

柴如山, 王擎运, 叶新新, 等. 我国典型省份小麦和玉米农田化学氮肥施用与生产运输过程的温室气体排放量估算[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(3): 707-713.

CHAI Ru-shan, WANG Qing-yun, YE Xin-xin, et al. Estimation of greenhouse gas emissions from production, transportation and fertilization of synthetic nitrogen for wheat and maize in typical provinces of China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(3): 707-713.

我国典型省份小麦和玉米农田化学氮肥施用与生产运输过程的温室气体排放量估算

柴如山¹, 王擎运^{1,2}, 叶新新¹, 马超¹, 屠人凤¹, 郜红建^{1*}

(1. 农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室, 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081)

摘要: 基于相关统计数据, 通过文献调研方法, 估算了我国河南、河北和山东3个典型省份在小麦和玉米上消费的化学氮肥产生的温室气体排放量, 包括化学氮肥施用产生的土壤 N_2O 直接排放、通过挥发沉降和淋溶径流途径损失的氮素导致的 N_2O 间接排放以及不同种类化学氮肥在生产和运输过程中的温室气体排放。结果表明: 河南、河北和山东3个典型省份在小麦上消费的化学氮肥产生的温室气体排放量分别为1536万、847万、1153万 $t CO_2\text{-eq}\cdot a^{-1}$, 单位播种面积温室气体排放量分别为2.85、3.61、3.09 $t CO_2\text{-eq}\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$, 单位产量温室气体排放量分别为0.46、0.60、0.51 $t CO_2\text{-eq}\cdot t^{-1}\cdot a^{-1}$; 相应省份在玉米上消费的化学氮肥产生的温室气体排放量分别为717万、720万、912万 $t CO_2\text{-eq}\cdot a^{-1}$, 单位播种面积温室气体排放量分别为2.19、2.27、2.92 $t CO_2\text{-eq}\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$, 单位产量温室气体排放量分别为0.40、0.43、0.46 $t CO_2\text{-eq}\cdot t^{-1}\cdot a^{-1}$ 。研究表明, 化学氮肥消费带来的温室气体排放主要来自于化学氮肥在生产过程中的温室气体排放以及化学氮肥施用导致的土壤 N_2O 直接排放这两部分。

关键词: 小麦; 玉米; 化学氮肥; N_2O ; 温室气体排放

中图分类号: X511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)03-0707-07 doi:10.11654/jaes.2018-0618

Estimation of greenhouse gas emissions from production, transportation and fertilization of synthetic nitrogen for wheat and maize in typical provinces of China

CHAI Ru-shan¹, WANG Qing-yun^{1,2}, YE Xin-xin¹, MA Chao¹, TU Ren-feng¹, GAO Hong-jian^{1*}

(1. Anhui Province Key Lab of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention, School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In this research, the amount of greenhouse gas emissions induced by consumption of synthetic N for wheat and maize in typical provinces (Henan, Hebei, and Shandong) of China was assessed based on the analysis of statistical data using a data mining method, and included direct N_2O emissions from soil, indirect N_2O emissions through volatilization of NH_3 and N leaching and runoff, and greenhouse gas emissions from production and transportation of different kinds of synthetic N fertilizers. In wheat production, the total greenhouse gas emissions from synthetic N fertilization were 15.36 million, 8.47 million, and 11.53 million tons CO_2 equivalent per year for Henan, Hebei, and Shandong Provinces, respectively, or 2.85, 3.61, and 3.09 tons CO_2 equivalent per hectare, or 0.46, 0.60, and 0.51 tons CO_2 equivalent per

收稿日期: 2018-05-11 录用日期: 2018-08-10

作者简介: 柴如山(1986—), 男, 安徽亳州人, 博士, 讲师, 主要从事土壤养分循环与农业温室气体排放研究。E-mail: rschai@ahau.edu.cn

*通信作者: 郜红建 E-mail: hjgao@ahau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300901, 2016YFD0300801, 2017YFD0301302); 耕地培育技术国家工程实验室开放基金项目(201705)

Project supported: The National Key R&D Projects of China (2016YFD0300901, 2016YFD0300801, 2017YFD0301302); The Project of National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land (201705)

tion of wheat, respectively. In maize production, the total greenhouse gas emissions from synthetic N fertilization were 7.17 million, 7.20 million, and 9.12 million tons CO₂ equivalent per year for Henan, Hebei, and Shandong Provinces, respectively, or 2.19, 2.27, and 2.92 tons CO₂ equivalent per hectare, or 0.40, 0.43, and 0.46 tons CO₂ equivalent per ton of maize, respectively. Direct N₂O emissions from soil and greenhouse gas emissions from the production of synthetic N fertilizers were the main sources of greenhouse gas emissions from synthetic N fertilization.

Keywords: wheat; maize; synthetic N fertilizers; N₂O; greenhouse gas emissions

化学氮肥在我国粮食产量增加的过程中发挥着不可替代的重要作用,但在我国,由于受到诸多因素的影响,农民为了获得作物高产,过量施肥现象相当普遍^[1-2]。化学氮肥施用是导致农田土壤 N₂O 气体排放的最重要因素之一。Gao 等^[3]通过建立我国农田 N₂O 排放数据库,采用 Meta analysis 汇总 N₂O 排放因子,得出我国水田和旱地土壤 N₂O 直接排放因子分别为 0.41% 和 1.05%。除了化学氮肥施用带来的农田 N₂O 直接排放外,通过径流和渗漏方式进入到地表水和地下水的这部分氮素以及挥发到大气中的 NH₃ 等也会间接导致 N₂O 的排放^[4-5]。另外,化学氮肥的生产过程包括化石燃料和化学氮肥原料的开采和运输、氨合成过程及其二次加工都需要消耗大量化石燃料和电力,这也均与温室气体排放相关^[4]。Zhang 等^[4]的研究结果显示,2005 年我国与氮肥生产和施用过程相关的温室气体排放量占全国温室气体排放总量的 6.8%,其中 N₂O 排放量更是占到全国 N₂O 排放总量的 50%。

近年来,我国农田所投入的化学氮肥在生产、运输和施用过程中导致的温室气体排放问题逐渐引起人们的关注^[6-8]。对于我国不同种类化学氮肥(尿素、复混肥和碳酸氢铵等)来说,其在制造和运输过程中的温室气体排放系数存在差异,而在以往的研究中对这方面的关注较少。本研究基于《中国统计年鉴》和《全国农产品成本收益资料汇编》中 2013—2015 年我国典型省份(河南、河北和山东)小麦和玉米的年播种面积及不同种类化学氮肥的单位面积施用量,并根据文献调研得出化学氮肥施用导致的旱地土壤 N₂O 直接排放因子、挥发沉降和淋溶径流途径损失氮素的 N₂O 间接排放因子及不同种类化学氮肥生产和运输过程的温室气体排放系数,分析了我国河南、河北和山东 3 个典型省份在小麦和玉米上消费的化学氮肥产生的温室气体排放量,以期为我国区域农田温室气体排放清单的编制和化学氮肥施用中温室气体减排对策的制定提供数据基础和决策支持。

1 材料与方 法

1.1 数据来源

本研究的研究区域为河南、河北和山东 3 个小麦和玉米典型种植省份,2015 年这些省份的小麦和玉米总播种面积分别占到了全国小麦和玉米总播种面积的 48% 和 26%。这些省份在小麦和玉米上不同种类化学氮肥单位面积施用量来源于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》^[9],估算中所用到的小麦和玉米播种面积来自于国家统计局编制的《中国统计年鉴》^[10]。在小麦和玉米上投入的化学氮肥的种类主要包括尿素、复混肥和碳酸氢铵等。对 2013 年我国种植业化肥施用状况调查分析的结果显示,氮磷钾等养分配方复混肥样本数占农民选购复混肥总样本数的比例较高^[11],本研究采用此养分比例对复混肥中氮素含量进行计算。为避免年际间的波动,对于小麦和玉米的年播种面积及其化学氮肥单位面积施用量,采用 2013—2015 三年的平均值。对化学氮肥消费所产生的温室气体排放量的估算包括化学氮肥施用导致的农田土壤 N₂O 直接排放、氨挥发沉降和氮淋溶径流损失导致的 N₂O 间接排放以及化学氮肥在生产运输过程中的温室气体排放^[4]。

1.2 化学氮肥消费量

用以估算我国典型省份小麦或玉米年化学氮肥消费量的计算公式为:

$$N_c = \sum (NR_i \times A) \quad (1)$$

式中: N_c 为小麦或玉米的年化学氮肥消费量, kg; NR_i 为小麦或玉米上不同种类化学氮肥(尿素、复混肥和碳酸氢铵)单位面积施用量, kg·hm⁻²; A 为小麦或玉米的年均播种面积, hm²。

1.3 化学氮肥施用导致的土壤 N₂O 直接排放量

对于我国农田因氮肥施用导致的 N₂O 排放估算,应用较多的是排放因子法。排放因子法虽然不能反映一些因素对农田 N₂O 排放的影响,但却是在大尺度上计算 N₂O 排放的通用方法^[3]。由于相关数据和资料

的限制,本研究以《2006年IPCC国家温室气体清单指南》中提供的方法对化学氮肥施用导致的土壤 N_2O 直接排放量进行估算,采用Gao等^[3]基于261个旱地样本数据总结得出的旱地土壤 N_2O 直接排放因子1.05%。

用以估算我国典型省份小麦或玉米土壤由于化学氮肥施用导致的土壤 N_2O 直接排放量的计算公式为:

$$E_{DN_2O} = N_C \times EF_1 \times 44/28 \quad (2)$$

式中: E_{DN_2O} 为小麦或玉米土壤由于化学氮肥施用导致的土壤 N_2O 直接排放量,kg; EF_1 为旱地土壤因化学氮肥施用造成的土壤 N_2O 直接排放因子,取1.05%;44/28表示将N转换为 N_2O 的系数。

1.4 化学氮肥施用导致的 N_2O 间接排放量

除了化学氮肥施用产生的农田土壤 N_2O 直接排放外,以 NH_3 等形式挥发的氮以及通过渗漏和径流损失的这部分氮素也会导致 N_2O 的间接排放。Zhang等^[4]基于我国259个旱地样本数据得出上述两部分氮素的损失系数分别为12.9%和9.8%。根据《2006年IPCC国家温室气体清单指南》,挥发的氮以及通过渗漏和径流损失的这部分氮素的 N_2O 间接排放因子分别为1%(EF_2)和0.75%(EF_3)^[12]。因此,用以估算我国典型省份小麦或玉米化学氮肥施用导致的 N_2O 间接排放量的计算公式为:

$$E_{IN_2O} = N_C \times (12.9\% \times EF_2 + 9.8\% \times EF_3) \times 44/28 \quad (3)$$

式中: E_{IN_2O} 为小麦或玉米由于化学氮肥施用导致的 N_2O 间接排放量,kg。

1.5 化学氮肥在生产和运输过程中的温室气体排放量

对于尿素、复混肥和碳酸氢铵的工业生产来说,温室气体排放系数分别为8.1、7.4、7.2 kg CO_2 -eq·kg⁻¹ N,其运输过程的温室气体排放系数分别为0.06、0.18、0.15 kg CO_2 -eq·kg⁻¹ N^[4]。用以估算我国典型省份在小麦或玉米上消费的化学氮肥在生产、运输过程中温室气体排放量的计算公式为:

$$E_P = \sum [N_{C(i)} \times EF_{4(i)}] \quad (4)$$

$$E_T = \sum [N_{C(i)} \times EF_{5(i)}] \quad (5)$$

式中: E_P 为在小麦或玉米上消费的化学氮肥在生产过程中的温室气体排放量,kg; $EF_{4(i)}$ 为不同种类化学氮肥(尿素、复混肥和碳酸氢铵)生产过程的温室气体排放因子; E_T 为在小麦或玉米上消费的化学氮肥在运输过程中的温室气体排放量,kg; $EF_{5(i)}$ 为不同种类化学氮肥运输过程的温室气体排放因子。

1.6 化学氮肥产生的温室气体排放总量

用以估算我国典型省份小麦或玉米化学氮肥施用导致的温室气体排放总量的计算公式为:

$$E_{TC} = (E_{DN_2O} + E_{IN_2O}) \times 298 + E_P + E_T \quad (6)$$

式中: E_{TC} 为我国典型省份小麦或玉米消费的化学氮肥产生的温室气体排放总量,kg;298表示在100年尺度上, N_2O 的全球增温潜势是 CO_2 的298倍。

2 结果与分析

2.1 我国典型省份小麦和玉米的化学氮肥施用现状

根据《中国统计年鉴》中2013—2015年河南、河北、山东3省的小麦或玉米年播种面积,可以得出各省份小麦的年均播种面积分别为540.0万、234.6万、373.8万 hm^2 ,玉米的年均播种面积分别为327.7万、317.6万、312.0万 hm^2 。在这3个省份之中,河南省的小麦播种面积最大,占3个省份小麦总播种面积的47%,其次为山东省和河北省;3个省份的玉米播种面积基本相当。对《全国农产品成本收益资料汇编》中各省份氮肥投入情况进行分析,可知2013—2015年期间河南、河北、山东3省小麦的化学氮肥单位面积施用量分别为207、262、225 kg· hm^{-2} ,河北省的小麦化学氮肥施用量在3个典型省份中为最高,比山东省和河南省分别高出16%和26%。3个典型省份在小麦上投入的化学氮肥包括尿素、复混肥和碳酸氢铵等,以尿素和复混肥为主,碳酸氢铵的施用量较低,其氮素投入比例分别为3%、7%和6%(表1)。对于河南和山东这两个省份来说,小麦的尿素单位面积施用量与复混肥单位面积施用量(以氮素养分含量计)基本相当;而河北省小麦的化学氮肥投入以尿素为主,以尿素形式投入的氮素占到氮素投入总量的59%,其次是复混肥,占到34%。河南、河北、山东3省玉米的化学氮肥单位面积施用量分别为160、165、213 kg· hm^{-2} ,山东省的玉米化学氮肥施用量比河北和河南省的分别高出29%和33%。和小麦一样,这3个省份玉米的氮素投入也均以尿素和复混肥为主,而碳酸氢铵的投入比例更低,分别为2%、1%和2%。各省份玉米的化学氮肥施用量均低于小麦。河南、河北和山东3个省份小麦和玉米两种粮食作物的年均化学氮肥消费总量分别为164万、114万、151万 $t \cdot a^{-1}$,河南省和山东省主要旱作作物的化学氮肥消费量分别比河北省高出44%和32%。

2.2 N_2O 直接和间接排放

基于河南、河北和山东3省小麦或玉米的年化学氮肥消费量,利用公式(2)和公式(3)可以分别计算出

表1 我国典型省份小麦和玉米的化学氮肥施用量和消费量

Table 1 Application rates and consumption of synthetic N fertilizers for wheat and maize in typical provinces of China

作物	省份	化学氮肥单位面积施用量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$				年化学氮肥消费量/ $\text{万}\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$
		尿素	复混肥	碳酸氢铵	总量	
小麦	河南	99±2b	103±4b	6±1b	207±4c	112±3a
	河北	155±5a	90±4c	17±3a	262±6a	61±1c
	山东	102±1b	109±6a	14±1a	225±5b	84±3b
玉米	河南	75±5b	80±3b	4±2a	160±8b	52±3b
	河北	93±1ab	70±4c	2±3a	165±2b	52±2b
	山东	110±15a	98±5a	5±1a	213±11a	66±2a

注:表中数据为“平均值±标准差”,同一列不同字母表示处理间差异达到5%显著水平。下同。

Note: The chart data were “Mean ± standard deviation”. Different letters in the same column mean significant difference among treatments at 5% level. The same below.

各省份由于化学氮肥施用导致的 N_2O 直接和间接排放量(表2)。对于小麦来说,河南、河北和山东3个省份由于化学氮肥施用所导致的年均 N_2O 排放总量分别为2.21万、1.21万、1.66万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$,其中来自于农田土壤的 N_2O 直接排放量分别为1.85万、1.01万、1.39万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 。由公式(2)和公式(3)可知,化学氮肥施用所产生的 N_2O 排放量与化学氮肥消费量有直接关系。河南省的小麦播种面积较大,在3个典型省份中居于首位,远超过山东省和河北省的小麦播种面积,这致使其在小麦上的化学氮肥消费量较大。相应地,河南省小麦由于化学氮肥施用产生的直接和间接 N_2O 排放量均高于山东省和河北省。3个典型省份在玉米上由于化学氮肥施用所导致的年均 N_2O 排放总量分别为1.03万、1.03万、1.31万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$,其中来自于农田土壤的 N_2O 直接排放量分别为0.86万、0.86万、1.09万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 。3个省份的小麦由于化学氮肥施用所带来的 N_2O 排放量均高于玉米。本研究的结果表明,在我国旱地上化学氮肥施用过程所导致的 N_2O 排放以直接排放为主,来自土壤的 N_2O 直接排放量占到化学氮肥施用产生的 N_2O 排放总量的84%。总体来看,河南、河北和山东这3个省份小麦玉米两种粮食作物化学氮肥施用过程的年均 N_2O 排放总量分别为3.23万、2.24万、2.96万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$,河南省的排放量居于首位,其次是山东省和河北省。

2.3 生产运输过程中的温室气体排放

基于《中国统计年鉴》中河南、河北和山东3省的小麦或玉米年播种面积,以及《全国农产品成本收益资料汇编》中各省份小麦或玉米上不同种类化学氮肥(尿素、复混肥和碳酸氢铵)的单位面积施用量,利用

表2 我国典型省份小麦和玉米化学氮肥施用产生的 N_2O 排放量Table 2 The estimated N_2O emissions from the application of synthetic N fertilizers for wheat and maize in typical provinces of China

作物	省份	N_2O 排放量/ $\text{万}\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$		
		直接	间接	总量
小麦	河南	1.85±0.05a	0.36±0.01a	2.21±0.05a
	河北	1.01±0.01c	0.20±0.00c	1.21±0.01c
	山东	1.39±0.04b	0.27±0.01b	1.66±0.05b
玉米	河南	0.86±0.05b	0.17±0.01b	1.03±0.06b
	河北	0.86±0.03b	0.17±0.01b	1.03±0.04b
	山东	1.09±0.04a	0.21±0.01a	1.31±0.05a

公式(4)和公式(5)可以计算出在小麦或玉米上消费的不同种类化学氮肥在生产及运输过程中的温室气体排放量(表3)。由于我国农田中施用的不同种类化学氮肥如尿素、复混肥和碳酸氢铵在工业生产和运输过程中的温室气体排放系数存在差异,所以,在计算过程中通过区分具体化学氮肥类型可以在一定程度上更为准确地估算我国典型省份在小麦或玉米上消费的化学氮肥在其生产和运输过程中的温室气体排放量。对于小麦来说,河南、河北和山东3省来自化学氮肥生产运输的年均温室气体排放量分别为879万、486万、659万 $\text{t}\text{CO}_2\text{-eq}\cdot\text{a}^{-1}$,其中尿素和复混肥这两种化学氮肥消费产生的温室气体排放量分别占到各省份化学氮肥生产运输过程温室气体排放量的97%、94%和94%,碳酸氢铵由于农田施用量很低,其产生的温室气体排放量所占份额很小。对玉米来说,河南、河北和山东各省份所消费的化学氮肥在生产运输过程中的年均温室气体排放量分别为410万、413万、523万 $\text{t}\text{CO}_2\text{-eq}\cdot\text{a}^{-1}$,其中尿素和复混肥这两种化学氮肥的温室气体排放量分别占到了各省份化学氮肥生产运输过程温室气体排放量的98%、99%和98%。

2.4 温室气体排放总量

基于河南、河北和山东3省小麦或玉米化学氮肥施用导致的 N_2O 直接和间接排放量,以及所消费的化学氮肥在生产及运输过程中的温室气体排放量,利用公式(6)可以计算出各省份小麦或玉米化学氮肥消费产生的温室气体排放总量(图1)。河南、河北和山东3省在小麦上消费的化学氮肥带来的年均温室气体排放量分别为1536万、847万、1153万 $\text{t}\text{CO}_2\text{-eq}\cdot\text{a}^{-1}$,其中河南省的温室气体排放量最高,分别比山东省和

表3 我国典型省份在小麦和玉米上消费的化学氮肥在生产和运输过程中的温室气体排放量

Table 3 The estimated greenhouse gas emissions from the production and transportation of synthetic N fertilizers for wheat and maize in typical provinces of China

作物	省份	温室气体排放量/万 t CO ₂ -eq·a ⁻¹						总量
		尿素		复混肥		碳酸氢铵		
		生产	运输	生产	运输	生产	运输	
小麦	河南	431±9a	3.19±0.07a	410±19a	9.97±0.46a	25±3b	0.52±0.07b	879±21a
	河北	295±5c	2.19±0.04c	156±6c	3.79±0.14c	29±6b	0.60±0.12b	486±5c
	山东	310±3b	2.30±0.03b	302±19b	7.35±0.47b	37±2a	0.77±0.05a	659±21b
玉米	河南	200±13b	1.48±0.10b	195±10b	4.75±0.25b	9±4a	0.18±0.07a	410±24b
	河北	238±8ab	1.76±0.06ab	164±13c	3.99±0.31c	5±6a	0.11±0.12a	413±14b
	山东	278±35a	2.06±0.26a	226±16a	5.49±0.39a	11±2a	0.22±0.05a	523±21a

河北省高出33%和81%;就单位播种面积温室气体排放量而言,最高的是河北省,为3.61 t CO₂-eq·hm⁻²·a⁻¹,其次是山东省和河南省,分别为3.09、2.85 t CO₂-eq·hm⁻²·a⁻¹。河南、河北和山东3个典型省份在玉米上消费的化学氮肥产生的年均温室气体排放量分别为717万、720万、912万 t CO₂-eq·a⁻¹,其中山东省的温室气体排放量较高,河南省和河北省的温室气体排放量基本相当;3个省份单位播种面积温室气体排放量分别为2.19、2.27、2.92 t CO₂-eq·hm⁻²·a⁻¹,其中山东省与河北和河南省相比偏高。河南、河北和山东3个省份小麦来自化学氮肥消费的单位产量温室气体排放量分别为0.46、0.60、0.51 t CO₂-eq·t⁻¹·a⁻¹,其中河北省和山东省的单位产量温室气体排放量相对较高(图2)。3个典型省份玉米来自化学氮肥消费的单位产量温室气体排放量分别为0.40、0.43、0.46 t CO₂-eq·t⁻¹·a⁻¹,在5%水平上,省份间没有显著性差异。对于小麦和玉米这两种粮食作物消费的化学氮肥导致的温室气体排放总量来说,河南省居于首位,年均温室气体排放量达到2254万 t CO₂-eq·a⁻¹,其次是山东省和河北省,分别为2065万 t CO₂-eq·a⁻¹和1567万 t CO₂-eq·a⁻¹。

3 讨论

本研究估算了我国3个小麦和玉米主要种植省份河南、河北和山东在农田化学氮肥施用及其生产运输过程中产生的温室气体排放量,可为不同区域农业源温室气体排放清单编制以及政府制定相应温室气体减排政策和方案提供科学依据。本文估算结果的不确定性主要来源于计算过程中所采用的参数,虽然本研究所选择的计算参数的可信度较高,但文献调研得出的一些计算系数本身的不确定性会延伸到本研

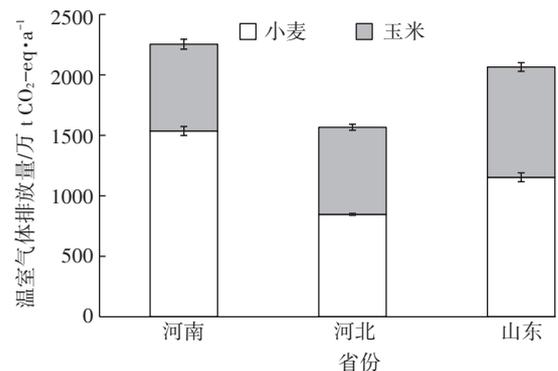


图1 我国典型省份在小麦和玉米上消费的化学氮肥产生的温室气体排放量

Figure 1 The estimated greenhouse gas emissions from the consumption of synthetic N fertilizers on wheat and maize in typical provinces of China

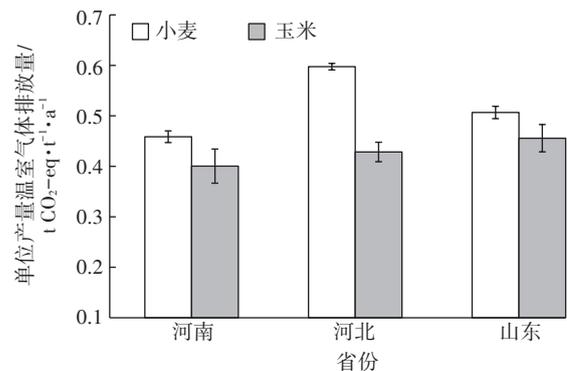


图2 我国典型省份小麦和玉米化学氮肥消费的单位产量温室气体排放量

Figure 2 The estimated greenhouse gas emissions of per unit of yield from the consumption of synthetic N fertilizers on wheat and maize in typical provinces of China

究的估算中,导致对化学氮肥生产运输及施用所产生的温室气体排放量的估算结果不够精确。以化学氮肥施用导致的N₂O排放量估算为例,由于可获取的数据

有限,本研究没有综合评估相关因素对我国农田化学氮肥施用导致的土壤 N_2O 直接排放因子的影响,而是采用了Gao等^[3]基于我国261个旱地样本数据总结得出的旱地土壤 N_2O 直接排放因子,这在一定程度上不能很好地反映环境因素差异所带来的 N_2O 排放量的时空变异性,今后有必要根据不同区域的具体情况得出具有空间分异性的排放因子。Zhang等^[4]基于我国259个旱地样本数据得出以 NH_3 等形式挥发的氮以及通过渗漏和径流损失的氮这两部分的损失系数分别为12.9%和9.8%。对于挥发沉降的氮以及通过渗漏和径流损失的这部分氮素导致的间接 N_2O 排放因子,由于相关资料欠缺,本研究未能根据实际情况进行修正得到本土化的排放因子,而是参考了Zhang等^[4]的处理方法,采用IPCC推荐值,这可能使估算结果与实际排放量存在一定偏差。

对于3个典型省份的农田化学氮肥消费来说,河北省小麦以及山东省玉米的单位播种面积温室气体排放量较高,这主要与较高的化学氮肥单位面积施用量有关。通过优化农田氮肥管理技术实现氮肥减量施用具有较大的温室气体减排潜力。研究表明,一些较好的农田氮肥管理方法,例如测土配方技术、针对小麦和玉米的氮素实时监控技术(In-season nitrogen Management)以及Nutrient Expert推荐施肥专家系统等,在保证粮食作物产量的前提下,可以在一定程度上降低我国农田化学氮肥施用量^[13-15]。以比较适合以家庭为主要经营单元的小农户生产体系的Nutrient Expert推荐施肥专家系统为例,河南、河北和山东3个省份的小麦氮肥推荐施用量分别为144、135、140 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[14]。在应用此氮肥管理技术的情况下,与农户习惯施肥相比,可分别节约氮肥63、127、85 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,进而减少相应的温室气体排放量。如何更好地让广大农户接受并采用先进的氮肥管理技术是目前需要解决的一个重要问题。韩洪云等^[16]对山东省枣庄市薛城区农户的调研数据表明,农户耕地采用平均分地的分配方式,与农技人员联系不方便会导致农户未采纳测土配方施肥技术。Huang等^[17]在我国山东省进行的研究表明,通过对农民进行技术培训可有效引导农民进行合理施肥,可以达到玉米农田氮肥施用减量22%的效果。这些研究说明,一些较好的农田化学氮肥管理技术要实现大范围推广,对农户进行技术培训是较好的方式之一。因此,农业部门应通过专家知识讲座与田间具体指导相结合的方式加强化学氮肥优化管理技术的推广,并提供良好的后续技术咨询

服务。在条件允许的地区可以先进行示范试验,这样有助于消除农户规避风险的心理。我国旱地作物上化学氮肥消费带来的温室气体排放主要来自于化学氮肥的生产过程以及土壤 N_2O 直接排放这两个方面。我国不同种类化学氮肥生产过程的温室气体排放系数存在差异,尿素、复混肥和碳酸氢铵工业生产过程的温室气体排放系数分别为8.1、7.4、7.2 $\text{kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{kg}^{-1}\text{N}$ ^[4]。目前我国旱地作物氮肥投入以尿素和复混肥为主,碳酸氢铵所占比例很低,今后可进一步加大复混肥的投入比例,以减少来自化学氮肥生产过程的温室气体排放。河北省小麦以尿素的投入比例比较高,可通过投入氮肥种类的适当调整以降低来自氮肥生产的温室气体排放量。另外,我国平均氮肥综合碳排放系数是国外平均水平的1.6倍,未来也可考虑通过降低化学氮肥制造链各环节的能耗来降低我国因农田化学氮肥使用带来的温室气体排放量^[18]。

4 结论

(1)我国河南、河北和山东3个典型省份小麦和玉米的化学氮肥投入均以尿素和复混肥为主,碳酸氢铵的投入比例很低。

(2)3个典型省份小麦化学氮肥消费产生的温室气体排放量分别为1536万、847万、1153万 $\text{t CO}_2\text{-eq}\cdot\text{a}^{-1}$,河南省和山东省的排放量远高于河北省;就单位播种面积和单位产量温室气体排放量来说,河北省均高于山东省和河南省。

(3)3个典型省份玉米化学氮肥消费产生的温室气体排放量分别为717万、720万、912万 $\text{t CO}_2\text{-eq}\cdot\text{a}^{-1}$,均低于相应省份小麦的排放量;山东省玉米单位播种面积温室气体排放量高于河北省和河南省,而3个省份的单位产量温室气体排放量差异不大。

(4)我国典型省份小麦和玉米化学氮肥消费带来的温室气体排放主要来自于尿素和复混肥生产过程中的温室气体排放以及农田施用导致的土壤 N_2O 直接排放这两部分,今后可以从这两个方面寻求相应的温室气体减排对策。

致谢:本文部分数据来源于已发表的文献,在此对所有文献作者表示衷心感谢!

参考文献:

- [1] Miao Y X, Stewart B A, Zhang F S. Long-term experiments for sustainable nutrient management in China: A review[J]. *Agronomy for Sustain-*

- able Development, 2011, 31(2):397-414.
- [2] 王敬国, 林 杉, 李保国. 氮循环与中国农业氮管理[J]. 中国农业科学, 2016, 49(3):503-517.
WANG Jing-guo, LIN Shan, LI Bao-guo. Nitrogen cycling and management strategies in Chinese agriculture[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(3):503-517.
- [3] Gao B, Ju X T, Zhang Q, et al. New estimates of direct N₂O emissions from Chinese croplands from 1980 to 2007 using localized emission factors[J]. *Biogeosciences*, 2011, 8(10):3011-3024.
- [4] Zhang W F, Dou Z X, He P, et al. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(21):8375-8380.
- [5] Wang J N, Chen N W, Yan W J, et al. Effect of dissolved oxygen and nitrogen on emission of N₂O from rivers in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 103:347-356.
- [6] Cui Z L, Yue S C, Wang G L, et al. Closing the yield gap could reduce projected greenhouse gas emissions: A case study of maize production in China[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(8):2467-2477.
- [7] Xia L L, Ti C P, Li B L, et al. Greenhouse gas emissions and reactive nitrogen releases during the life-cycles of staple food production in China and their mitigation potential[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 556:116-125.
- [8] Zhang G, Wang X K, Sun B F, et al. Status of mineral nitrogen fertilization and net mitigation potential of the state fertilization recommendation in Chinese cropland[J]. *Agricultural Systems*, 2016, 146:1-10.
- [9] 国家发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本收益资料汇编(2013—2015)[M]. 北京:中国统计出版社, 2014—2016.
National Development and Reform Commission of China. China agricultural products cost-benefit yearbooks (2013—2015) [M]. Beijing: China Statistic Press, 2014—2016.
- [10] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴(2013—2015)[M]. 北京:中国统计出版社, 2014—2016.
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook (2013—2015)[M]. Beijing:China Statistic Press, 2014—2016.
- [11] 杨 帆, 孟远夺, 姜 义, 等. 2013年我国种植业化肥施用状况分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1):217-225.
YANG Fan, MENG Yuan-duo, JIANG Yi, et al. Chemical fertilizer application and supply in crop farming in China in 2013[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(1):217-225.
- [12] The National Greenhouse Gas Inventories Programme IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[M]. Japan, Hayama, Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [13] Cui Z L, Yue S C, Wang G L, et al. In-season root-zone N management for mitigating greenhouse gas emission and reactive N losses in intensive wheat production[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(11):6015-6022.
- [14] Chuan L M, He P, Pampolino M F, et al. Establishing a scientific basis for fertilizer recommendations for wheat in China: Yield response and agronomic efficiency[J]. *Field Crops Research*, 2013, 140:1-8.
- [15] 张卫红, 李玉娥, 秦晓波, 等. 应用生命周期法评价我国测土配方施肥项目减排效果[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(7):1422-1428.
ZHANG Wei-hong, LI Yu-e, QIN Xiao-bo, et al. Evaluation of greenhouse gas emission reduction by balanced fertilization in China using life cycle assessment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(7):1422-1428.
- [16] 韩洪云, 杨增旭. 农户测土配方施肥技术采纳行为研究:基于山东省枣庄市薛城区农户调研数据[J]. 中国农业科学, 2011, 44(23):4962-4970.
HAN Hong-yun, YANG Zeng-xu. Analysis on farmers' adoptive behavior of soil testing for formulated fertilization: Empirical evidence from the Xuecheng District of Zaozhuang City in Shandong Province [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(23):4962-4970.
- [17] Huang J, Xiang C, Jia X, et al. Impacts of training on farmers' nitrogen use in maize production in Shandong, China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 67(4):321-327.
- [18] 陈 舜, 逯 非, 王效科. 中国氮磷钾肥制造温室气体排放系数的估算[J]. 生态学报, 2015, 35(19):6371-6383.
CHEN Shun, LU Fei, WANG Xiao-ke. Estimation of greenhouse gases emission factors for China's nitrogen, phosphate, and potash fertilizers[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(19):6371-6383.