到产生新种子是小麦的完整生育期),春播小麦为 90~120 d,秋播小麦为 230~280

d。据此本文取我国冬小麦生长期 230 d、春小麦 90 d。根据国家统计局公布数据,我国 2010 年冬小麦产量比例为 94.51%、春小麦产量为 5.49%。以冬小麦、春小麦生长期为基础,以产量比例为权重,本文推算我国 2010 年小麦生长期估计值为 222.32 d。

据此计算我国 2010 年小麦生产过程麦田 CO₂ 排放通量。

1.3.4 小麦生产的主产品和副产品碳汇分析

小麦生产的产品包括主产品和副产品两个部分,主产品即小麦,副产品为麦秸。小麦生长过程通过光合作用将大气中的 CO₂ 固定于植株内,最终储藏于小麦的主产品和副产品中。本研究界限定位于小麦的生产过程,故将小麦和麦秸的 CO₂ 固定作用作为碳汇进行分析。

小麦主产品的含碳量分析:根据《农业技术经济手册(修订本)》,我国小麦种子的主要化学成分的质量百分比,根据有关成分含碳百分比,计算得出小麦主产品的含碳百分比约为 36.79%(详见表 4)。

小麦副产品的含碳量分析:根据《农业技术经济手册(修订本)》,我国小麦副产品质量与主产品质量比例约为 1.1:1,得出小麦副产品质量。假设小麦副产品均为麦秸。根据《农业技术经济手册(修订本)》,我国小麦秸的主要化学成分的质量百分比,根据有关成分含碳百分比,计算得出麦秸的含碳百分比约为 32.70%(详见表 5)。

1.4 能耗品投入价格分析

根据农产品成本收益资料汇编,农药、农膜、农用柴油需将其费用换算为物质量,故需估算 2010 年度三类投入品的价格。

单位质量农药价格的估算:根据《中国农药工业年鉴 2011》^[24],统计得出 2010 年江苏省、浙江省、山东

表 4 我国小麦种子的主要化学成分及其含碳百分比

Table 4 Main chemical components and their carbon percentages of wheat grain in China

化学成分	在小麦中质量百分比/%	含碳百分比/%
水分	10.4	
糖类	69.8	40.00%
蛋白质	13.5	50.00%
脂肪	2.1	50.00%
粗纤维	2.4	44.44%
无机盐	1.8	

注:资料根据《农业技术经济手册(修订本)》及有关生物化学知识整理。

表 5 我国麦秸的主要化学成分及其含碳百分比

Table 5 Main chemical components and their carbon percentages of wheat straw

化学成分	在小麦秸中质量百分比/%	含碳百分比/%
粗纤维	37.0	44.44
粗蛋白	2.7	50.00
粗灰分	9.8	
粗脂肪	1.1	50.00
水分	13.5	
无氮浸出物	35.9	40.00

注:资料根据《农业技术经济手册(修订本)》及有关生物化学知识整理。

省农药企业产值和产量数据(见表 6),湖北省统计 2009—2010 年调查农药经营单位农药价格,其中 2010 年:杀虫剂 54.5 元·kg⁻¹,杀菌剂 75.4 元·kg⁻¹,除草剂 85.3 元·kg⁻¹。计算得出的三省农药单位生产价格与湖北省的分类统计价格基本一致,也与国家发展和改革委员会价格司公布的监测数据基本一致[根据国家发展和改革委员会价格司网站公布的 2010 年 10 月农资市场监测数据,敌敌畏(80%乳剂)销售价格 22.23 元·kg⁻¹,氧化乐果(40%乳剂)为 22.1 元·kg⁻¹,百草枯(20%水剂)500 mL 的价格为 19 元·瓶⁻¹。说明按照《中国农药工业年鉴 2011》统计数据计算的农药平均价格基本与市场监测结果相符]。三省 2010 年农药平均价格的算术平均为 67.50 元·kg⁻¹ 农药原药,以此作为我国 2010 年农药单位质量价格估计值,用于将农产品成本收益资料汇编中的农药费用换算为物质量。

单位质量农膜和农用柴油价格的估算:根据《中国物价年鉴 2011》,我国 2010 年农资价格中高压聚乙烯地膜和农用柴油 0 号的 1 月至 12 月统计价格的平均值分别为 13.21 元·kg⁻¹、7.23 元·kg⁻¹,以此作为年度平均价格估算值,用于将农产品成本收益资料汇编中的农膜和租赁作业、燃料动力费用换算为物质量。

表 6 江苏、浙江、山东三省 2010 年农药企业统计数据

Table 6 Statistics of pesticide enterprises in Jiangsu, Zhejiang and Shandong Provinces in 2010

省份	统计农药企业数量/家	统计农药产值/亿元	农药产量/万 t	计算单位质量农药价格/元·kg ⁻¹
江苏省	23	236.11	31.42	75.14
浙江省	36	94.95	19.71	48.17
山东省	55	115.54	17.37	66.52

注:资料根据《中国农药工业年鉴 2011》整理计算。

表7 我国2010年小麦生产单位面积主要能耗品温室气体排放估算

Table 7 Estimation of GHG emissions from main energy consumption of wheat production per unit area in China in 2010

估算内容/kgCO ₂ ·hm ⁻²	估算值
1.主要能耗投入品排放	3 229.05
(1)化肥生产过程排放	2 269.80
氮肥	1 204.65
磷肥	6.75
钾肥	15.15
复混肥	1 043.25
(2)农家肥生产排放	187.95
(3)农药生产排放	12.90
(4)农膜生产排放	0.15
(5)租赁作业和燃料动力使用排放	758.25
2.氮肥施用排放	1 017.45
3.小麦生长期麦田土壤排放	13 979.55
小计	18 226.05

2 结果与分析

2.1 温室气体排放

根据上述方法和估算参数,估算出主要能耗投入品生产过程能耗排放、氮肥使用过程 N₂O 排放以及小麦生产过程麦田土壤排放温室气体(见表7),合计得出我国2010年小麦单位面积温室气体排放为9 199.05 kgCO₂·hm⁻²。

2.2 碳汇量分析

根据我国2010年小麦单位面积主产品产量,以及上述小麦主产品和副产品含碳量,可以估算单位面积小麦产品的碳汇集量(CO₂当量)为:主产品汇集量7 486.95 kgCO₂·hm⁻²,副产品汇集量7 321.20 kgCO₂·hm⁻²,合计14 808.15 kgCO₂·hm⁻²。

2.3 温室气体排放和碳汇量比较分析

本文的温室气体排放和碳汇的统计口径是针对

表8 我国2010年小麦生产过程单位面积温室气体排放和碳汇量比较

Table 8 GHG emissions and sinks in wheat production per unit area in China in 2010

估算内容	单位面积/ kg CO ₂ ·hm ⁻²	单位产量/ kg CO ₂ ·kg ⁻¹ 小麦
温室气体排放量	18 226.05	3.28
碳汇集量(CO ₂ 当量)	-14 808.15	-2.67
净排放量	3 417.90	0.62

注:“-”表示碳的吸收。

小麦的生产过程,即:将生产投入品的生产能耗、氮肥排放和麦田 CO₂ 排放作为温室气体排放,将小麦和麦秸的碳储存量作为碳汇。综合上述估算结果,我国2010年小麦生产过程的温室气体汇集量小于能源投入和生产排放量(见表8),两者的比例约为0.81:1,净排放量为3 417.90 kgCO₂·hm⁻²。以单位产量小麦主产品计算,我国2010年每生产1 kg小麦主产品,CO₂的净排放量为0.62 kg。

根据小麦生产的温室气体排放量和单位小麦产品的碳汇集能力,可以计算得出2010年我国小麦生产温室气体排放和汇集的平衡产量约为6 831.45 kg·hm⁻²,即,小麦产量低于此值时小麦田表现为温室气体的净排放,小麦产量高于此值时小麦田总体表现为温室气体的汇集。

全国小麦生产的温室气体分析。根据国家统计局网站公布数据,我国2010年小麦主产品产量为11 518.08万t,运用上述分析数据推算,我国2010年小麦生产排放温室气体约为3.78亿t CO₂当量,小麦生产的主产品和副产品的CO₂汇集量约为3.07亿t CO₂,温室气体的净排放量约为0.71亿t CO₂。

假设小麦生产过程中土壤有机质含量不发生变化,按照IPCC农业生产温室气体排放测算口径,则小麦生产的温室气体排放为主要能耗投入品生产排放和氮肥氧化亚氮排放。按此口径,根据上述计算结果,我国2010年小麦生产中主要能耗投入品生产排放和氮肥氧化亚氮排放温室气体强度为4 246.5 kg CO₂当量·hm⁻²,每生产1 kg小麦排放温室气体0.77 kg CO₂当量,全国小麦生产排放温室气体约为0.88亿t CO₂当量。

3 讨论

3.1 单位投入品温室气体排放参数的比较

由于数据分析信息来源和时间阶段不同,本研究测算我国2010年化肥、农药和农膜生产过程的排放系数与目前国内研究中引用有关文献中的系数存在较大差异(详见表9)。(1)化肥的排放系数,本文测算的中型煤基尿素、过磷酸钙、兑卤法氯化钾生产过程能耗排放分别是West等^[25]估算结果的2.8、0.45、35.11倍。(2)农药的排放系数,本文测算我国2010年农药排放系数约为West等、智静等^[26]测算或引用系数的0.26倍和0.24倍。(3)农膜的排放系数,本文测算系数约为田云等^[27]引用系数的0.15倍。本研究测算信息主要是2010年我国的基础信息,而上述研究

表9 本研究估算化肥、农药、农膜生产过程温室气体排放系数与有关文献比较

Table 9 Comparisons of GHG emission coefficients during production of fertilizers, pesticides and plastic mulch estimated in this research with those in literature

本文测算我国 2010 年系数			有关文献测算结果			
名称	结果	计量单位	名称	结果	计量单位	文献来源
中型煤基尿素折纯量生产排放	8.82	kgCO ₂ ·kg ⁻¹ 尿素氮肥折纯量	氮肥折纯氮的碳排放	857.54	kgC·t ⁻¹ 折纯氮	[25]
合成氨折纯量生产排放	5.63	kgCO ₂ ·kg ⁻¹ 合成氨氮肥折纯量				
过磷酸钙折纯量生产排放	0.27	kgCO ₂ ·kg ⁻¹ 纯五氧化二磷	磷肥折纯五氧化二磷的碳排放	165.09	kgC·t ⁻¹ 折纯五氧化二磷	[25]
重过磷酸钙折纯量生产排放	1.14	kgCO ₂ ·kg ⁻¹ 纯五氧化二磷	磷肥生产隐含 CO ₂ 排放	1.80	tCO ₂ ·t ⁻¹ 折纯五氧化二磷	[30-31]
氯化钾(兑卤法)折纯量生产排放	15.49	kgCO ₂ ·kg ⁻¹ 氯化钾折纯量	钾肥折纯氧化钾的碳排放	120.28	kgC·t ⁻¹ 折纯氧化钾	[25]
硫酸钾折纯量生产排放	2.82	kgCO ₂ ·kg ⁻¹ 硫酸钾折纯量	钾肥生产隐含 CO ₂ 排放	1.50	tCO ₂ ·t ⁻¹ 折纯氧化钾	[30-31]
农药生产过程能耗排放	4.40	kgCO ₂ ·kg ⁻¹ 农药	除草剂的碳排放	4 702.38	kgC·t ⁻¹	[25]
			杀虫剂的碳排放	4 931.93	kgC·t ⁻¹	[25]
			杀真菌剂的碳排放	5 177.52	kgC·t ⁻¹	[25]
			农药施用产生碳排放量	4.93	kgC·kg ⁻¹ 农药	[26]
农膜的乙烯生产过程能耗排放	2.77	kg CO ₂ ·kg ⁻¹ 乙烯	农膜的碳排放	5.18	kgC·kg ⁻¹ 农膜	[27]

文献中数据信息来源为二十世纪 80 年代和 90 年代美国的数据。West 等估算化肥排放系数是根据美国 1987 年调查数据测算的生产、运输和后处理的综合能耗,其估算的农药排放系数是根据美国 1987 年文献中能耗数据,结合美国 1996 年用量数据测算的生产、运输和后处理的综合能耗。智静等在其文献中称其引用的农药排放系数是引自美国橡树岭国家实验室。这两个文献的化肥和农药排放系数被国内一些研究文献多次引用用于测算我国的农业生产排放^[27-29]。

与齐晔等^[30-31]关于我国低碳发展的研究报告中估算的磷肥和钾肥隐含 CO₂ 排放系数相比,本文测算的过磷酸钙、兑卤法氯化钾生产过程能耗分别是其估算结果的 0.15 倍和 10.32 倍。齐晔等引用的排放系数是在国际化肥工业联合会 (IFA, International Fertilizer Industry Association) 2009 年一份报告 (Fertilizers, Climate Change and Enhancing Agricultural Productivity Sustainably) 提供全球各种磷肥消耗系数的基础上推算得来,且该系数在齐晔、王晓等 (2013) 后续的研究中继续引用。考虑磷肥种类较多且生产能耗差异较大,尤其是过磷酸钙与其他磷肥的单位能耗差异近 10 倍 (国家发展改革委员会 2007 年 4 月公布的《磷肥行业清洁生产评价指标体系 (试行)》),且我国磷肥自给有余,故本文对磷肥生产能耗采用我国相关数据单独测算。基于同样的原因,本文参考我国相关数据对氯化钾和硫酸钾的能耗系数单独测算。

目前检索到的相关文献中的排放系数,没有与本研究测算排放系数的测算口径完全对应,这也是排放

系数存在差异的原因之一。考虑 West、智静、齐晔等研究文献中化肥和农药排放系数均由美国等统计数据测算得到的,且存在年代差异、口径差异,所以本研究采用我国的能耗投入品生产能耗数据进行了测算。

3.2 本研究的分析过程有值得讨论和下一步深入开展研究的内容

(1) 主要能耗品的能耗分析口径需要改进。本研究分析的部分投入品的能耗仅估算了部分生产流程能耗,没有使用综合能耗,例如碳铵仅以合成氨工序作为代表,农膜仅以乙烯生产工序作为代表。

(2) 部分分析对象范围和方法值得在后续研究中进一步完善。IPCC 强调温室气体清单主要针对人为原因的排放,则估算范围主要是能耗投入品的生产和使用过程排放,不包括农田呼吸过程排放;由于缺少空置土地 CO₂ 排放背景量数据,本研究估算麦田呼吸排放 CO₂ 的量,直接使用了研究人员测算的排放通量,没有扣除背景排放量;农家肥的测算是使用化肥单位价值的排放量进行的估算,内含的一个假设是:单位价值的投入品的能源排放是相同的。此假设待后续研究中进行论证。

4 结论

(1) 我国 2010 年小麦生产温室气体总排放估算值 3.78 亿 t CO₂ 当量,单位面积排放量 18.23 t CO₂·hm⁻²,其中:主要能耗品投入生产和氮肥使用相关温室气体排放约为 0.88 亿 t CO₂ 当量,单位面积排放量为 4.25 t CO₂·hm⁻²,占 23.30%;其他为麦田呼吸排放量。

(2)2010年小麦生产的主产品和副产品中汇集了约3.07亿t CO₂,占小麦生产过程排放量约81.25%,净排放量约为0.71亿t。单位面积汇集量为14.81 t CO₂·hm⁻²,净排放量约为3.42 t CO₂·hm⁻²。

(3)比较小麦生产过程温室气体排放和碳汇集能力,2010年小麦生产过程温室气体排放和汇集的平衡产量约为6.83 t·hm⁻²。

参考文献:

- [1] 曹志平. 全球温室气体排放概况[J]. 生态学杂志, 1998, 17(1):73-74.
CAO Zhi-ping. Introduction of global emissions of greenhouse gas[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1998, 17(1):73-74.
- [2] 林而达, 刘颖杰. 温室气体排放和气候变化新情景研究的最新进展[J]. 中国农业科学, 2008, 41(6):1700-1707.
LIN Er-da, LIU Ying-jie. Advance in new scenarios of greenhouse gas emission and climate change[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(6):1700-1707.
- [3] 杨文志. 大气 CO₂ 浓度增加对农业生产的影响[J]. 农业环境保护, 1992, 11(5):232-233.
YANG Wen-zhi. The impact of the increase of concentration of CO₂ on agricultural production[J]. *Agro-environmental Protection*, 1992, 11(5):232-233.
- [4] 廉丽姝. CO₂ 增加对农业生产的影响[J]. 世界农业, 1996(11):46-47.
LIAN Li-shu. The impact of the increase of CO₂ on agricultural production[J]. *World Agriculture*, 1996(11):46-47.
- [5] Lal R. Agricultural activities and the global carbon cycle[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 70:103-116.
- [6] 高小升, 严双伍, 方建斌. 农业在全球气候谈判中地位的变化及其影响[J]. 西北农林科技大学学报(社会科学版), 2013(4):37-43.
GAO Xiao-sheng, YAN Shuang-wu, FANG Jian-bin. Change of position of agriculture in international climate negotiation and its impact[J]. *Journal Northwest A&F University(Social Science Edition)*, 2013(4):37-43.
- [7] 中国国家发展和改革委员会. 中国应对气候变化国家方案[M]. 2007.
The National Development and Reform Commission. Chinese national plan to respond to climate change[M]. 2007.
- [8] 中华人民共和国气候变化初始国家信息通报[M]. 2004.
The People's Republic of China Initial National Communication on Climate Change[M]. 2004.
- [9] 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报[EB/OL]. 资料来源: <http://nc.ccchina.gov.cn/web/column.asp?ColumnId=2>
The people's Republic of China Second National Communication on Climate Change[EB/OL]. <http://nc.ccchina.gov.cn/web/column.asp?ColumnId=2>.
- [10] 徐键辉. 粮食生产的能源消耗及其效率研究——基于 DEA 方法的实证分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
XU Jian-hui. A study on the energy use and energy efficiency of grain production: Empirical analysis based on DEA[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [11] 徐卫军, 张妮妮. 中国农用柴油需求中长期预测[J]. 农业技术经济, 2011(7):104-112.
XU Wei-jun, ZHANG Ni-ni. Medium and long-term projection on the demand of diesel oil in China's agricultural production[J]. *Agro-technological Economics*, 2011(7):104-112.
- [12] 谭秋成. 中国农业温室气体排放: 现状及挑战[J]. 中国人口·资源与环境, 2011(10):69-75.
TAN Qiu-cheng. Greenhouse gas emission in China's agriculture: Situation and challenge[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011(10):69-75.
- [13] 董红敏, 李玉娥, 陶秀萍, 等. 中国农业源温室气体排放与减排技术对策[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10):269-273.
DONG Hong-min, LI Yu-e, TAO Xiu-ping, et al. China greenhouse gas emissions from agricultural activities and its mitigation strategy[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(10):269-273.
- [14] 邹晓霞, 李玉娥, 高青竹, 等. 中国农业领域温室气体主要减排措施研究分析[J]. 生态环境学报, 2011, 20(8-9):1348-1358.
ZOU Xiao-xia, LI Yu-e, GAO Qing-zhu, et al. How to reduce greenhouse gas (GHG) emissions in agriculture: An analysis of measures and actions taken in China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(8-9):1348-1358.
- [15] 夏永秋, 颜晓元. 太湖地区春季协调农学、环境和经济效益的推荐施肥量[J]. 土壤学报, 2011, 48(6):102-110.
XIA Yong-qiu, YAN Xiao-yuan. Nitrogen fertilization rate recommendation integrating agronomic, environmental, and economic benefits for wheat season in the Taihu Lake region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(6):102-110.
- [16] Xia Y, Yan X. Life-cycle evaluation of nitrogen-use in rice-farming systems: Implication for economically-optimal nitrogen rates[J]. *Bio-geosciences*, 2011(8):3159-3168.
- [17] 国家发展和改革委员会价格司编. 2012 全国农产品成本收益资料汇编[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
The Price Department of the State Development and Reform Commission. National agricultural product cost and income data compilation in 2012[M]. Beijing: China Statistic Press, 2013.
- [18] 《中国化肥工业年鉴》编辑委员会. 中国化肥工业年鉴 2005 年—2006 年[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007.
Editorial Committee of China Fertilizer Industry Yearbook. China fertilizer industry yearbook 2005—2006[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007.
- [19] 中国工业节能与清洁生产协会、中国节能环保集团公司. 中国节能减排发展报告 2013[M]. 北京: 中国经济出版社, 2013.
Chinese Industrial Association of Energy-saving and Clean Production, China Energy Conservation and Environmental Protection Group. China energy-saving and emission reduction development report 2013[M]. Beijing: Chinese Economic Publishing House, 2013.
- [20] 2050 中国能源和碳排放研究课题组. 2050 中国能源和碳排放报告[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
Chinese energy and carbon emissions research team. The report on China's energy and carbon emissions 2050[M]. Beijing: Science Press, 2009.

- [21] 中国化工学会化肥专业委员会, 国农农化(北京)农业技术推广服务中心. 中国化肥工业年鉴 2012年[M]. 香港: 中国科学文献出版社, 2012.
- The Fertilizer Industry Committee of Chinese Chemical Society, Agricultural Chemical (Beijing) Agricultural Technology Extension and Service Center. China fertilizer industry yearbook 2012[M]. Hongkong: China Science Document Press, 2012.
- [22] 宋文质, 王少彬, 苏维瀚, 等. 我国农田土壤的主要温室气体 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放研究[J]. 环境科学, 1996, 17(1): 85-88.
- SONG Wen-zhi, WANG Shao-bin, SU Wei-han, et al. Agricultural activities and emissions of greenhouse gases in China region[J]. *Environmental Sciences*, 1996, 17(1): 85-88.
- [23] 《农业技术经济手册》编委会. 农业技术经济手册(修订本)[M]. 北京: 农业出版社, 1984: 127.
- Editorial Committee of Handbook of Agricultural Technology Economic. Handbook of agricultural technology economic(revision)[M]. Beijing: Agricultural Publishing House, 1984.
- [24] 中国农药工业协会. 中国农药工业年鉴 2011[M]. 北京: 中国农业出版社, 2012: 182.
- Chinese Pesticide Industry Association. Chinese pesticide industry yearbook 2011[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2012.
- [25] West T O, Marland G. A syntheses of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2002, 91: 217-232.
- [26] 智 静, 高吉喜. 中国城乡居民食品消费碳排放对比分析[J]. 地理科学进展, 2009, 28(3): 429-434.
- ZHI Jing, GAO Ji-xi. Analysis of carbon emission caused by food consumption in urban and rural inhabitants in China[J]. *Progress in Geography*, 2009, 28(3): 429-434.
- [27] 田 云, 张俊飏, 李 波. 中国农业碳排放研究: 测算、时空比较及脱钩效应[J]. 资源科学, 2012, 34(11): 2097-2105.
- TIAN Yun, ZHANG Jun-biao, LI Bo. Agricultural carbon emission in China: Calculation, spatial-temporal comparison and decoupling effects[J]. *Resources Science*, 2012, 34(11): 2097-2105.
- [28] 李 颖, 葛颜祥, 梁 勇. 农业碳排放与农业产出关系分析[J]. 中国农业资源与区划, 2013, 34(3): 60-65.
- LI Ying, GE Yan-xiang, LIANG Yong. Relationship between agricultural carbon emissions and agricultural gross value of output[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2013, 34(3): 60-65.
- [29] 闵继胜, 胡 浩. 农产品对外贸易对我国农业生产温室气体排放的影响研究[J]. 软科学, 2013, 27(8): 55-59.
- MIN Ji-sheng, HU Hao. Research on the impact of the foreign trade of agricultural product greenhouse gas emissions of agricultural production in China[J]. *Soft Sciences*, 2013, 27(8): 55-59.
- [30] 齐 晔. 中国低碳发展报告(2011—2012)[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2011: 60.
- QI Ye. Annual review of low-carbon development in China(2011—2012)[M]. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2011: 60.
- [31] 齐 晔. 中国低碳发展报告 2010[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 284.
- QI Ye. Annual review of low-carbon development in China: 2010[M]. Beijing: Science Press, 2011: 284.