

农业残留物燃烧温室气体排放清单研究：以江苏省为例

刘丽华, 蒋静艳*, 宗良纲

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要:通过问卷调查确定了江苏省农业残留物在不同时间阶段(1990~1995、1996~2000、2001~2005和2006~2008年)作为生活燃料和田间直接燃烧的比例,利用燃烧炉模拟秸秆燃烧试验确定了6种农业残留物(水稻、小麦、玉米、油菜、棉花和大豆)燃烧产生的CO₂、CO、CH₄和N₂O的排放因子;基于此,结合江苏省不同时间阶段的粮食产量、草谷比编制了该省不同时期秸秆燃烧温室气体排放清单。结果表明,不同农业残留物燃烧时的CO₂、CO、CH₄和N₂O排放因子不同,其中油菜秸秆具有较高的CO₂和CH₄排放因子,玉米秸秆具有较高的N₂O排放因子,而水稻秸秆的CO排放因子较高。江苏省农业残留物燃烧温室气体排放清单显示,水稻、小麦、玉米、油菜、棉花和大豆6种供试作物秸秆温室气体的年均全球增温潜势(global warming potential, GWP)分别为9.18、4.35、2.55、1.63、0.55和0.39 Tg CO₂当量。1990~1995年期间和2006~2008年期间农业残留物燃烧温室气体年均GWP变化不大。4个阶段中1996~2000年期间秸秆燃烧温室气体GWP最大,年均高达23.83 Tg CO₂当量,而2001~2005年期间的年均GWP最低,为20.30 Tg CO₂当量。

关键词:农业残留物;温室气体;作物秸秆燃烧;排放因子;排放清单

中图分类号:X511 **文献标识码:**A **文章编号:**0250-3301(2011)05-1242-07

Emission Inventory of Greenhouse Gases from Agricultural Residues Combustion: A Case Study of Jiangsu Province

LIU Li-hua, JIANG Jing-yan, ZONG Liang-gang

(College of Resources and Environmental Sciences, Agricultural University, Nanjing, 210095, China)

Abstract: Burning of agricultural crop residues was a major source greenhouse gases. In this study, the proportion of crop straws (rice, wheat, maize, oil rape, cotton and soja) in Jiangsu used as household fuel and direct open burning in different periods (1990-1995, 1996-2000, 2001-2005 and 2006-2008) was estimated through questionnaire. The emission factors of CO₂, CO, CH₄ and N₂O from the above six types of crop straws were calculated by the simulated burning experiment. Thus the emission inventory of greenhouse gases from crop straws burning was established according to above the burning percentages and emission factors, ratios of dry residues to production and crop productions of different periods in Jiangsu province. Results indicated that emission factors of CO₂, CO, CH₄ and N₂O depended on crop straw type. The emission factors of CO₂ and CH₄ were higher for oil rape straw than the other straws, while the maize and the rice straw had the higher N₂O and CO emission factor. Emission inventory of greenhouse gases from agricultural residues burning in Jiangsu province showed, the annual average global warming potential (GWP) of six tested crop straws were estimated to be 9.18 (rice straw), 4.35 (wheat straw), 2.55 (maize straw), 1.63 (oil rape straw), 0.55 (cotton straw) and 0.39 (soja straw) Tg CO₂ equivalent, respectively. Among the four study periods, the annual average GWP had no obvious difference between the 1990-1995 and 2006-2008 periods, while the maximal annual average GWP (23.83 Tg CO₂ equivalent) happened in the 1996-2000 period, and the minimum (20.30 Tg CO₂ equivalent) in 1996-2000 period.

Key words: agriculture residues; greenhouse gases; crop straw burning; emission factor; emission inventory

气候变暖是当今全球性的环境问题,其主要原因是大气中温室气体浓度的不断增加。在目前的认知水平下,二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)被认为是最主要的3种温室气体^[1],虽然目前CO没有明确的被定义为温室气体,但却是全球增温潜势的间接贡献者^[2]。除了工业活动和化石燃料燃烧释放温室气体外,农业残留物燃烧也是温室气体排放的重要来源之一^[3]。农业残留物主要是指秸秆即小麦、水稻、玉米、薯类、油料、棉花、甘蔗等农

作物在收获籽实后剩余的部分。随着世界人口的增多和社会经济的发展,秸秆从最初主要作为生活燃料和饲料到近年来直接在田间被燃烧或抛弃,农业残留物的使用功能也在逐渐改变。Simmonds等^[4]曾提出近年来大气中温室气体的增多或许应归因于大

收稿日期:2010-05-31;修订日期:2010-09-20

基金项目:国家自然科学基金项目(40975091)

作者简介:刘丽华(1985~),女,硕士研究生,主要研究方向为全球变化生物学, E-mail: sevenllh123@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: lilacjy@njau.edu.cn

量生物质燃烧.目前对农业残留物燃烧排放温室气体的估算主要取决于各国田间燃烧的农业残留物的比例,以及相关温室气体的排放因子^[5-11].但秸秆燃烧对温室气体的具体贡献受人口、经济、社会等诸多方面因素的影响,IPCC^[12]中关于秸秆燃烧温室气体排放量采用缺省值来计算,具有很大的不确定性.其他学者结合经济状况、地域和生产实践等方面对秸秆燃烧比例也进行了估算^[13-15],但真正进行实地调研的较少.对农残物燃烧产物的排放因子的研究也主要集中在常见的粮食作物(小麦、水稻和玉米)方面^[8-11,16-18]或直接采用 IPCC 缺省值来估算^[19].关于结合国内近年秸秆用途变化的各种农残物燃烧温室气体排放方面的系统性研究还鲜见报道.

鉴于此,本研究以江苏省为例,选择省内广泛种植的 6 种作物小麦、水稻、玉米、油菜、大豆和棉花秸秆为研究对象,分析其燃烧产生的温室气体排放因子,并结合问卷调查结果确定的各作物秸秆燃烧总比例(包括秸秆作家用燃料燃烧和田间直接燃烧),计算了近年来 6 种供试作物燃烧产生的温室气体排放总量,结果可为政府编制温室气体排放清单提供一定的数据支持,也可为合理评价农业方面减少温室气体排放的贡献提供依据.

1 材料与方 法

1.1 调查问卷的设计和发放

本研究以发放问卷的形式调查了江苏省不同时间阶段 6 种农作物秸秆(水稻、小麦、玉米、油菜、棉花和大豆)利用变化状况.中国气象局提供的 2001~2008 年间江苏省田间秸秆燃烧火点数据(未发表数据)表明 2001~2005 年期间,江苏省年均火点为 1 003 个(分辨率 30 m × 30 m).2006~2008 年,由于政府禁烧工作力度不断加大等原因,田间燃烧火点年均量减为 491 个.据此和江苏省统计年鉴中乡村能源使用情况和农民家庭基本情况等^[20],本研究将问卷时间跨度分为 4 个阶段,分别为 1990~1995、1996~2000、2001~2005 和 2006~2008 年.调查问卷的主要内容涉及被调查人务农时间长短和年龄;不同时期农户主要种植的夏秋季作物、种植面积、农户可接受的作物秸秆主要利用途径和使用比例;农户生活能源种类和使用量占家庭能源总量的比例;各个阶段中农户家庭人口、外出务工人员数目和年总收入等.

问卷发放对象为田间秸秆燃烧统计数据中火点 > 5 的燃烧(市)县中的农业镇.问卷发放范围涉及

江苏省 47(市)县 536 个农业镇(苏北 398 个,苏南、苏中 138 个农业镇),苏北每个农业镇平均发放问卷 2 份,苏南、苏中每个农业镇平均发放 1 份,总共发放问卷 674 份,回收问卷 674 份,有效问卷 622 份.调查问卷的部分实施借助江苏籍在校大学生暑假期间的社会实践来完成,部分由作者亲自带车前往调查.问卷发放前对要进行实地调查的人员集中培训,明确调查目的、被调查对象(本研究阶段内一直从事粮食种植的农户)和调查问卷中要重点收集的信息及各自调查区域等内容.问卷回收之后,进行有效问卷数据统计和农户的电话回访,以保证其真实可靠性.

1.2 温室气体排放因子的确定

本研究依据相关资料^[21,22]设计秸秆燃烧炉.燃烧炉主体呈圆柱形,炉身直径为 57 cm,高度为 80 cm.对应于问卷调查内容,选择水稻、小麦、玉米、油菜、棉花和大豆秸秆为供试作物,分别采集于江苏省苏北和南京周围.燃烧试验前供试秸秆 90℃ 烘干恒重.每次燃烧试验用量结合燃烧炉面积依据各供试秸秆单位面积产量确定,为 96~321 g 不等.秸秆点火后立即在烟囱出口处采集气体样品,同时测定样气流量和温度,记录明火燃烧和闷烧时间.烟气大约每 5 s 采样 1 次,气体样品中 CO₂、CH₄ 和 N₂O 由 Agilent 4890D 气相色谱分析仪测定,CO 由 Agilent 7890D 气相色谱分析仪测定.各种供试作物秸秆碳氮含量由 Flash-2000 Delta V ADVANTAGE 联用仪测定.每种秸秆燃烧 3 次重复.由下式计算各温室气体的排放因子^[6]:

$$EF_i = M_i / M_{\text{fuel}} \quad (1)$$

式中,EF_{*i*} 表示 *i* 气体的排放因(g/kg); M_{*i*} 表示燃烧产生 *i* 气体的总量(g); M_{fuel} 表示秸秆燃烧量(kg).

1.3 数据来源和处理方法

粮棉产量基础数据来自文献[20].利用 Microsoft Excel 2007 软件进行数据分析与统计,数据处理结果用算术均值和标准误表示测定结果的精密度.

2 结果与分析

2.1 燃烧比例变化统计

实地问卷调查结果表明,当前江苏省农户对农作物秸秆的处理方式主要有 2 种:①田间燃烧或者弃置;②进行相关的利用,如家用燃料、饲料、沤肥,直接还田等.具体统计结果见表 1.从表 1 中可以看

出,在不同研究阶段中,不同作物秸秆的使用情况变化较大. 1990~2000年期间,6种秸秆以作生活能源家用燃料为主,其中大豆秸秆家用燃料比例最高,高达90%左右. 2000~2005年期间,水稻、小麦和玉米秸秆田间燃烧占主体地位,其中小麦秸秆田间燃烧最为严重,燃烧率高达68%左右,可能与夏季江苏省农户为了赶农时,忙播种等因素有关^[23]. 2005年以后,水稻和小麦田间燃烧略有下降,但玉米和油菜秸秆田间燃烧比例却有上升. 其中玉米秸秆在2000~2008年期间田间燃烧比例平均达到了50%左右,在4个研究阶段中燃烧比例最大,可能和此时期玉米秸秆作为饲料使用量的减少、农村经济的发展

和当地无行之有效的综合利用途径有关. 另外,不同阶段棉花秸秆用作家用燃料和田间燃烧比例变化并不大,油菜则略有下降. 作为主要的田间燃烧农残物,水稻和小麦秸秆历年田间燃烧调查结果与卫星观测的火点数据变化趋势(未发表数据)基本一致,但却高于已有的报道田间燃烧比例为40%左右的结果^[11,17,24]. 本研究中问卷调查范围细化到了农业镇的水平,其估算结果则更为真实可靠. 进一步计算不同作物秸秆的总燃烧比例即用作家用燃料和田间燃烧比例之和(表1)可知,水稻、小麦和油菜总燃烧比例随着时间的推移是逐阶段下降,而棉花和大豆基本维持不变,玉米则经历了上升下降上升这一过程.

表1 江苏省近年来主要农作物秸秆不同利用类型所占百分比/%

Table 1 Percentage of different use patterns for different crop straws during recent years in Jiangsu province/%

秸秆	利用类型	1990~1995年	1996~2000年	2001~2005年	2006~2008年
水稻	家用燃烧	65.58 ± 4.20	61.74 ± 3.80	22.44 ± 4.79	17.72 ± 5.21
	田间燃烧	15.12 ± 1.91	19.91 ± 3.41	56.10 ± 4.44	52.58 ± 5.24
	其它	19.30 ± 0.15	18.35 ± 4.39	21.46 ± 3.47	29.71 ± 0.50
小麦	家用燃烧	58.80 ± 5.85	55.00 ± 6.28	11.47 ± 3.20	7.44 ± 2.08
	田间燃烧	24.98 ± 5.86	29.27 ± 6.22	68.46 ± 3.49	60.27 ± 3.84
	其它	16.22 ± 2.18	15.72 ± 1.38	20.07 ± 1.06	32.29 ± 1.90
玉米	家用燃料	68.55 ± 1.69	66.82 ± 2.82	38.53 ± 10.29	28.52 ± 9.04
	田间燃烧	16.09 ± 3.78	17.30 ± 3.50	48.02 ± 7.66	52.38 ± 5.86
	其它	15.36 ± 1.06	15.89 ± 1.90	13.44 ± 0.18	19.10 ± 0.21
油菜	家用燃料	49.14 ± 10.72	44.26 ± 14.85	24.86 ± 12.88	25.78 ± 12.33
	田间燃烧	36.43 ± 10.00	37.54 ± 12.65	53.35 ± 15.68	30.65 ± 10.02
	其它	14.43 ± 0.75	18.20 ± 3.98	21.79 ± 1.20	43.57 ± 9.60
棉花	家用燃料	85.84 ± 7.13	85.84 ± 7.13	80.52 ± 10.44	79.84 ± 10.97
	田间燃烧	10.20 ± 5.18	10.18 ± 5.18	12.64 ± 7.03	13.38 ± 7.65
	其它	3.96 ± 1.29	3.98 ± 1.27	6.84 ± 0.55	6.78 ± 0.51
大豆	家用燃料	87.50 ± 12.50	87.50 ± 12.50	87.50 ± 12.50	87.50 ± 12.50
	田间燃烧	0.00 ± 0.00	00.0 ± 0.00	00.0 ± 0.00	00.0 ± 0.00
	其它	12.50 ± 6.19	12.50 ± 6.19	12.50 ± 6.19	12.50 ± 6.19
水稻		80.70 ± 3.06	81.65 ± 3.60	78.54 ± 4.61	70.29 ± 5.22
小麦		83.78 ± 5.86	84.28 ± 6.25	79.93 ± 3.34	67.71 ± 2.96
玉米	总燃烧比例	84.64 ± 2.73	84.11 ± 3.16	86.56 ± 8.98	80.90 ± 7.45
油菜		85.57 ± 10.36	81.80 ± 13.75	78.21 ± 14.28	56.43 ± 11.17
棉花		96.04 ± 6.16	96.02 ± 6.15	93.16 ± 8.73	93.22 ± 9.31
大豆		87.50 ± 6.25	87.50 ± 6.25	87.50 ± 6.25	87.50 ± 6.25

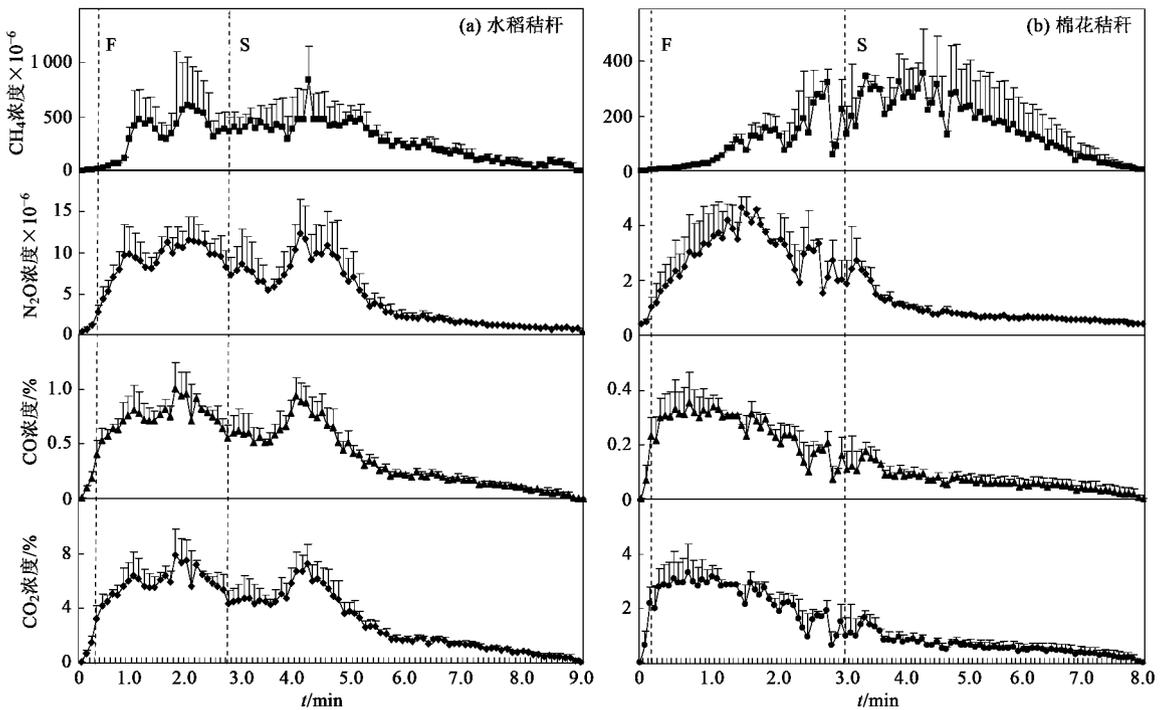
2.2 燃烧产物排放因子研究

2.2.1 燃烧过程产生的不同气体浓度变化规律

秸秆燃烧主要包括明火和闷火燃烧2个阶段^[25]. 明火阶段开始于秸秆点燃后很短时间内,燃烧迅速达到稳定. 此阶段燃烧温度高,燃烧过程中复杂的物质转变为简单的小分子物质,主要产物为CO₂、N₂O、和CO等气体. 稳定阶段结束后燃烧开始进入闷火阶段,此阶段中没有明显的火焰,燃烧温度较低,主要产物为CO和CH₄等^[6]. 供试作物中秸秆

理化性质较相似的作物秸秆水稻、小麦、玉米、油菜和大豆,燃烧产生各种气体浓度变化趋势大致相同. 如图1(a)水稻秸秆燃烧各气体变化趋势所示,在秸秆点燃后明火阶段进行到2.1min左右时,CO₂、CO和N₂O基本同步迅速出现浓度峰值,持续一段时间后进入闷火阶段,则CH₄出现最高值. 随着燃烧的开始,烟气中各种气体浓度逐渐降低,最终回到空气背景值,整个燃烧持续时间约为9min.

如图1(b)所示,棉花秸秆燃烧产生的各种气体



图中 F (flaming) 表示明火阶段燃烧开始, S (smoldering) 表示闷火阶段燃烧开始

图 1 水稻秸秆和棉花秸秆燃烧产生的 4 种气体浓度随时间变化趋势

Fig. 1 Variation in concentrations of four gases during the periods of rice straw and cotton straw burning experiments

浓度变化趋势与水稻秸秆变化趋势差别较大. 棉花秸秆点燃之后, CO_2 、 CO 浓度同步迅速上升, 而 N_2O 浓度上升则略滞后一些; 明火阶段持续时间为 3 min 左右, 而后进入闷火阶段, CH_4 变化趋势与水稻秸秆不一致, 显得非常不稳定, 可能与棉花秸秆木质素含量较高有关.

2.2.2 秸秆燃烧的排放因子

表 2 为 6 种供试秸秆燃烧时各气体的排放因子. 其中油菜秸秆具有较高的 CO_2 和 CH_4 排放因子 [$(795.71 \pm 26.38) \text{ g/kg}$ 和 $(3.40 \pm 1.27) \text{ g/kg}$], 玉米秸秆具有较高的 N_2O 排放因子 [$(0.12 \pm 0.01) \text{ g/kg}$], 而水稻秸秆 CO 排放因子较高 [$(44.12 \pm 0.36) \text{ g/kg}$]. 本研究得到的 CH_4 和 N_2O 排放因子和国内外已有室内模拟燃烧报道基本一致, 与 IPCC 指南^[12] 中 CH_4 和 N_2O 缺省值相吻合, 但 CO_2 和 CO 排放因子较国外研究结果偏小^[6,7,9,10,18,19], 与国内报道^[11,17,26-28] 较接近.

根据相关研究报道^[6,25], 排放因子测定结果偏小可能存在两方面的原因. 一方面受燃烧条件的影响. 燃烧过程中氧气供应情况和天气条件(空气湿度、风力、风速等)^[6,21,25,29] 会影响排放因子大小. 本试验进行期间风力较强、空气湿度大, 导致了燃烧炉

表 2 供试作物秸秆燃烧 CO_2 、 CO 、 CH_4 和 N_2O 的排放因子¹⁾/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 2 Emission factors of CO_2 , CO , CH_4 and N_2O from various crop straws burning/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

秸秆种类	CO_2	CO	CH_4	N_2O
水稻	656.27 ± 26.15	44.12 ± 0.36	2.19 ± 0.73	0.11 ± 0.01
小麦	586.39 ± 20.25	22.19 ± 0.77	2.22 ± 0.12	0.05 ± 0.002
玉米	620.72 ± 47.56	43.25 ± 3.31	2.95 ± 0.17	0.12 ± 0.01
油菜	795.71 ± 26.38	32.61 ± 1.08	3.40 ± 1.27	0.06 ± 0.02
大豆	543.11 ± 57.86	29.41 ± 3.13	2.89 ± 0.65	0.09 ± 0.01
棉花	464.14 ± 2.96	24.88 ± 0.16	1.82 ± 0.58	0.05 ± 0.01

1) 排放因子为每 kg 干物质燃烧产生的气体量

内燃烧温度比较低. 燃烧进行不完全导致碳转化为 CO_2 、 CO 量偏小. 另一方面与供试秸秆的理化性质有关, 如秸秆种类、碳氮含量、密度等^[6,10,25,26,29,30]. 表 3 为供试秸秆碳氮含量, 从中可以看出, N_2O 排放因子的大小与秸秆本身氮含量有一定的对应关系. 氮含量相对较高的水稻、玉米和大豆秸秆, N_2O 排放因子也较大(油菜秸秆除外). 而 CO_2 、 CO 排放因子大小与秸秆碳氮比、碳含量关系呈现不确定性. 小麦秸秆碳氮比在供试中最高, CO_2 排放因子却相对来讲较低; 大豆秸秆碳氮比最小, 但 CO_2 排放因子在供试作物中并非最小, 这可能与秸秆转化效率有关.

表 3 供试作物秸秆碳氮元素含量及气态碳转化率/%

Table 3 Value of C, N and the conversion of gaseous carbon of the different tested straws/%

秸秆种类	C	N	C/N	碳转化率
水稻	36.62	1.02	35.90	54.49
小麦	36.46	0.32	113.94	46.92
玉米	39.73	1.46	27.21	47.83
油菜	38.74	1.21	32.02	60.28
大豆	40.65	1.76	24.45	40.08
棉花	43.04	0.69	58.90	32.20

转化效率是指秸秆中某元素转化为含该元素的气体量占元素总量的比例. 根据排放因子和秸秆元素含量, 进一步计算不同作物秸秆中总碳转化为 CO_2 、 CO 和 CH_4 的量, 即碳转化率, 结果见表 3. 从中可以看出, 各种供试作物碳转化率普遍较低. 原因可能是秸秆燃烧不完全, 导致碳主要转化为颗粒物、焦炭和焦油^[7]. 本模拟试验燃烧过程中产生浓密的白烟, 与已报道的燃烧现象相符^[6], 说明燃烧进行不彻底, 碳总量中以 CO_2 、 CO 气体形式存在的碳(含量)减少, 导致了 CO_2 、 CO 排放因子偏小.

2.2.3 秸秆燃烧温室气体排放清单

目前我国没有直接的秸秆资源量的数据, 一般是利用作物产量的数据进行估算, 估算式为 $M = C_r \times R_a$, 式中, M 表示秸秆产量; C_r 为作物产量; R_a 为草谷比(作物秸秆籽粒比). 作物产量可依据江苏省年鉴中的统计数据. 作物的草谷比不尽相同, 且同种作物的草谷比由于品种、生长地区、气候等的差异也会有差别. 近年来, 我国作物品种在不断的改良, 高秆品种逐渐被矮秆取代, 草谷比也发生了变化. 对此, 本研究采用平均草谷比数据^[24], 供试作物水稻、小麦、玉米、油菜、棉花和大豆草谷比分别为 1、1、2、2、3 和 1.5. 根据上述草谷比和江苏省粮棉产量计算供试作物秸秆产量, 得到第 1 至第 4 研究阶段所有供试作物秸秆年均产量分别为 3 608.60、3 806.37、3 259.83 和 3 541.87 万 t. 依据秸秆产量和问卷结果中确定的总燃烧比例, 来进一步计算秸秆燃烧量(扣除秸秆水分含量, 即以秸秆干物质量计). 结合上述排放因子从而确定了江苏省近年来 6 种常见农作物秸秆燃烧温室气体年均排放清单, 结果见表 4.

表 4 江苏省近年来供试作物秸秆燃烧温室气体年均排放清单¹⁾

Table 4 Emission inventory of greenhouse gases from crop straws combustion during recent years in Jiangsu province

时间阶段	气体种类	水稻	小麦	玉米	油菜	棉花	大豆	合计	阶段 GWP/Tg
1990 ~ 1995 年	CO_2/Tg	8.58	4.80	2.37	1.21	0.63	0.30	17.88	22.26
	CO/Tg	0.58	0.18	0.16	0.05	0.03	0.02	1.02	
	CH_4/Gg	28.62	18.16	11.25	5.17	2.46	1.59	67.26	
	$\text{N}_2\text{O}/\text{Gg}$	1.44	0.42	0.46	0.09	0.07	0.05	2.52	
1996 ~ 2000 年	CO_2/Tg	9.80	4.41	2.58	1.41	0.52	0.38	19.11	23.83
	CO/Tg	0.66	0.17	0.18	0.06	0.03	0.02	1.11	
	CH_4/Gg	32.71	16.69	12.25	6.04	2.04	2.09	71.78	
	$\text{N}_2\text{O}/\text{Gg}$	1.64	0.38	0.50	0.11	0.06	0.07	2.75	
2001 ~ 2005 年	CO_2/Tg	8.03	3.16	2.22	1.99	0.49	0.39	16.37	20.30
	CO/Tg	0.54	0.12	0.15	0.08	0.03	0.02	0.94	
	CH_4/Gg	26.79	11.96	10.53	8.49	1.91	2.09	61.77	
	$\text{N}_2\text{O}/\text{Gg}$	1.35	0.27	0.43	0.15	0.05	0.07	2.32	
2006 ~ 2008 年	CO_2/Tg	7.89	4.36	2.33	1.65	0.44	0.38	17.05	21.22
	CO/Tg	0.53	0.16	0.16	0.07	0.02	0.02	0.97	
	CH_4/Gg	26.33	16.49	11.08	7.03	1.73	2.02	64.69	
	$\text{N}_2\text{O}/\text{Gg}$	1.32	0.38	0.45	0.12	0.05	0.06	2.39	
作物秸秆 GWP/Tg		9.18	4.35	2.55	1.63	0.55	0.39	—	—

1) GWP 为年均 CO_2 当量值

表 4 表明, 6 种供试作物燃烧温室气体排放量大小顺序为: 水稻 > 小麦 > 玉米 > 油菜 > 棉花 > 大豆. 按照 IPCC 的规定^[2], CO 、 CH_4 和 N_2O 百年尺度增温潜势 (global warming potential, GWP) 分别为 CO_2 的 1.9、25 和 298 倍. 进一步计算不同作物秸秆的年均全球增温潜势(表 4), 结果表明水稻秸秆燃

烧产生温室气体的年均全球增温潜势最大, 其次为小麦秸秆, 大豆秸秆最小. 此结果与江苏省种植模式有关. 江苏省以稻-麦轮作为主, 小麦、水稻种植面积和产量较其它作物高, 相应地其秸秆产量在农残总量中所占比重较大. 加之江苏省农户对农作物秸秆相关利用(沤肥、直接还田和作饲料)比例较小, 大部

分还是作为家庭燃烧和田间燃烧处理,最终使之燃烧产生温室气体排放量较大。

通过计算江苏省 1990 ~ 2008 年期间 4 个阶段秸秆燃烧排放的温室气体百年尺度增温潜势 GWP 可知,江苏省秸秆燃烧温室气体排放的年均 GWP 经历了一个先上升后下降再上升的过程。从 2001 ~ 2005 年期间秸秆燃烧温室气体排放的 GWP 出现了较大的下降,2006 ~ 2008 年期间又经历一个上升的过程。导致此变化的原因主要是近年来粮食种植结构的调整导致粮棉产量变化有关。根据问卷调查显示,2001 ~ 2005 年期间供试作物秸秆总燃烧比例较 1996 ~ 2000 年期间来说有明显降低,2001 ~ 2005 年期间江苏省粮棉年均产量为 2 781.25 万 t,低于 1996 ~ 2000 年间的 3 330.34 万 t^[20],二者共同作用的结果表现为此阶段中秸秆燃烧温室气体排放量大幅度的下降。此计算结果低于曹国良等^[31]报道的江苏省 2000 ~ 2003 年期间秸秆露天燃烧排放量,这与两者计算中采用的排放因子和秸秆露天燃烧比例不同有关。2006 ~ 2008 年间供试作物秸秆总燃烧比例虽然较 2001 ~ 2005 年期间有所下降,但是此阶段的年均粮棉总产量为 3 120.13 万 t,较 2001 ~ 2005 年期间的 2 781.25 万 t 有一定程度的上升,故而此阶段秸秆燃烧温室气体排放的年均 GWP 又有所增多。

表 4 同时表明尽管政府近些年加大秸秆田间禁烧力度,但秸秆燃烧导致的温室气体排放量并未显著减少。结合问卷调查结果说明江苏省秸秆资源化利用在温室气体排放量下降中贡献很小,秸秆处理方式仍以燃烧和弃置为主。这种处理方式不仅浪费宝贵的生物能源,而且加重环境污染。改变此现状的关键就是加快秸秆资源化利用的步伐。面对巨大的秸秆资源,加速推广低成本、高效能、大范围的秸秆资源化利用技术,将是政府以后工作的重点。

2.3 不确定性分析

秸秆燃烧产生温室气体排放总量的准确度受众多因素的影响,包括政府统计数据、秸秆燃烧比例及排放因子。一般而言,政府统计数据可信度较高,就本研究而言,温室气体排放总量的不确定性主要来自排放因子。本研究中温室气体总量计算中,秸秆燃烧总量包括田间直接燃烧秸秆比例和作家用燃料燃烧两部分,而排放因子一致采用的是炉内模拟燃烧数值,炉内燃烧条件较田间直接燃烧条件可控因素较多,排放因子较田间直接燃烧存在一定的偏差。Dhammapala 等^[32]研究表明,燃烧炉模拟燃烧同种

秸秆排放因子和田间直接燃烧排放因子比值范围为 $100\% \pm 30\%$ 。

本研究采用此研究结果来计算江苏省不同研究阶段温室气体排放量的年均变化。在 1990 ~ 1995 年期间燃烧产生各气体量 CO_2 、 CO 、 CH_4 和 N_2O 分别为 (17.88 ± 5.36) Tg、 (1.02 ± 0.31) Tg、 (67.26 ± 20.18) Gg 和 (2.52 ± 0.76) Gg; 在 1996 ~ 2000 年期间燃烧产生各气体排放量 (19.11 ± 5.73) Tg、 (1.11 ± 0.33) Tg、 (71.78 ± 21.53) Gg 和 (2.75 ± 0.83) Gg; 2001 ~ 2005 年期间秸秆燃烧各气体排放量为 (16.37 ± 4.91) Tg、 (0.94 ± 0.28) Tg、 (61.77 ± 18.53) Gg 和 (2.32 ± 0.69) Gg; 2006 ~ 2008 年期间秸秆燃烧各气体排放量为 (17.05 ± 5.12) Tg、 (0.97 ± 0.29) Tg、 (64.69 ± 19.41) Gg 和 (2.39 ± 0.72) Gg。

3 结论

(1) 江苏省主要种植作物(水稻、小麦和玉米)秸秆 2000 ~ 2008 年期间田间燃烧比例较大,且小麦秸秆燃烧比例较水稻秸秆高。而种植量相对较少的经济作物棉花、油菜、大豆一直以作家用燃料为主。

(2) 不同农作物秸秆燃烧产生温室气体排放因子不同。其中油菜秸秆具有较高的 CO_2 和 CH_4 排放因子,玉米秸秆具有较高的 N_2O 排放因子,而水稻秸秆的 CO 排放因子较高。

(3) 水稻、小麦和玉米秸秆燃烧对温室气体的贡献占主要地位。江苏省近年来农残燃烧温室气体排放量从 1990 ~ 1995 年期间至 2006 ~ 2008 年期间(第 1 至第 4 研究阶段)经历了一个先上升后下降再上升的过程,表现为 1996 ~ 2000 年期间(第 2 研究阶段)秸秆燃烧产生温室气体的全球增温潜势最大。

参考文献:

- [1] Hansen J, Sato M, Kharecha P, *et al.* Climate change and trace gases [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 2007, **365**(1856): 1925-1954.
- [2] Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, *et al.* Changes in Atmospheric Constituents and in Radioactive Forcing [A]. In: Solomon S, Qin D, Manning M, *et al.* (eds.). IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis [C]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 130-234.
- [3] Crutzen P J, Heidt L E, Krasnec J P, *et al.* Biomass burning as a source of atmospheric gases: CO , H_2 , N_2O , NO , CH_3Cl and COS [J]. *Nature*, 1979, **282**(15): 253-256.
- [4] Simmonds P G, Manning A J, Derwent R G, *et al.* A burning

- question can recent growth rate anomalies in the greenhouse gases be attributed to large-scale biomass burning events? [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(14): 2513-2517.
- [5] De Zarate I O, Ezcurra A, Lacaux J P, *et al.* Emission factor estimates of cereal waste burning in Spain [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(19): 3183-3193.
- [6] Andrea M O, Merlet P. Emissions of trace gases and aerosols from biomass burning [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, **15**(4): 955-966.
- [7] Dennis A, Fraser M, Anderson S, *et al.* Air pollutant emissions associated with forest, grassland and agricultural burning in Texas [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(23): 3779-3792.
- [8] Street D G, Yarbe K F, Woo J H, *et al.* Biomass burning in Asia: annual and seasonal estimates and atmospheric emissions [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, **17**(4): 101-1020.
- [9] Dhammapala R, Claiborn C, Corkill J, *et al.* Particulate emission from wheat and Kentucky blue grass stubble burning in eastern Washington and northern Idaho [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(6): 1007-1015.
- [10] Sahai S, Sharma C, Singh D P, *et al.* A study for development of emission factor trace gases and carbonaceous particulate species from in situ burning of wheat straw in agricultural fields in India [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(39): 9173-9186.
- [11] Zhang H F, Ye X N, Cheng T T, *et al.* A laboratory study of agricultural crop residue combustion in China: Emission factors and emission inventory [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(36): 8432-8441.
- [12] IPCC 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [R]. General Guidance and Reporting of Intergovernmental Panel on Climate Chapter 4, 89-90.
- [13] Hao W M, Liu M H. Spatial and temporal distribution of tropical biomass burning [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, **8**(4): 495-503.
- [14] 高祥照, 马文奇, 马常宝, 等. 中国作物秸秆资源化利用现状分析[J]. *华中农业大学学报*, 2002, **21**(3): 60-65.
- [15] 曹国良, 张小曳, 郑方成, 等. 中国大陆秸秆露天焚烧的量的估算[J]. *资源科学*, 2006, **28**(1): 9-13.
- [16] Miura Y, Kanno T. Emissions of trace gases (CO_2 , CO, CH_4 and N_2O) resulting from rice straw burning [J]. *Soil Science Plant Nutrition*, 1997, **43**(4): 849-854.
- [17] Cao G L, Zhang X Y, Gong S L, *et al.* Investigation on emission factors of particulate matter and gaseous pollutants from crop residue burning [J]. *Journal of Environment Sciences*, 2008, **20**(1): 50-55.
- [18] Gadde B, Bonnet S, Menke C, *et al.* Air pollutant emissions from rice straw open field burning in India, Thailand and the Philippines [J]. *Environment Pollution*, 2009, **157**(5): 1554-1558.
- [19] Smith K R, Khalil M A K, Rasmussen R A, *et al.* Greenhouse gases from biomass and fossil fuel stoves in developing countries: A Manila pilot study [J]. *Chemosphere*, 1993, **26**(1-4): 479-505.
- [20] 江苏省统计局. 江苏统计年鉴[M]. (7-26期). 北京: 中国统计出版社, 1990-2009.
- [21] Venkataraman C, Rao G U. Emission factor of carbon monoxide and size-resolved aerosols from biofuel combustion [J]. *Environmental Science Technology*, 2001, **35**(10): 2100-2107.
- [22] Edwards R D, Smith K R, Zhang J. Implications of changes in household stoves and fuel use in China [J]. *Energy Policy*, 2004, **32**(3): 395-411.
- [23] Yang S J, He H P, Lu S L, *et al.* Quantification of crop residue burning in the field and its influence on ambient air quality in Suqian, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(9): 1961-1969.
- [24] 王书肖, 张楚莹. 中国秸秆露天焚烧大气污染物排放时空分布[J]. *中国科技论文在线*, 2008, **3**(5): 329-333.
- [25] Lobert J M, Warnatz J. Emissions from the combustion process in vegetation [A]. In: Crutzen P J, Goldammer J G. (eds). *Fire in the Environment* [C]. Chichester: John Wiley Sons, 1993. 15-37.
- [26] Zhang J, Smith K R, Ma Y, *et al.* Greenhouse gases and other airborne pollutants from household stoves in china: a database for emission factors [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(26): 4537-4549.
- [27] 曹美秋, 庄亚辉. 生物质能燃烧释放的 N_2O 的测定及其分布[J]. *环境化学*, 1994, **13**(5): 395-400.
- [28] Li X, Wang S, Duan L, *et al.* Particulate and trace gas emissions from open burning of wheat straw and corn stover in China [J]. *Environmental Science Technology*, 2007, **41**(17): 6052-6058.
- [29] Bhattacharya S C, Salam P A, Sharma M. Emissions from biomass energy use in some selected Asian countries [J]. *Energy*, 2000, **25**(2): 169-188.
- [30] Langmann B, Duncan B, Textor C, *et al.* Vegetation fire emissions and their impact on air pollution and climate [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(1): 107-116.
- [31] 曹国良, 张小曳, 王亚强, 等. 中国区域农田秸秆露天焚烧排放量的估算[J]. *科学通报*, 2007, **52**(15): 1526-1831.
- [32] Dhammapala R, Claiborn C, Simpson C, *et al.* Emission factors from wheat and Kentucky bluegrass stubble burning: Comparison of field and simulated burn experiments [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(7): 1512-1520.