

DOI: 10.5846/stxb201405271084

陈舜, 逯非, 王效科. 中国主要农作物种植农药施用温室气体排放估算. 生态学报, 2016, 36(9): - - .

Chen S, Lu F, Wang X K. Estimate of Greenhouse Gases Emission from Pesticides Usage in China's Major Crops. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(9): - - .

中国主要农作物种植农药施用温室气体排放估算

陈 舜^{1,2}, 逯 非¹, 王效科^{1,*}

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:过去 30 年来我国农作物的播种面积并未产生太大变化,但病虫害的发生和防治次数却不断增加,根据六种中国主要农作物的病虫害发生情况,收集了相应的农药用量及其制造的温室气体排放量数据,估算了中国主要农作物在种植过程中,因对病虫害使用杀虫剂和杀菌剂而产生的温室气体排放量现状。结果表明,我国主要农作物小麦、水稻、玉米、马铃薯、油菜和棉花的每公顷病虫害防治时使用农药所产生的温室气体排放量分别是 9.19 (1.86—23.24)、20.54 (2.03—50.95)、10.38 (3.45—19.32)、5.91 (2.15—18.34)、10.84 (8.10—13.62) 和 19.51 (5.11—49.01) kg CE hm⁻² a⁻¹,即水稻和棉花最高;但论单产农药温室气体排放量,则油菜和棉花远高于其余 4 种粮食作物。每年小麦、水稻、玉米、马铃薯、油菜和棉花的病虫害防治使用农药所产生的总温室气体排放量分别是 220.8 (44.7 — 558.4)、606.7 (60.0 — 1505.1)、336.4 (112.0 — 606.3)、30.9 (11.2 — 96.0)、79.5 (59.4 — 99.8) 和 96.4 (25.2 — 242.2) Gg CE,总计 1.37 (0.31—3.13) Tg CE。将以上六种作物的病虫害防治情况外推到全国农作物,则我国一年因为农作物病虫害防治而产生的温室气体排放量为 2.13 (0.48—4.85) Tg CE。另外本文由于缺乏草害面次数据而没有包括除草剂本身,所以上数字仍是低估。病虫害防治由于作物本身、防治对象、防治方法以及药剂用量的固有差异,导致农作物病虫害防治的温室气体排放量计算结果存在着较大的不确定性,目前基于自下而上农户调查的估算方法无法克服这些问题,更精确的估算需要自上而下的企业级调查数据。

关键词:农作物;杀虫剂;杀菌剂;温室气体排放

Estimate of Greenhouse Gases Emission from Pesticides Usage in China's Major Crops

CHEN Shun^{1,2}, LU Fei¹, WANG Xiaoke^{1,*}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Over the past 30 years, China's total area sown with crops did not change significantly. Meanwhile, the occurrences of crop pests and diseases as well as the control (treatment) areas have increased drastically. China has become the world's largest pesticide manufacturer and consumer since 2005 and the up-trend is expected to continue. Correspondingly, the greenhouse gases (GHGs) emission resulting from pesticide usage may also increase fast and become an important part of indirect GHGs emission in agriculture. However, domestic GHGs emission parameters from pesticide usage were rarely reported in analysis of China's agricultural life-cycle, which leads to considerable uncertainty in studies related to agricultural indirect GHGs emission. In this study, GHGs emission from pesticides manufacture was estimated by

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目 (71003092); 科技部 973 专题 (2010CB833504-2); 中国科学院战略性先导科技专项子课题 (XDA05050602, XDA05060102)

收稿日期:2014-05-27; 网络出版日期:2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangxk@rcees.ac.cn

summing up the global warming potential of GHGs emitted from four processes including manufacture of active ingredients, formulation of emulsifiable oils/wettable powders/granules, packaging, and transport. According to the occurrence of pests and diseases in six major crops (wheat, rice, maize, potato, oilseed rape, and cotton) in China, the amount of current GHGs emissions induced by usage of insecticides and fungicides specific for these crops was assessed based on the integration of available information on the use of relevant pesticides and GHGs emissions from their manufacturing. Our estimation indicated that the GHGs emission pertaining to pests and diseases control was the highest for rice and cotton (20.54 [2.03—50.95] and 19.51 [5.11—49.01], respectively) followed by oilseed rape (10.84 [8.10—13.62]), maize (10.38 [3.45—19.32]), wheat (9.19 [1.86—23.24]), and potato (5.91 [2.15—18.34] kg carbon equivalent [CE] per hectare each year). Different crop pests and diseases contributed differently to crop's GHGs emission from pesticides usage: for maize and cotton, pests were the main contributors (especially maize borer, maize earworm, and cotton plant-bug); for oilseed rape and potato, diseases were the main contributors (especially potato late blight and rape sclerotinia rot); and for wheat and rice, pests and diseases both contributed equally to the total emission (especially wheat aphid, wheat midge, wheat red spider, wheat powdery mildew, wheat scab, rice plant hopper, rice leaf roller, rice striped stem borer, rice blast, and rice sheath blight). Meanwhile, as to the pesticide GHGs emission per unit yield, all four grain crops contributed far less than cotton and oilseed rape. Correspondingly, the overall emission due to the insect pests and diseases control measures for each of the analyzed crops in China was: 220.8 (44.7—558.4), 606.7 (60.0—1505.1), 336.4 (112.0—606.3), 30.9 (11.2—96.0), 79.5 (59.4—99.8), and 96.4 (25.2—242.2) Gg CE yr⁻¹ for wheat, rice, maize, potato, oilseed rape, and cotton, respectively, with a total amount of 1.37 (0.31—3.13) Tg CE year⁻¹. It should be noted that these results are underestimation of China's actual pesticide GHGs emission since the herbicides were not considered because of the unavailability of weed treatment data. Owing to the variation in the characteristics of crop pests and diseases control measures (including various conditions of crops, pests, and diseases, wide range of pesticide and fungicide choices and their legal dosage), non-negligible uncertainties still exist in our current bottom-up estimates based on farmer surveys. More accurate estimation requires implementation of top-down methods and data based on enterprise-level surveys.

Key Words: crops; pesticides; fungicides; GHGs; carbon emission

随着人类对全球气候变化的不断关注和温室气体排放控制的需要,关于化石燃料燃烧和土地利用变化的直接温室气体排放已经开展了大量研究,但对于人类生产和生活直接消费的产品在生产过程中的温室气体排放还研究较少,不利于人们认识从社会生产和消费过程中减少温室气体排放的意愿和责任。农业作为第一产业,其生产规模和能量密集产品的使用量也随着人口和技术水平的发展而增加,牵涉了极为广泛的能量消耗及其温室气体排放。

Lal^[1]回顾了美国八九十年代对各种农业活动的温室气体排放量的大量研究,总结认为高能耗的化工产品(主要是化肥和农药)的制造、包装和存储过程是农业活动中最重要的间接温室气体源(农业机械的使用是最重要的直接温室气体源;传统耕作系统中,直接源和间接源总体大小相当;而在限制机械使用的保护性耕作系统中,间接源更大)。考虑到我国机械化程度远低于美国,直接温室气体源的重要程度要相应降低,那么化肥和农药的施用作为最重要的间接源更加不容忽视。有国内学者呼吁,今后的农产品生命周期研究应重点针对我国主要化肥和农药生产的资源消耗和环境影响而展开^[2]。

随着人口对农产品需求增加、劳动力成本提高而农药成本降低、病虫耐药性的提高^[3],全球变暖及耕作方式改变导致农作物病虫害发生频率和程度的持续加剧^[4]等多方面因素,我国农药的生产和使用越来越多。据中国农业年鉴和中国统计年鉴,上世纪80年代以来我国农作物总播种面积变化不大,但病虫害年平均发生次数却从1980年的0.92次增至2010年的2.29次,防治次数从0.80次攀升至2.77次;2010年全国农药的施用量达175.0万t,产量则是1985年的11倍。早在2005年,我国已成为世界第一大农药生产和使用国^[5],而

由于成本和效果的优势,在今后很长的一段时间内,化学农药仍是难以替代的重要保产农资^[6],其相应的温室气体排放量也将继续保有上升势头。

目前,在农业活动温室气体利用生命周期评价法(Life Cycle Assessment, LCA)进行的清单研究中,国内研究者常常忽略不同作物、病虫害和农药类型的差别,使用单一的、完全国外的农药排放系数^[7-9],抹平了不同作物、不同国别之间的差异,且小样点的用量数据也难以体现全国总体情况。

结合上述背景,本文基于我国近几年主要农作物全国范围的病虫害发生次数、农药施用种类和使用量,结合国内外有关各种农药生产的温室气体排放参数,估算了我国不同农作物生产中针对不同病虫害施用农药的温室气体排放量各自和整体的现状。(注:“温室气体”只涉及化石燃料相关的 CO₂、CH₄ 和 N₂O,最后单位全部转化为碳当量(Carbon Equivalent,本文中统一写作 CE);由于缺乏近年全国草害的防治面积数据,下文中所指“农药”只包括杀虫剂和杀菌剂,不包括除草剂)

1 研究方法

对于一定区域内的某作物(“区域”在本文情境中实指“全国”,后同),防治某一种病虫害 *i* 的农药施用温室气体排放量 CP_i 通过公式(1-a)计算,该作物防治所有病虫害的农药施用总温室气体排放量 CP 通过公式(1-b)计算,该作物每公顷的农药防治温室气体排放量 HCP 通过公式(1-c)计算:

$$CP_i = M_i \times AI_i \times CAI_i \quad (1-a)$$

$$CP = M \times (AI \times CAI) = M \times \left(\sum CP_i \div \sum M_i \right) \quad (1-b)$$

$$HCP = CP \div G \quad (1-c)$$

上面公式中,*i* 是不同的病虫害类型; CP_i 是该区域内防治该作物的某一种病虫害 *i* 的农药施用温室气体排放量(kg CE),计算结果见表 2; M_i 是该作物对病虫害 *i* 的防治面次(hm²次),数据来源见 2.2,取值见表 2; AI_i 是防治病虫害 *i* 的单位面次农药有效成分用量(kg ai hm⁻²次⁻¹,注:ai 为“active ingredient”即“有效成分”的通用缩写),数据来源见 2.3,取值见表 1; CAI_i 是防治病虫害 *i* 所用的农药的温室气体排放系数(kg CE kg ai⁻¹),计算方法见公式(2),取值见表 1。 CP 是该区域内该作物防治所有病虫害的农药施用总温室气体排放量(kg CE); M 是该区域内该作物所有病虫害的总防治面次(hm²次),由于 M_i 的数据来源中只给出了主要的几种病虫害类型,所以 $M > \sum M_i$; $(AI \times CAI) = \sum CP_i \div \sum M_i$,表示该作物单位面次的加权平均农药施用温室气体排放量(kg CE hm⁻²次⁻¹)。 HCP 是每公顷该作物的农药防治总温室气体排放量(防治所有病虫害),单位 kg CE hm⁻²,计算结果见表 3; G 是播种面积(hm²),取值见表 3。

各种农药的温室气体排放系数 CAI 根据公式(2)计算:

$$CAI = (E_p + E_{FPT}) \times 0.140 \times \frac{12}{44} \quad (2)$$

其中, E_p 是单位有效成分生产能耗(MJ kg ai⁻¹),取值见 2.1; E_{FPT} 是单位有效成分的(粉剂/乳剂/颗粒)成型、包装和运输能耗(MJ kg ai⁻¹),取值为 20MJ kg ai⁻¹^[10](考虑到我国主要是人工施药,和国外大规模使用器械甚至飞机来做喷雾的情况不同,因此本文的结果不包括施药环节的温室气体排放量);0.140 是能耗与 CO₂ 当量(CO₂ equivalent, CO₂e)的转换系数(单位 kg CO₂e MJ⁻¹),取值自 2011 年化学原料及化学制品制造业的终端能源消费量^[11]中前 73.6% 的 5 种最主要能源的加权温室气体排放因子(5 种终端能源消费量为:原煤 7745.85 万吨标准煤、电力 4336.31 万吨标准煤、石脑油 3351.54 万吨标准煤、热力 2357.88 万吨标准煤、天然气 2315.00 万吨标准煤;根据中国能源统计年鉴 2012,1 吨标准煤 = 29271MJ;加权量为国内全生命周期终端能源温室气体排放因子^[12]:原煤 100.5g CO₂e MJ⁻¹、天然气 72.73g CO₂e MJ⁻¹、汽油 98.86 g CO₂e MJ⁻¹、电力 297.7 g CO₂e MJ⁻¹,热力用原煤的因子,石脑油用汽油的因子);12/44 是 CO₂e 与 CE 的转换系数(kg CE kg CO₂e⁻¹)。

2 数据来源

2.1 单位农药有效成分的生产能耗 E_p

早期农药是以天然矿物或植物为原料加工而成的(如硫磺、砷酸铅、硫酸铜等),但现代农药则是典型的石油化工产品,其合成基础是各种来源于化石燃料所制成的原料(乙烯、丙烯、甲烷等)的中间体,因此化石燃料既是农药合成的原料也是燃料^[10]。由于企业级的农药生产过程数据常被视为商业机密,已有的关于农药生产能耗的文章^[1, 13-15]大多都可追溯回 1987 年 Maurice B. Green 的一项研究结果^[10],他是根据当时已失效的专利中的制造方法来计算的。

本文以下农药的单位有效成分生产能耗(E_p)取自 Green:克百威 454、马拉硫磷 228.8、甲拌磷 209、福美铁 81(取值同福美双)、代森锰锌 260、多菌灵 390、霜脲氰 422、氟啶胺 574、啉菌酯 595、戊唑醇 531、高效氯氟菊酯 509、毒死蜱 304、氯氟菊酯 600(MJ kg ai⁻¹)^[10]。

但 Green 当时计算过的很多农药品种现在已经很少使用了,现在常用的很多品种却没有包括在内,因此如何估算现在常用农药的能耗成为了一个难题。相比利用分子量或化学结构或反应步数为变量来预测制造能耗,Audsley^[15]发现,以农药发明年份为变量,对制造能耗做回归的拟合效果最佳(认为随着科技的进步,同样是基于来自石油、煤或天然气的乙烯、丙烯和甲烷,后发明的农药生产工艺更复杂,因此制造能耗更高)。因此前述未提及的农药的单位有效成分生产能耗(E_p)按照 Audsley 的回归方程^[15],即公式(3)计算:

$$E_p = 10.8 \times (Y - 1900) - 399 \quad (3)$$

式中, Y 是农药有效成分的发明年份:敌敌畏 1954、乙蒜素 1958、乙酰甲胺磷 1964、辛硫磷 1965、异丙威 1967、稻瘟灵 1968、三唑磷 1970、三唑酮 1973、杀虫单 1975、三环唑 1975、氰戊菊酯 1976、甲基异柳磷 1977、噻嗪酮 1977、四螨嗪 1979、烯唑醇 1980、高效氯氟菊酯 1988^[16];井冈霉素 1973^[17];倍硫磷 1957、代森铵 1960、氧乐果 1965、丙环唑 1979、己唑醇 1980^[18];吡虫啉 1985、噻虫嗪 1991^[19];水胺硫磷 1951、噁唑菌酮 1989^[20];辛菌胺醋酸盐 1989、三氯异氰尿酸 1950^[21];氟啶虫酰胺 2010^[22];五氯硝基苯 1939、代森锌 1944、三氯杀螨醇 1956、代森联 1958、炔螨特 1963、丙森锌 1965、萎锈灵 1965、灭多威 1967、异稻瘟净 1967、甲基硫菌灵 1969、甲氟菊酯 1971、丙溴磷 1975、三乙膦酸铝 1977、溴氰菊酯 1974、苯醚甲环唑 1982、联苯菊酯 1984、阿维菌素 1985、啶螨灵 1990、氟啶虫酰胺 1994、吡唑醚菌酯 1994 和啉虫脒 1995 则查自 British Crop Production Council(BCPC) 2009 年更新的《The Pesticide Manual(第十五版)》(即 e-Pesticide Manual Version 5.0)。

2.2 全国各作物不同病虫害类型的防治面次 M_i

由于各作物病虫害最近几年的详细防治面次缺乏公开数据,故使用全国农技中心 2007—2011 年的病虫害测报^[23-27]中对应病虫害的“预计发生面次”代替(将预计发生面次看做实际防治面次的近似值),表 1、2、3 中作物病虫害类型的选取均来自于此。小麦和水稻的防治面次取值为 2007—2011 五年间的预计发生面次均值,缺少 5 年跨度数据的玉米、马铃薯、油菜和棉花取 2009—2011 三年间的预计发生面次均值,具体取值见表 2。

2.3 各作物不同病虫害类型的有效成分用量 AI_i

如无特殊说明,则各种病虫害的化学农药及其有效成分用量(AI_i)均取值自中国农业部农药检定所主办的“中国农药信息网”,该网站提供了全国所有的农药登记信息:(1)通过“作物/防治对象查询”(http://www.chinapesticide.gov.cn/service/asp/B4.aspx)得到防治某种作物某一病虫害全国所有的农药商品的登记条目;(2)用 excel 软件统计各化学农药有效成分的出现频次(不包括极少数生物农药,如苏云金杆菌),据此选出最普遍的一种或几种有效成分(累计出现频次占总频次 2/3 即 66.7% 以上的前一种或前几种有效成分);(3)再在同一网站查看不同厂家对同一有效成分给出的用量取值表(如果登记条目太多,则抽选 20 条左右),获得该有效成分合法用量全国范围内的最大和最小值(以上过程以 2014 年 1—2 月的搜索结果为准)。如果某病虫害类型在农药信息网中没有登记结果,则使用药剂和剂量参考该作物病虫害的相关文献(见表 1 脚注)。

施药方式为稀释药液拌种时, $AI_i = \text{种子重量} \div 10 \div \text{稀释倍数}$; 若按药种比拌种, $AI_i = \text{种子重量} \div \text{药种比} \times \text{有效成分含量}(\%)$ 。种子重量按小麦种子 105 kg/hm²、玉米种子 45 kg/hm²、马铃薯种薯 1800 kg/hm²、棉花种子 30 kg/hm²计。施药方式为按稀释倍数喷雾时, 棉花玉米每公顷药液量按 750 kg 计(3 桶水), 小麦每公顷药液量按 450 kg 计(2 桶水), $AI_i = \text{药液量} \div \text{稀释倍数}$ 。

3 结果分析

表 1 给出了我国 6 种主要农作物(小麦、水稻、玉米、马铃薯、油菜和棉花)的病虫害种类、防治所用的主要农药有效成分类型和单位面积农药的使用温室气体排放量(具体用量因篇幅关系略去)。表 1 表明, 由于作物通常会受到多种病虫害的危害, 因此所需的农药有效成分种类很多(例如小麦病虫害常见的农药有效成分类型就有 19 种, 水稻有 17 种); 另外, (在统计过程中发现)即便是同一种有效成分, 其用药剂量也差异很大: 针对同一作物的同一种有效成分, 使用方法不同带来的用量差异很大(例如针对小麦纹枯病的同一个厂家出品的多菌灵·三唑酮可湿性粉剂粉剂, 有拌种或喷雾两种方式, 用量相差 5—6 倍); 而即便目标作物、目标病虫害类型、有效成分、剂型和使用方法都相同, 合法的产品用量通常也是一个范围而非单一值, 且不同厂家的产品之间还经常会有范围不一致的情况出现(比如同样是针对小麦蚜虫的 40% 氧乐果乳油, 就有单位面积用量为 81—162、135—162、300—450g/hm² 的 3 种产品)。因此, 病虫害防治所产生的温室气体排放量从理论上(即不考虑农民实际操作的用量差异)就具有很大的异质性和不确定性。

表 1 全国主要农作物病虫害防治的化学农药有效成分及单位面积温室气体排放量*

Table 1 China's currently major crop diseases and pests, relevant active ingredient usage in chemical treatment, and carbon emission*			
作物 Crop	病虫害类型 Crop pest/disease	最普遍使用的有效成分(ai)类型 Most Common Pesticide Active Ingredient for Different Crop Pest/Disease	单位面积防治温室气体排放量 Carbon Emission from Corresponding Treatment per ha $AI_i \times CAI_i$ (kg CE hm ⁻² 次 ⁻¹)
小麦	小麦蚜虫	吡虫啉、敌敌畏、氧乐果、氟戊菊酯·马拉硫磷、啶虫脒	2.19 (0.25—6.24)
Wheat	小麦吸浆虫	甲基异柳磷、倍硫磷	7.92 (3.39—12.96)
	小麦红蜘蛛	三唑酮·氧乐果、联苯菊酯	3.10 (0.36—5.97)
	小麦地下害虫	甲基异柳磷·三唑酮、甲拌磷·多菌灵	3.18 (0.18—7.21)
	小麦条锈病	丙环唑、三唑酮、烯唑醇	2.66 (1.04—4.22)
	小麦白粉病	三唑酮、多菌灵·三唑酮、丙环唑、福美双	4.57 (1.03—13.11)
	小麦赤霉病	多菌灵、甲基硫菌灵、多菌灵·三唑酮、福美双	9.34 (2.31—17.62)
	小麦纹枯病	戊唑醇、多菌灵·三唑酮、丙环唑、苯醚甲环唑、井冈霉素	1.95 (0.04—9.25)
水稻	稻飞虱、黑条矮缩病、玉米粗缩病 ^a	吡虫啉、噻嗪酮、异丙威、毒死蜱	4.30 (0.19—10.69)
Rice	稻纵卷叶螟	毒死蜱、吡虫啉·杀虫单、阿维菌素、辛硫磷·三唑磷	5.51 (0.08—12.30)
	水稻二化螟	三唑磷、吡虫啉·杀虫单、毒死蜱、阿维菌素、辛硫磷·三唑磷	5.75 (0.09—12.99)
	水稻三化螟	三唑磷、吡虫啉·杀虫单、毒死蜱	7.31 (2.59—12.29)
	稻瘟病	三环唑、多菌灵、稻瘟灵、异稻瘟净、甲基硫菌灵	12.01 (3.70—23.48)
	水稻纹枯病	井冈霉素、多菌灵、苯醚甲环唑·丙环唑、甲基硫菌灵、己唑醇	9.57 (0.82—29.99)
	水稻条纹叶枯病 ^b	吡虫啉	6.17
玉米	玉米螟	辛硫磷、乙酰甲胺磷	7.02 (1.39—12.87)
Maize	玉米叶螨 ^c	四螨嗪(螨死净)、三氯杀螨醇	6.63 (6.47—6.79)
	玉米蚜虫	福美双·克百威、吡虫啉	3.13 (2.20—4.63)
	玉米蓟马	福美双·克百威	2.47
	玉米黏虫	乙酰甲胺磷、福美双·克百威	7.31 (2.47—17.88)
	玉米地下害虫	福美双·克百威、戊唑醇·克百威、甲基异柳磷	1.15 (0.08—2.54)
	玉米大小斑病	代森铵、丙环唑·啞菌酯	4.87 (2.97—6.93)
	玉米丝黑穗病	戊唑醇、三唑酮、萎锈灵·福美双	0.40 (0.06—0.72)

续表

作物 Crop	病虫害类型 Crop pest/disease	最普遍使用的有效成分(ai)类型 MostCommon Pesticide Active Ingredient for Different Crop Pest/Disease	单位面积防治温室气体排放量 Carbon Emission from Corresponding Treatment per ha $AI_i \times CAI_i$ (kg CE hm^{-2} 次 $^{-1}$)
	玉米褐斑病 ^d	戊唑醇	4.07
	玉米纹枯病 ^e 和锈病 ^f	井冈霉素、甲基硫菌灵(甲基托布津)、三唑酮	6.85(1.17—14.68)
马铃薯	马铃薯晚疫病	代森锰锌、代森锌、噁唑菌酮·霜脲氰、氟啶胺、啉菌酯、吡唑醚菌酯·代森联	6.01(1.32—23.09)
Potato	马铃薯早疫病	代森锌、吡唑醚菌酯·代森联、丙森锌、噁唑菌酮·霜脲氰	9.25(3.53—25.90)
	马铃薯蚜虫、病毒病 ^g	噻虫嗪、高效氯氟氰菊酯、氟啶虫酰胺	2.97(0.09—11.62)
	地下害虫(蛴螬)	吡虫啉	10.00(8.89—11.11)
	马铃薯二十八星瓢虫	高效氯氟菊酯	0.46(0.28—0.63)
油菜	油菜菌核病	多菌灵	18.79(14.09—23.48)
Oilseed	油菜霜霉病	乙蒜素	1.30(1.18—1.42)
Rape	油菜蚜虫	溴氰菊酯、噻虫嗪	0.31(0.06—0.69)
棉花	棉铃虫	辛硫磷、高效氯氟菊酯、氯氟菊酯、毒死蜱、氰戊菊酯、丙溴磷、灭多威	4.75(0.31—15.43)
Cotton	棉蚜	高效氯氟菊酯、氯氟菊酯、辛硫磷·灭多威、氰戊菊酯·氧乐果	1.34(0.31—2.35)
	棉盲蝽	马拉硫磷	5.34(3.56—7.12)
	棉花红蜘蛛(叶螨)	阿维菌素、水胺硫磷、哒螨灵、炔螨特、甲氧菊酯、三氯杀螨醇	2.20(0.15—5.90)
	棉花烟粉虱	氟啶虫胺腈、啉虫脒·高效氯氟氰菊酯	1.63(0.47—3.09)
	棉花黄、枯萎病	乙蒜素、辛菌胺醋酸盐、三氯异氰尿酸、甲基硫菌灵	1.68(0.25—3.40)
	棉花苗期病害	多菌灵、福美双·福美锌	1.28(0.46—2.35)
	棉花铃期病害 (疫病、炭疽病、红腐病)	三乙膦酸铝、多菌灵·福美双、多菌灵·五氯硝基苯·克百威	13.65(0.82—48.73)

*. 每一行的有效成分对于该病虫害来说都是一种选择,是可以单独使用的(即防治单位面积的小麦蚜虫既可以只用吡虫啉 12—37.5g,也可以只用敌敌畏 600—800g);某些行内有两种以上的有效成分,且用“·”相连,是因为这其中的一种或几种有效成分只有混配形式(没有单一成分的登记条目),混合制剂的用量是这几种有效成分之和(如氰戊菊酯·马拉硫磷的混合制剂 60—120g)。“单位面积温室气体排放量”的上下限是同一种病虫害(表中列出的)所有选择的上下限,它的均值则是各项选择中值的算数均值。

a. 水稻黑条矮缩病和玉米粗缩病均为稻飞虱引发^[28-30],故施药同稻飞虱; b. 水稻条纹叶枯病的防治方法及有效成分用量参考自^[31]; c. 玉米叶螨的防治方法及有效成分用量参考自^[32]; d. 玉米褐斑病的防治方法及有效成分用量参考自^[33]; e. 玉米纹枯病的防治方法及有效成分用量参考自^[34]; f. 玉米锈病的防治方法及有效成分用量参考自^[35]; g. 马铃薯病毒病主要由蚜虫传播^[36],故施药同马铃薯蚜虫。

由表 2 可知,我国小麦、水稻、玉米、马铃薯、油菜和棉花的年平均病虫害发生面积分别为 6427、9447、6300、553、822、2589 万 hm^2 次,防治时使用农药所产生的总温室气体排放量分别为 220.8(44.7 — 558.4)、606.7(60.0 — 1505.1)、336.4(112.0 — 606.3)、30.9(11.2 — 96.0)、79.5(59.4 — 99.8)、96.4(25.2 — 242.2) Gg CE,六种合计总温室气体排放量为 1.37(0.31—3.13) Tg CE。其中,水稻、玉米和小麦是主要排放源,三者共占总体的 84.9%。不同作物的虫害和病害对总温室气体排放量的贡献不同(为讨论方便,只比较其均值):小麦病虫害防治的最主要排放源是蚜虫和白粉病,小麦虫害防治温室气体排放量占小麦病虫害总体防治温室气体排放量的 49.1%;水稻主要的农药温室气体排放源是对纹枯病、稻飞虱、稻纵卷叶螟、二化螟和稻瘟病的防治,水稻虫害防治温室气体排放量占水稻病虫害总体的 58.6%;玉米病虫害的最主要排放源是玉米螟,其贡献远高于其它玉米病虫害类型,玉米虫害防治温室气体排放量占玉米病虫害总体的 81.5%。另外三种农作物中,马铃薯病虫害防治的温室气体排放最小,最主要排放源是对晚疫病的防治,病害防治温室气体排放量占总体的 73.0%;油菜病虫害防治的最主要温室气体排放源是菌核病,油菜病害防治的温室气体排放量占总体的 98.9%;棉花病虫害防治的温室气体排放量主要来自于棉铃虫、棉盲蝽和铃期病害,虫害防治农药排放占总体的 77.5%。

表 2 全国主要粮油棉作物的病虫害防治温室气体排放现状

Table 2 Current carbon emission from China's major crop diseases and pests treatment

作物 Crop	病虫害类型 Crop Pest/Disease	防治面积 Treatment Area-time $M_i/(10^4 \text{ hm}^2 \text{ 次})$	总温室气体排放量 Total Carbon Emission $CP_i/(Gg \text{ CE})$
小麦	小麦蚜虫	1541	33.7(3.8—96.1)
Wheat	小麦吸浆虫	251	19.9(8.5—32.5)
	小麦红蜘蛛	640	19.8(2.3—38.2)
	小麦地下害虫	120	3.8(0.2—8.7)
	小麦条锈病	301	8.0(3.1—12.7)
	小麦白粉病	719	32.9(7.4—94.3)
	小麦赤霉病	265	24.8(6.1—46.7)
	小麦纹枯病	740	14.4(0.3—68.5)
	小麦病虫害总体(CP)	6427	220.8(44.7—558.4)
水稻	稻飞虱	2785	119.7(5.2—297.7)
Rice	稻纵卷叶螟	2231	122.8(1.9—274.3)
	水稻二化螟	1546	88.9(1.9—200.8)
	水稻三化螟	317	23.1(8.2—38.9)
	稻瘟病	555	66.6(20.5—130.2)
	水稻纹枯病	1824	174.5(15.0—574.0)
	水稻条纹叶枯病	123	7.6
	水稻黑条矮缩病	40	1.7(0.1—4.3)
	水稻病虫害总体(CP)	9447	606.7(60.0—1505.1)
玉米	玉米螟	2000	140.5(27.7—257.5)
Maize	玉米棉铃虫	393	18.7(1.2—60.7)
	玉米薹马	113	2.8
	玉米蚜虫	255	8.0(5.6—11.8)
	玉米叶螨	220	6.63(6.47—6.79)
	玉米地下害虫	364	4.2(0.3—9.3)
	玉米黏虫	220	16.1(5.4—39.3)
	玉米大、小斑病	580	28.2(17.3—39.3)
	玉米丝黑穗病	189	0.8(0.1—1.4)
	玉米褐斑病	193	7.9
	玉米粗缩病	102	4.4(0.2—10.9)
	玉米纹枯病和锈病	78	5.3(0.9—11.4)
	玉米病虫害总体(CP)	6300	336.4(112.0—606.3)
马铃薯	马铃薯晚疫病	209	12.6(2.8—48.2)
Potato	马铃薯早疫病	48	4.4(1.7—12.3)
	马铃薯病毒病	38	1.1(0.05—4.4)
	马铃薯蚜虫	53	1.6(0.05—6.2)
	马铃薯地下害虫	49	4.9(4.3—5.4)
	马铃薯二十八星瓢虫	47	0.2(0.1—0.3)
	马铃薯病虫害总体(CP)	553	30.9(11.2—96.0)
油菜	油菜菌核病	345	64.7(48.5—80.9)
Oilseed Rape	油菜霜霉病	120	1.6(1.4—1.7)
	油菜蚜虫	229	0.7(0.1—1.6)
	油菜病虫害总体(CP)	822	79.5(59.4—99.8)
棉花	棉铃虫	658	31.2(2.1—101.5)
Cotton	棉蚜	478	6.4(1.5—11.2)

续表

作物 Crop	病虫害类型 Crop Pest/Disease	防治面积 Treatment Area-time $M_i/(10^4 \text{ hm}^2 \text{ 次})$	总温室气体排放量 Total Carbon Emission $CP_i/(\text{ Gg CE})$
	棉盲蝽	515	27.5(18.4—36.7)
	棉花叶螨	344	7.6(0.5—20.3)
	棉花烟粉虱	100	1.6(0.5—3.1)
	棉花黄、枯萎病	211	3.5(0.5—7.2)
	棉花苗期病害	151	1.9(0.7—3.6)
	棉花铃期病害	118	16.1(1.0—57.4)
	棉花病虫害总体(CP)	2589	96.4(25.2—242.2)

由表 3 可知,不同作物病虫害防治的农药温室气体排放情况差异很大(全国平均值)。水稻和棉花的每公顷防治次数则为 3.2 和 5.2 次,每公顷的防治总温室气体排放量最高,达到 20.54 和 19.51 kg CE hm^{-2} ;玉米、油菜及小麦的每公顷防治次数和农药施用温室气体排放则次之,马铃薯最低。将作物产出(单位面积产量)加入考虑,则差距更大:六种作物各自每吨产量所消耗的农药所产生的温室气体排放量分别是 1.94、3.13、1.89、1.91、5.93 和 15.29 kg CE t^{-1} ,水稻仍是粮食作物中单产农药温室气体排放量最高的,是马铃薯(最低值)的 1.6 倍,而属于经济作物的油菜和棉花的单位产量农药温室气体排放量均远高于粮食作物,棉花的单产农药温室气体排放量更是水稻的 4.9 倍。

表 3 全国主要农作物的每公顷病虫害防治现状

Table 3 Current carbon emission per hectare from China's major crop diseases and pests treatment

现状小结 Summary	小麦 Wheat	水稻 Rice	玉米 Maize	马铃薯 Potato	油菜 Rape	棉花 Cotton
播种面积 ^a /(万/ hm^2) Crop Sown Area	2403.3	2954.3	3240.9	523.5	733.3	494.3
每公顷产量 ^b /(t/hm^2) Yield per hectare	4.74	6.56	5.49	3.09	1.83	1.28
平均防治次数 ^c /次 Average Treatment Frequency	2.67	3.20	1.94	1.06	1.12	5.24
每公顷单次防治温室气体排放量 $AI \times CAI/(\text{ kg CE } \text{hm}^{-2} \text{ 次}^{-1})$ Carbon Emission for one-time treatment per hectare	3.44 (0.70—8.69)	6.42 (0.63—15.93)	5.34 (1.78—9.94)	5.59 (2.03—17.35)	9.66 (7.23—12.14)	3.72 (0.98—9.36)
每公顷防治总温室气体排放量 $HCP/(\text{ kg CE}/\text{hm}^2)$ Carbon Emission for all treatment per hectare	9.19 (1.86—23.24)	20.54 (2.03—50.95)	10.38 (3.45—19.32)	5.91 (2.15—18.34)	10.84 (8.10—13.62)	19.51 (5.11—49.01)
单位产量防治温室气体排放量 ^d / ($\text{ kg CE } \text{t}^{-1}$) Carbon Emission for All Treatment per kg-yield	1.94 (0.39—4.90)	3.13 (0.31—7.76)	1.89 (0.63—3.52)	1.91 (0.69—5.93)	5.93 (4.44—7.46)	15.29 (4.00—38.41)

a. 播种面积取与防治面积同样年份的平均值,每年的播种面积来自相应年份的中国农业年鉴。

b. 小麦和水稻每公顷产量取 2007—2011 年的 5 年平均值、玉米、马铃薯、油菜和棉花每公顷产量均取 2009—2011 年的 3 年平均值(但 2011 年的马铃薯的单产值与总产量和播种面积之商不符,故马铃薯单产取值为总产与播种面积之商),每年的单产、总产和播种面积数据均查询自国家统计局的公开数据库(<http://data.stats.gov.cn/>)。

c. 平均防治次数 = 该作物所有病虫害的总防治面积 ÷ 该作物播种面积。

d. 单位产量农作物防治温室气体排放量 = 每公顷防治总温室气体排放量 ÷ 每公顷产量。

4 讨论与结论

4.1 讨论

各种差异的来源:(1)就各作物的全国农药温室气体排放总量而言,水稻、小麦、玉米这三大主粮最高,这

是由其播种面积的绝对优势所决定的(三种作物播种面积均在 2400 万公顷以上,合计占了全国所有农作物播种总面积的一半还多)。(2)就每公顷的农药温室气体排放量而言,水稻和棉花最高(20.54 和 19.51 kg CE hm^{-2}),且远高于油菜、玉米、小麦和马铃薯(10.84、10.38、9.19 和 5.91 kg CE hm^{-2}),这符合水稻和棉花本身病虫害多发、防治次数最多的基本情况。(3)就每 kg 产品的农药温室气体排放量而言,棉花最高(15.29 kg CE hm^{-2}),且远高于包括单产同样很低的油菜在内的其余 5 种作物,因为棉花不仅单产最低、而且病虫害防治次数最高,导致其单位产品的碳代价最高。(4)病害和虫害防治的温室气体贡献大小各有侧重,这不仅与作物本身的病虫害发生特点有关,也与其主流用药类型有关:玉米和棉花是虫害贡献大(主要是发生面积最大的玉米螟、棉铃虫和棉盲蝻),小麦和水稻的病害和虫害贡献大致相当(主要是小麦蚜虫、小麦吸浆虫、小麦红蜘蛛、小麦白粉病、小麦赤霉病、稻飞虱、稻纵卷叶螟、水稻二化螟、稻瘟病和水稻纹枯病),马铃薯和油菜则以防治病害的农药温室气体排放为主(主要是马铃薯晚疫病和油菜菌核病,其中油菜菌核病的贡献特别突出,这是因为多菌灵的用药量通常很高)。对大部分病虫害而言,由于农药种类的可选择余地相当大,不同农药也有巨大的用量和制造排放量差异,因此农药的选择会带来相当的减排空间。从控制农药温室气体排放的角度,应该主要从种植面积大和病虫害多的作物(如水稻和棉花)着手,鼓励淘汰防治效率不高、使用量大的老药(如多菌灵),使用补贴等方式鼓励使用众多同类替代品中更高效、使用量更低的新型农药。另外,即使不考虑稻田甲烷排放,水稻也仍然是单位面积碳代价最高的作物,对于以稻米为主食的亚洲人来说,鼓励节约粮食也有减少温室气体排放的积极意义。

计算中还存在的 uncertainty 包括:(1)公式(2)中的单位有效成分的温室气体排放量转换系数(0.140 kgCO₂e MJ^{-1})是整个化学制品行业的平均值,虽然较能反映中国化学制品企业的能源消费结构,但未必和农药生产企业完全相同。而用来计算农药有效成分生产能耗(E_p)的公式(3)是一个经验回归公式,虽然这是根据 Green 的精确能耗数据所能得出的最明显趋势,但显然并不能精准到完全代替工厂的实测数据。那么使用公式(1)估算的中国的单位农药有效成分温室气体排放量(CAI)会与实际情况有出入。(2)由于防治方法和用量的地区性差异、及可能存在的操作不规范,各地实际使用的农药种类和用量的上下限有可能会超出本文的估计范围,且各地的每公顷作物防治温室气体排放量均值可能会与本文估算的全国均值有出入。要解决以上不确定性,首先要对我国典型农药生产企业的生产工艺能耗(E_p)做实际调查,以提高对各种农药的温室气体排放系数(CAI)的估算精度。其次是提高对农药用量的估算精度,目前自下而上的农户级调查从根本上无法克服农药用量本身的不确定性和区域异质性,更好的办法是通过自上而下的企业级调查,获得各种农药的总销售量及其用于各种作物的去向比例数据(一种农药常常有很多种去向,只有总量也无法得知其分散到各个作物上的用量),最后汇总成作物所使用的各种农药总量。

另外,本文因为缺乏草害面次数据而没有包括除草剂的贡献,但除草剂的总体发明年份较杀虫剂和杀菌剂更晚,虽然施用次数不如杀虫杀菌剂多但通常单次使用量较大,导致每公顷温室气体排放量也相当可观:例如按本文同种方法计算的玉米除草剂的每公顷温室气体排放量达 17.43(0.92—49.19)kg CE hm^{-2} ,均值和上限均超过玉米每公顷杀虫和杀菌剂的温室气体排放量之和。且随着转基因作物的推广使用,除草剂的市场份额也在不断扩大^[3],因此本文计算的各作物每公顷农药施用温室气体排放量和全国农药温室气体排放总量仍是低估。

4.2 结论

由于防治一种病虫害往往有多达十余种的农药可供选择,而即便是同一种农药,使用量也可相差数倍之多,另外不同的农药品种又有不同的制造方法和能耗…因此,即使是防治同一种作物的同一种病虫害,单位面积的农药温室气体排放量也是大不相同的,甚至可以相差数百倍(详见表 1)。而对于同一种作物而言,防治病害和虫害的温室气体贡献偏重也不同,例如玉米和棉花更重虫害(玉米螟、棉铃虫和棉盲蝻),油菜和马铃薯更重病害(晚疫病、菌核病),小麦水稻则是多种病虫害皆重(小麦蚜虫、小麦吸浆虫、小麦红蜘蛛、小麦白粉病、小麦赤霉病、稻飞虱、稻纵卷叶螟、水稻二化螟、稻瘟病和水稻纹枯病)(详见表 2)。至于不同作物整体的

农药防治温室气体排放量,水稻和棉花的平均每公顷防治总温室气体排放量是小麦、玉米、油菜和马铃薯的 2 倍左右;如果考虑的不是平均值而是极限值,则差异更大(详见表 3)。

以上六种作物的病虫害防治温室气体排放量为 1.37(0.31—3.13) Tg CE,若将上述农作物的整体平均农药施用情况外推至其余农作物(按六种农作物播种面积总和 1.035 亿 hm^2 、全国农作物总播种面积 1.605 亿 hm^2 计),则我国目前农作物施用农药(不包括除草剂)的温室气体排放总量为 2.13(0.48—4.85) Tg CE a^{-1} (考虑到除草剂的贡献,以上数字均仍是低估)。

参考文献(References):

- [1] Lal R. Carbon emission from farm operations. *Environment International*, 2004, 30(7): 981-990.
- [2] 王明新,包永红,吴文良,刘文娜. 华北平原冬小麦生命周期环境影响评价. *农业环境科学学报*, 2006, 25(5): 1127-1132.
- [3] 束放,唐启义,邵振润,时嵩,程家安. 我国农药需求影响因子分析. *农药*, 2010, 49(4): 241-245.
- [4] 陈生斗,胡伯海. 中国植物保护五十年. 北京:中国农业出版社, 2003: 203-222.
- [5] 王韧. 我国农药工业现状及发展形势. *化工技术经济*, 2006, 24(5): 11-14.
- [6] 杨曙辉,宋天庆. 关于我国化学农药使用相关问题的理性思考. *农业科技管理*, 2007, 26(1): 42-45.
- [7] 李洁静,潘根兴,张旭辉,费庆华,李志鹏,周萍,郑聚锋,邱多生. 太湖地区长期施肥条件下水稻-油菜轮作生态系统净碳汇效应及收益评估. *应用生态学报*, 2009, 20(7): 1664-1671.
- [8] 张风太,邵技新,孙德亮. 基于农业投入的贵州农业碳排放研究. *广东农业科学*, 2012, 39(16): 221-223.
- [9] 史磊刚,范士超,孔凡磊,陈阜. 华北平原主要作物生产的碳效率研究初报. *作物学报*, 2011, 37(8): 1485-1490.
- [10] Green M B. Energy in pesticide manufacture, distribution and use // Helsel Z R, ed. *Energy in Plant Nutrition and Pest Control*. Amsterdam: Elsevier, 1987: 165-177.
- [11] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2012. 北京:中国统计出版社, 2012.
- [12] 欧训民. 中国车用能源技术路线全生命周期分析. 北京:清华大学出版社, 2011: 23-31.
- [13] Wang M, Saricks C L, Wu M. Fuel-Cycle Fossil Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Fuel Ethanol Produced from U.S. Midwest Maize. Illinois Department of Commerce and Community Affairs, Bureau of Energy and Recycling, 1997.
- [14] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 91(1/3): 217-232.
- [15] Audsley E, Stacey K F, Parsons D J, Williams A G. Estimation of the Greenhouse Gas Emissions from Agricultural Pesticide Manufacture and Use. Cranfield: Cranfield University, 2009.
- [16] 陈万义. 农药生产与合成. 北京:化学工业出版社, 2000.
- [17] 张穗,温广月. 井冈霉素研究进展与面临的挑战 // 农业生物灾害预防与控制研究. 北京:中国植物保护学会, 2005: 671-675.
- [18] 刘长令. 世界农药信息手册. 北京:化学工业出版社, 2000.
- [19] 程霞. 第二代新烟碱类杀虫剂噻虫嗪的开发. *世界农药*, 2001, 23(4): 17-25.
- [20] 刘长令. 世界农药大全: 杀菌剂卷. 北京:化学工业出版社, 2006.
- [21] 周学永. 三氯异氰尿酸的合成及应用开发. *化学工程师*, 2000, (2): 36-37.
- [22] 李良孔,袁善奎,严清平,崔晓岚,姜辉. 辛菌胺对 15 种植物病原菌的离体抗菌活性研究. *农药科学与管理*, 2010, 31(7): 32-34.
- [23] 张跃进,王建强,姜玉英,冯晓东,夏冰,刘宇,曾娟. 2007 年全国农作物重大病虫害发生趋势预测. *中国植保导刊*, 2007, 27(2): 32-35.
- [24] 张跃进,王建强,姜玉英,冯晓东,夏冰,刘宇,曾娟. 2008 年全国农作物重大病虫害发生趋势预测. *中国植保导刊*, 2008, 28(3): 38-40.
- [25] 张跃进,姜玉英,冯晓东,夏冰,曾娟,刘宇. 2009 年全国农作物重大病虫害发生趋势. *中国植保导刊*, 2009, 29(3): 33-36.
- [26] 全国农业技术推广服务中心病虫害测报处. 2010 年全国农作物重大病虫害发生趋势. *中国植保导刊*, 2010, 30(3): 32-35.
- [27] 全国农业技术推广服务中心病虫害测报处. 2011 年全国农作物重大病虫害发生趋势预报. *中国植保导刊*, 2011, 31(3): 28-32.
- [28] 王安乐,王娟娟,陈朝辉. 玉米粗缩病发生规律和综合防治技术研究. *玉米科学*, 2005, 13(4): 114-116.
- [29] 王华弟,祝增荣,陈剑平,汪恩国,李宝福. 水稻黑条矮缩病发生流行规律、监测预警与防控关键技术. *浙江农业学报*, 2007, 19(3): 141-146.
- [30] 何超,青先国. 湖南省南方水稻黑条矮缩病发生情况及防治对策. *杂交水稻*, 2012, 27(4): 1-4.
- [31] 吴雪芬,张国彪,林茂松,陈军. 水稻条纹叶枯病暴发原因及其防治对策研究. *中国农学通报*, 2005, 21(2): 237-245.
- [32] 何江,许建军,郭文超,吐尔逊,鲁素玲,杨新元. 玉米叶螨田间药效试验与示范. *新疆农业科学*, 2001, 38(2): 87-88.
- [33] 李俊虎,姜兴印,王燕,戈大庆,聂乐兴,吴淑华. 戊唑醇不同处理方式对夏玉米褐斑病空间分布及产量影响. *农药*, 2010, 49(7): 533-535.
- [34] 王朝海,周建华,王宗明,陆宁,兰光燮,聂宗平. 玉米纹枯病发生规律及防治技术. *山地农业生物学报*, 2000, 19(5): 349-354.
- [35] 刘章雄,王守才. 玉米锈病研究进展. *玉米科学*, 2003, 11(4): 76-79.
- [36] 肖雅,何长征,聂先舟,熊兴耀. 马铃薯病毒病防治策略. *中国马铃薯*, 2008, 22(2): 106-110.