

叶延琼, 汪晶, 章家恩, 等. 广东省水稻秸秆露天焚烧大气污染物排放的时空分布特征 [J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(4): 52-60.
YE Yanqiong, WANG Jing, ZHANG Jia'en, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of air pollutants from open burning of rice straw in Guangdong Province[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(4): 52-60.

广东省水稻秸秆露天焚烧大气污染物排放的时空分布特征

叶延琼^{1,2}, 汪晶¹, 章家恩^{1,2}, 秦钟^{1,2}

(1 华南农业大学 资源环境学院, 广东 广州 510642; 2 农业部华南热带农业环境重点实验室/
广东省现代生态农业与循环农业工程技术研究中心, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】了解广东省水稻秸秆露天焚烧大气污染物排放情况, 为水稻秸秆的资源化利用以及大气污染治理提供一定的参考。【方法】基于广东省历年的稻谷产量、草谷比、水稻秸秆焚烧比例和焚烧效率指标, 利用排放因子法估算了 1990—2016 年间广东省水稻秸秆产量及露天焚烧大气污染物的排放量, 利用 ArcGIS10.2 软件分析了大气污染物排放的时空分布特征。【结果】1990—2016 年间, 广东省水稻秸秆资源量呈“下降-上升-下降-上升”的变化趋势, 整体上由 1990 年的 1 687 万 t 下降到 2016 年的 1 087 万 t, 年平均减少率为 1.7%。研究期间, PM、BC、OC、SO₂、NO_x、CH₄、CO 和 CO₂ 的排放量分别减少了 8 800、200、5 200、1 100、800、2 900、106 500 和 2 585 800 t, 减少率分别为 48.09%、50.00%、48.60%、50.00%、50.00%、48.33%、48.45% 和 48.45%。广东省各地区水稻秸秆露天焚烧污染物排放量的空间分布表现出不均衡性, 1990 年, 茂名、阳江、肇庆、广州、惠州、河源、汕尾、揭阳及潮州市的排放量较大, PM 的排放总量均在 1 000 t 以上; 2000 年, 大部分地市的 PM 排放量均在 1 000 t 以上; 2010—2016 年间, 除揭阳市外, PM 的排放量均低于 1 000 t。【结论】1990—2000 年, 除粤北的部分县(市、区)外, 广东省大部分地区的大气污染物排放强度均较高; 2010 年前, 大气污染物排放的高值区主要集中在湛江、茂名、阳江、肇庆、梅州、惠州、揭阳以及潮州市; 2016 年, 排放强度高的地区仅集中在粤西和粤东地区的小部分县(市、区)。

关键词: 水稻秸秆; 露天焚烧; 大气污染物; 时空分布; 广东省
中图分类号: X51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2019)04-0052-09

Temporal and spatial distribution characteristics of air pollutants from open burning of rice straw in Guangdong Province

YE Yanqiong^{1,2}, WANG Jing¹, ZHANG Jia'en^{1,2}, QIN Zhong^{1,2}

(1 College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;
2 Key Laboratory of Agro-Environment in the Tropics, Ministry of Agriculture, P.R. China/Guangdong
Engineering Technology Research Centre of Modern Eco-Agriculture and
Circular Agriculture, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】To understand the emission of air pollutants from open burning of rice straw in Guangdong province, and provide certain reference for utilization of rice straw resources and control of air pollutant. 【Method】Based on the statistical data of rice yield, the ratio of straw to grain, combustion ratio and efficiency of rice straw in Guangdong province from 1990 to 2016, we calculated rice straw yield and air

pollutant emission from open burning of rice straw using the emission factor method. The temporal and spatial distribution characteristics of air pollutant emission were analyzed using the ArcGIS 10.2 software.

【Result】From 1990 to 2016, the total amount of rice straw resources in Guangdong Province showed a trend of “decline-rise-decline-rise”, which decreased from 16.87 million tons in 1990 to 10.87 million tons in 2016 with an average annual decrease rate of 1.7%. During the period, the amounts of PM, BC, OC, SO₂, NO_x, NH₄, CO and CO₂ emissions decreased by 8 800, 200, 5 200, 1 100, 800, 2 900, 106 500 and 2 585 800 tons, respectively. Their decrease rates were 48.09%, 50.00%, 48.60%, 50.00%, 50.00%, 48.33%, 48.45% and 48.45%, respectively. The spatial distribution of total amount of pollutant emission from open burning of rice straw was unbalanced in different regions of Guangdong province. In 1990, the amounts of PM pollutant emissions were greater than 1 000 t in Maoming, Yangjiang, Zhaoqing, Guangzhou, Huizhou, Heyuan, Shanwei Jieyang and Chaozhou. In 2000, the PM pollutant emissions were above 1 000 t in most cities of Guangdong province. From 2010 to 2016, except for Jieyang, PM pollutant emissions were below 1 000 t.

【Conclusion】From 1990 to 2000, except for some counties in northern Guangdong, the pollutant emission intensity are high in most cities of Guangdong province. The high value areas of pollutant emission before 2010 are mainly concentrated in Zhanjiang, Maoming, Yangjiang, Zhaoqing, Meizhou, Huizhou, Jieyang and Chaozhou. In 2016, the high intensity of pollutant emission was only concentrated in a small number of counties in western and eastern Guangdong.

Key words: rice straw; open burning; air pollutant; temporal and spatial distribution; Guangdong Province

农作物秸秆除富含大量的碳素外, 还含有氮、磷、钾、钙、镁、硫、硅和各种微量元素, 同时富含纤维素、半纤维素等有机质, 是可以综合利用的重要生物资源^[1-2]。丹麦是世界上最先使用秸秆发电的国家, 秸秆被广泛用于发电; 美国除用秸秆作饲料、手工制品和盖房等外, 目前被广泛用于乙醇提炼; 在加拿大, 切碎的玉米秸秆主要用于还田; 在日本, 秸秆主要作为肥料混入土中还田, 以及作粗饲料喂养家畜; 而在中国, 农作物秸秆的综合利用主要包括饲料、肥料、燃料或制作工业纸浆等的原料等^[3]。中国是一个农业大国, 农作物秸秆资源非常丰富, 但由于对秸秆资源重要性和有效合理的利用途径缺乏认识, 中国农作物秸秆利用率在各地区差异很大, 未被合理利用的秸秆很大一部分在田间直接焚烧^[4]。生物质焚烧一直被视为大气颗粒物的来源之一^[5], 其对部分区域的空气质量和全球气候变化产生重大影响^[6-7]。国内近年来的相关研究主要集中在对农作物秸秆产量和资源分布特征^[8-12]、秸秆焚烧比例、秸秆焚烧大气污染物排放量及排放的空间分布特征方面^[6, 13-14]。中国是世界上最大的水稻生产国和消费国^[15], 水稻秸秆产量约占全国农作物秸秆产量的 29.93%, 位居世界首位^[16]。水稻作为广东省最主要的粮食作物, 种植面积占粮食作物种植总面积的 76% 以上^[15]。本文以广东省各县(市、区)的水稻秸秆资源为研究对象, 对 1990—2016 年间全省水稻

秸秆产量以及露天焚烧颗粒物 (PM、BC、OC)、污染气体 (SO₂、NO_x、CH₄、CO) 和温室气体 (CO₂) 的排放量进行估算, 并利用 ArcGIS9.2 软件分析了主要大气污染物的时空分布特征, 以期为相关部门制定政策提供科学的理论依据。

1 数据来源与方法

1.1 数据来源

广东省历年水稻产量等基础数据主要来源于 2001—2017 年的《广东省统计年鉴》(广东省统计局, 2001—2017) 和《广东省农村统计年鉴》(1993—2016)。

1.2 方法

1.2.1 水稻秸秆产量 根据作物产量估算秸秆产量时, 草谷比 (亦称为秸秆系数) 法被认为是最接近实际的农作物秸秆产量测算方法^[4, 9]。因此, 在已知草谷比和水稻经济产量的前提下, 根据下述公式即可计算水稻的秸秆产量^[17]:

W = PS, (1)

式中: W 为水稻秸秆产量, t; P 为水稻年产量, t; S 为草谷比, 即水稻秸秆产量与水稻产量的比值。

由式 (1) 可见, 当水稻产量一定时, 草谷比成为水稻秸秆产量估算准确与否的唯一决定因素。研究表明, 不同农作物草谷比各不相同, 并且受作物品种、生长地区、气候等因素影响, 在研究时若采用不

同的草谷比, 将导致对秸秆资源量的估算结果相差较大^[12]。本文结合相关研究的水稻秸秆系数(草谷比)^[4, 6, 18-20], 确定水稻秸秆的草谷比为 1。

1.2.2 污染物排放量 水稻秸秆露天焚烧过程中, 污染物排放量主要基于排放因子法进行计算:

$$Q_n = WGFE,$$

(2)

式中: Q_n 为研究区域水稻秸秆露天焚烧的污染物 n 的排放量, t; G 为水稻秸秆露天焚烧比例, %; F 为水稻秸秆露天焚烧效率, %; E 为水稻秸秆露天焚烧的污染物排放因子, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1) 水稻秸秆露天焚烧比例。秸秆露天焚烧受农村的经济发展水平、农民的生活方式以及秸秆利用成本等多种因素影响, 经济发展水平越高, 秸秆的利用率相对越低^[21]。有关秸秆露天焚烧的比例, 我国基本没有相关的统计资料。不同研究者的研究差异也较大, 韩鲁佳等^[16] 研究显示, 20 世纪 90 年代中国秸秆资源燃烧(包括生活燃料和露天焚烧)的比例为 45%; Hao 等^[21] 假设全国的秸秆露天焚烧量为秸秆总产量的 17%; 曹国良等^[22] 则采用田间被废弃的秸秆量的一半作为焚烧比例, 约为 25%。综合所能查到的相关资料及广东省不同时期的经济发展状况, 在确定水稻秸秆露天焚烧比例时, 本文拟分研究时段分别考虑, 即 1990—1999 年, 考虑到此期间中国秸秆在农村生活能源中的比例为 30%~35%, 取韩鲁佳等^[16] 秸秆资源燃烧比例的 1/2(即 22.5%) 作为广东省水稻秸秆的露天焚烧比例; 2000—2009 年, 依据曹国良等^[18, 23]、林日强和宋丹丽^[24]、高利伟等^[25]、王书肖和张楚莹^[6] 以及彭立群等^[26] 研究中显示, 广东省农作物秸秆在 2000、2001、2002、2003、2006 和 2009 年的露天焚烧比例

分别为 30.00%、36.45%、32.36%、28.90%、32.90% 和 38.20%, 取平均值 33% 作为此期间的广东省水稻秸秆焚烧比例; 2010—2016 年, 据国家发展和改革委员会发布的《中国资源综合利用年度报告》^[27-28] 显示, 中国在 2010 年的秸秆综合利用率已达 70.6%, 到 2015 年为 80.1%; 广东省在 2012 年已达 82%^[29]。因此, 以广东省 2012 年的综合利用率为基础, 取 18% 作为此期间的水稻秸秆焚烧比例。

2) 水稻秸秆露天焚烧效率。秸秆焚烧效率是指在焚烧过程中以二氧化碳形式排放的碳元素和作物秸秆中总碳量的比值, 其值大小不仅可以反映农作物秸秆中碳元素的氧化程度, 还可以反映整个焚烧过程是否为充分焚烧过程^[4]。秸秆的焚烧效率与其焚烧方式、农民的焚烧习惯以及作物类型有很大关系^[6]。Streets 等^[30] 研究发现, 作物焚烧效率各不相同, 一般介于 68%~92% 之间, 其中水稻大致为 79%~93%。de Zárate 等^[31] 通过 32 个样本的实地测量得到的秸秆平均焚烧效率为 80%。因此本文取 80% 为水稻秸秆露天焚烧效率。

3) 水稻秸秆露天焚烧的污染物排放因子。Jenkins 等^[32]、崔岩山和王庆仁^[33]、唐喜斌等^[34] 的研究表明, 水稻秸秆露天焚烧污染物的排放量与秸秆的有机质含量、含水率、焚烧温度、环境风速、温度等自然环境状况有关。对于污染物排放因子的研究较少, 曹国良等^[18] 通过试验模拟水稻秸秆露天焚烧的排放因子状况, 测算出的结果与杭维琦和陈建江^[35]、Streets 等^[36]、Duan 等^[37] 和 IPCC^[38] 的研究结果较为相似。因此, 本文采用了曹国良等^[18] 有关水稻秸秆露天焚烧污染物排放因子的试验结果(表 1)。

表 1 水稻秸秆露天焚烧排放因子^[18]

Table 1 Emission factors of rice straw burned in field

污染物 Pollutant	PM	SO ₂	NO _x	CH ₄	BC	OC	CO	CO ₂
排放因子/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Emission factor	6.04	0.147	3.52	0.72 ^[32]	0.52	1.96	72.4	1 757.6

2 结果与分析

2.1 广东省水稻秸秆产量变化特征

根据广东省 1991—2017 年统计年鉴得到全省 1990—2016 年间的稻谷产量, 由公式 (1) 计算得到历年的水稻秸秆产量。研究结果(图 1) 表明, 1990—2016 年间, 广东省水稻秸秆资源量表现为“下降—上升—下降—上升”的变化趋势, 即 1990—1993 年间水稻秸秆资源量出现下降, 1994—1998 年快速上升, 1999—2008 年波动式下降, 2009—2016 年则

呈现缓慢增长趋势。总体上, 全省水稻秸秆产量呈现下降趋势, 由 1990 年的 1 687 万 t 下降到 2016 年的 1 087 万 t, 较 1990 年减少了 600 万 t, 年平均减少率为 1.7%。主要原因在于广东省城市化进程加快导致耕地数量减少, 最终导致水稻种植面积及产量降低; 此外, 中国从 1998 年开始全面实施农业结构战略性调整也导致了水稻种植面积及产量的降低^[17]。

在地域分布上, 全省水稻秸秆产量的变化特点为: 位于珠江三角洲腹地的广州、深圳、佛山、东莞

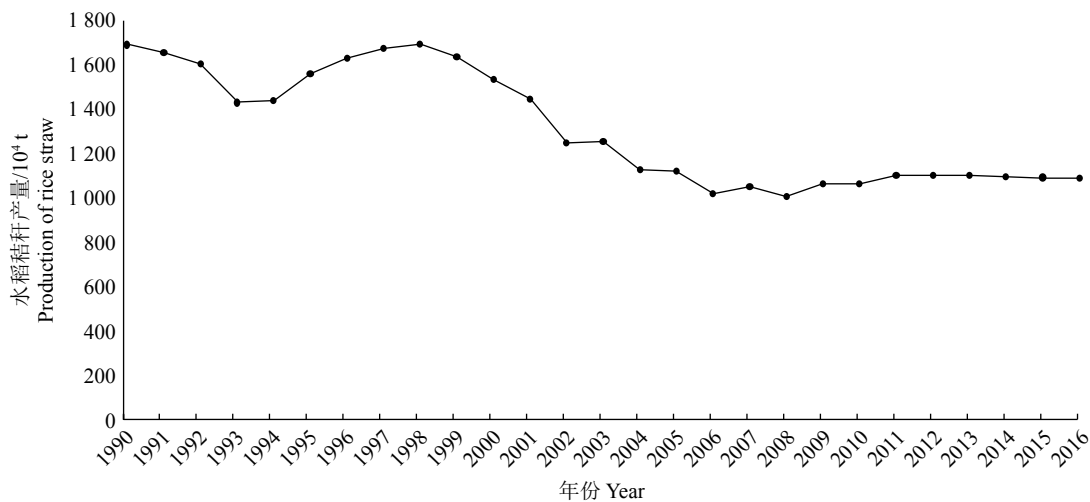
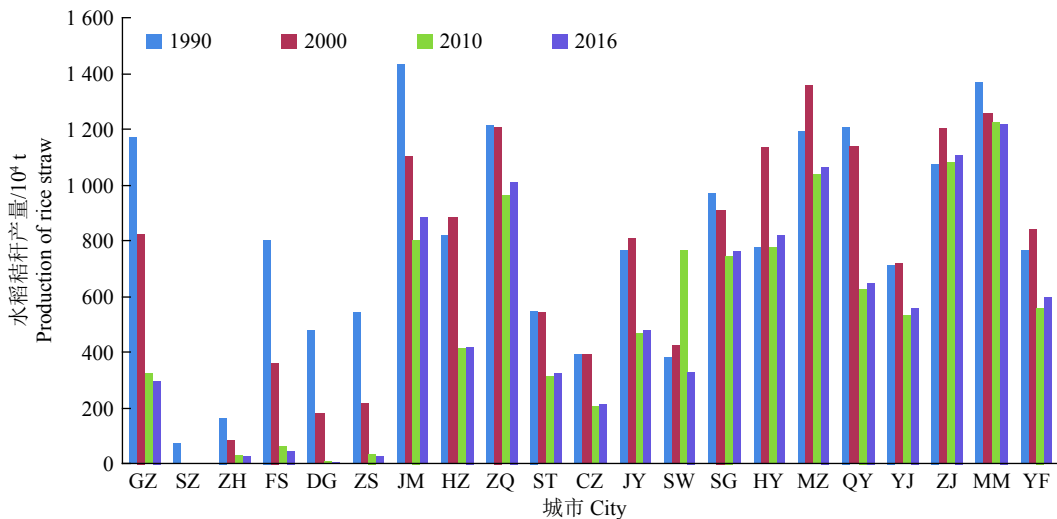


图 1 广东省 1990—2016 年水稻秸秆产量变化

Fig. 1 The change of rice straw yield in Guangdong Province from 1990 to 2016

以及中山市的水稻秸秆产量迅速下降,这与上述地
市城市化快速扩张,水稻种植面积大量缩减关系密
切。而珠江三角洲外缘的惠州、江门和肇庆市的
水稻秸秆产量则略有下降;粤东地区的汕头、潮
州市下降较为明显,汕尾市除 2010 年有较大增

长外,其余年份变化不大;粤北地区的韶关和梅
州市下降幅度不大,河源市除 2000 年增长较大
外,其余年份基本稳定,清远市 2000—2010 年
下降迅速,随后趋于稳定;粤西地区的阳江、湛
江、茂名以及云浮市虽有下降,但整体上也较
为稳定(图 2)。



GZ: 广州, SZ: 深圳, ZH: 珠海, FS: 佛山, DG: 东莞, ZS: 中山, JM: 江门, HZ: 惠州, ZQ: 肇庆, ST: 汕头, CZ: 潮州, JY: 揭阳, SW: 汕尾, SG: 韶关, HY: 河源, MZ: 梅州, QY: 清远, YJ: 阳江, ZJ: 湛江, MM: 茂名, YF: 云浮

GZ: Guangzhou, SZ: Shengzhen, ZH: Zhuhai, FS: Foshan, DG: Dongguan, ZS: Zhongshan, JM: Jiangmen, HZ: Huizhou, ZQ: Zhaoqing, ST: Shantou, CZ: Chaozhou, JY: Jieyang, SW: Shanwei, SG: Shaoguan, HY: Heyuan, MZ: Meizhou, QY: Qingyuan, YJ: Yangjiang, ZJ: Zhanjiang, MM: Maoming, YF: Yunfu

图 2 广东省各地市 1990—2016 年水稻秸秆产量变化趋势

Fig. 2 The changing trend of rice straw yield in various cities of Guangdong Province from 1990 to 2016

2.2 广东省水稻秸秆焚烧各污染物排放量的时间分布

根据广东省历年水稻秸秆产量,结合水稻秸秆
的焚烧比例、焚烧效率和大气污染物排放因子,计
算得到 1990—2016 年广东省水稻秸秆露天焚烧
各污染物和 CO₂ 的排放量,结果见表 2。由表 2 可
见,受水稻秸秆产量整体下降的影响,各污染物和

CO₂ 排放总量在 1990—2016 年表现为总体下降
趋势。研究期间,PM、BC、OC、SO₂、NO_x、NH₄、CO、
CO₂ 的排放量分别减少了 8 800、200、5 200、1 100、
800、2 900、106 500 和 2 585 800 t,减少率分别为
48.09%、50.00%、48.60%、50.00%、50.00%、48.33%、
48.45% 和 48.45%。

表 2 1990—2016 年广东省水稻秸秆露天焚烧各污染物和 CO₂ 排放量

Table 2 Total estimated amount of pollutant and CO₂ emission from open burning of rice straw in Guangdong Province from 1990 to 2016 10⁴ t

年份 Year	PM	SO ₂	NO _x	CH ₄	BC	OC	CO	CO ₂
1990	1.83	0.04	1.07	0.22	0.16	0.60	21.98	533.71
1991	1.80	0.04	1.05	0.21	0.15	0.58	21.52	522.53
1992	1.74	0.04	1.02	0.21	0.15	0.57	20.88	506.91
1993	1.55	0.04	0.90	0.18	0.13	0.50	18.58	451.08
1994	1.56	0.04	0.91	0.19	0.13	0.51	18.69	453.68
1995	1.69	0.04	0.98	0.20	0.15	0.55	20.25	491.60
1996	1.77	0.04	1.03	0.21	0.15	0.57	21.19	514.51
1997	1.81	0.04	1.06	0.22	0.16	0.59	21.75	528.12
1998	1.84	0.04	1.07	0.22	0.16	0.60	22.00	534.20
1999	1.77	0.04	1.03	0.21	0.15	0.58	21.24	515.72
2000	2.44	0.06	1.42	0.29	0.21	0.79	29.22	709.25
2001	2.30	0.06	1.34	0.27	0.20	0.75	27.55	668.80
2002	1.98	0.05	1.16	0.24	0.17	0.64	23.77	576.97
2003	1.99	0.05	1.16	0.24	0.17	0.65	23.90	580.18
2004	1.79	0.04	1.04	0.21	0.15	0.58	21.47	521.14
2005	1.78	0.04	1.04	0.21	0.15	0.58	21.35	518.29
2006	1.62	0.04	0.94	0.19	0.14	0.53	19.42	471.38
2007	1.67	0.04	0.97	0.20	0.14	0.54	19.99	485.37
2008	1.60	0.04	0.93	0.19	0.14	0.52	19.18	465.54
2009	1.69	0.04	0.98	0.20	0.15	0.55	20.22	490.97
2010	0.92	0.02	0.54	0.11	0.08	0.30	11.06	268.43
2011	0.95	0.02	0.56	0.11	0.08	0.31	11.44	277.62
2012	0.95	0.02	0.56	0.11	0.08	0.31	11.44	277.62
2013	0.95	0.02	0.56	0.11	0.08	0.31	11.44	277.62
2014	0.95	0.02	0.55	0.11	0.08	0.31	11.38	276.29
2015	0.95	0.02	0.55	0.11	0.08	0.31	11.35	275.47
2016	0.95	0.02	0.55	0.11	0.08	0.31	11.33	275.13
减少量 ¹⁾	0.88	0.02	0.52	0.11	0.08	0.29	10.65	258.58
减少率/% ²⁾	48.09	50.00	48.60	50.00	50.00	48.33	48.45	48.45

1) 减少量=1990年的值-2016年的值; 2) 减少率= (1990年的值-2016年的值)/1990年的值×100%
1) Reduction=Value in 2016 – Value in 1990; 2) Reduction rate=(Value in 1990 – Value in 2016)/Value in 1990 ×100%

2.3 广东省水稻秸秆焚烧大气污染物排放量的空间分布

水稻秸秆焚烧大气污染物排放量与稻谷产量、草谷比、焚烧比例及焚烧效率有关，由公式 (1) 和 (2) 可知，本研究中的草谷比和焚烧效率一定，焚烧比例在 3 个时段内均为固定值，大气污染物排放量

仅与稻谷产量有关。考虑到水稻秸秆焚烧各大气污染物当年排放量与排放强度的变化趋势一致，同时，广东省 1995—2017 年的《广东省环境状况公报》^[39] 中有关空气质量的相关分析显示，研究期间广东省主要大气污染物几乎均包括可吸入颗粒物。因此，本文仅以 1990、2000、2010 和 2016 年 PM 排

放数据,通过 ArcGIS10.2 处理得到广东省各市水稻秸秆焚烧 PM 排放量和排放强度分布。

由图 3 可见,1990—2000 年各地 PM 的排放量呈增加趋势,大多地市的 PM 排放总量呈现出从低、中值区逐渐向高值区转变的趋势。1990 年,仅惠州市的 PM 排放量高于 2 000 t,汕尾和河源市的排放量在 1 500~2 000 t 之间;但到 2000 年,PM 排放量高于 2 000 t 的地市增加到 4 个,即惠州、茂名、潮州和揭阳。湛江、阳江、肇庆和河源市的 PM 排

量在 1 500~2 000 t 之间,云浮、清远、梅州、中山市的 PM 排放量也从 1990 年的 500~1 000 t 上升到 2000 年的 1 000~1 500 t。2000—2010 年,由于政府加大了对秸秆资源焚烧的治理力度,同时也多方面促进秸秆资源的综合利用,除韶关、佛山、珠海和深圳市自 2000 年 PM 排放值处于小于 500 t 的低值区外,其余地市的 PM 排放总量均呈现出从高值区向低值区快速转变的趋势。如茂名、惠州、潮州市的 PM 排放总量从 2000 年的 2 000 t 减少到 2010 年的 500~

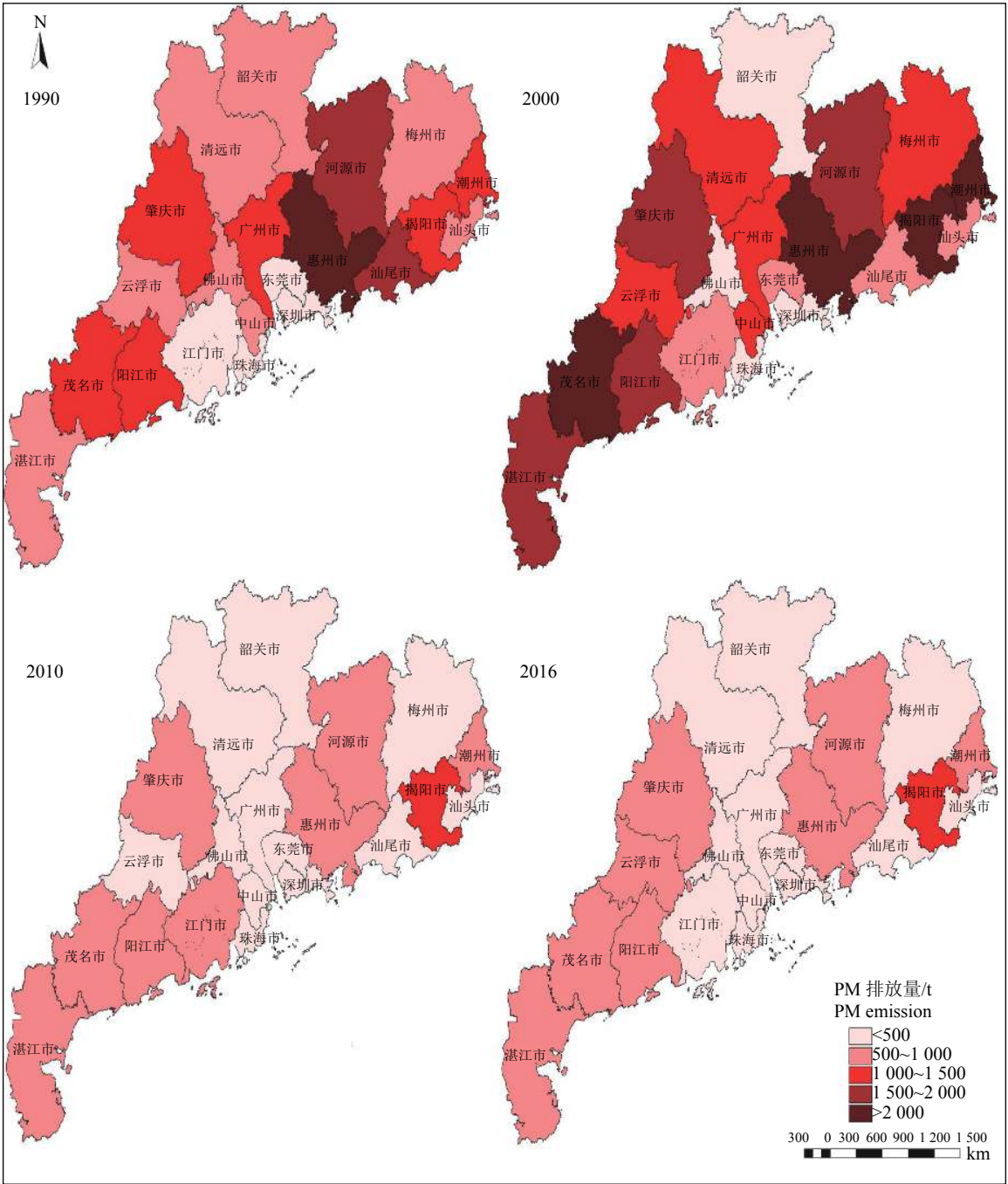


图 3 1990—2016 年广东省各市水稻秸秆露天焚烧 PM 排放量分布

Fig. 3 Distribution of PM pollutant emission from open burning of rice straw in different cities of Guangdong Province from 1990 to 2016

1 000 t, 云浮、清远、广州、中山和梅州市则从 2000 年的 1 000~1 500 t 下降到 2010 年的<500 t。2010—2016 年, 揭阳市的 PM 排放总量在 1 000~1 500 t, 云浮市的 PM 排放总量在 500~1 000 t, 其余地市的 PM 排放总量基本保持在 1 000 t 以下。总体而言, 除惠州市外, 珠江三角洲地区由于城市化的快速发展, 大量农田被城市建设所占用, 水稻种植面积逐年减少, 水稻秸秆焚烧排放的大气污染物也迅速减少。

由图 4 可知, 1990 年, 单位面积 PM 排放强度较高的地区主要集中在珠江三角洲地区、粤东地区和粤西地区的少数市(县), 但到 2000 年, 珠江三角

洲地区、粤东地区和粤西地区的大部分市(县)的 PM 排放强度均在 $0.12\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 以上, 强度较大, 仅有粤北的少数市(县)的 PM 排放强度较小, 低于 $0.06\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 。2010—2016 年, 仅有 8 个县(市、区)的 PM 排放强度在 $0.12\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 以上, 粤西地区大部分县(市、区)的 PM 排放强度在 $0.06\sim 0.12\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 之间, 粤北地区及珠三角部分地区的 PM 排放强度在 $0.01\sim 0.06\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 之间, 此外, 珠三角地区的深圳市、东莞市以及佛山市的顺德区、南海区、禅城区和三水区、广州市的主城区和番禺区, PM 排放强度均为 0。

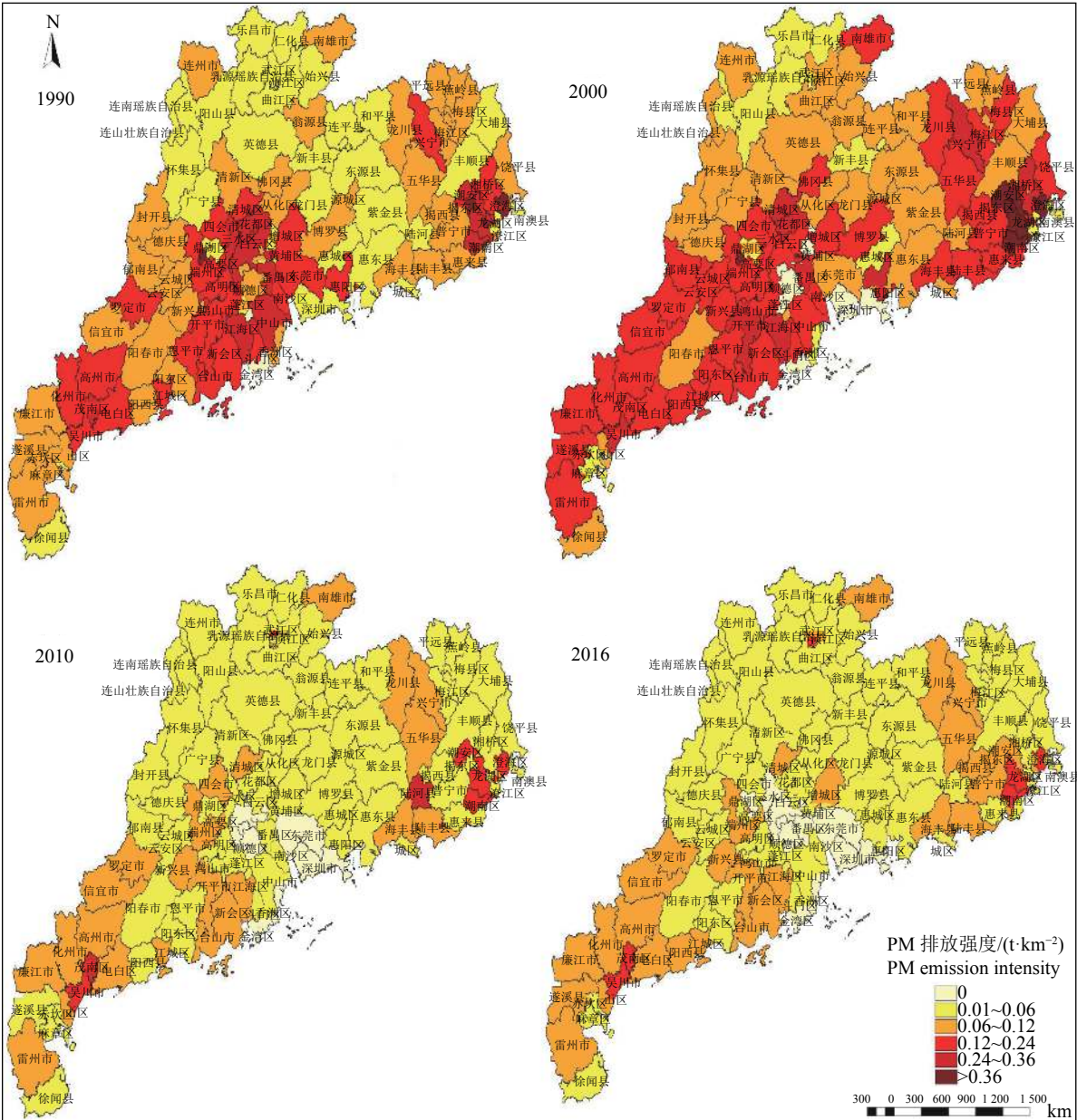


图 4 1990—2016 年广东省各县水稻秸秆露天焚烧 PM 排放强度分布

Fig. 4 Emission intensity of PM pollutant from open burning of rice straw in different counties of Guangdong Province from 1990 to 2016

3 讨论与结论

本研究基于广东省历年的统计年鉴和农村统计年鉴,采用国内外学者已有的关于秸秆焚烧大气污染物排放系数值,结合已有相关研究,分时段确定广东省水稻秸秆资源的露天焚烧比例,基于水稻产量、草谷比、水稻秸秆焚烧比例和焚烧效率,采用排放因子法估算了广东省 1990—2016 年水稻秸秆产量及露天焚烧过程中 PM、SO₂、NO_x、CH₄、BC、OC、CO 和 CO₂ 的排放情况及空间分布特征。主要结论为:

1) 研究期间,广东省水稻秸秆资源量表现为“下降—上升—下降—上升”的变化趋势,但由于受城市快速发展及产业结构调整的影响,全省水稻播种面积及产量整体呈下降趋势,导致水稻秸秆总产量也呈现下降趋势,由 1990 年的 1 687 万 t 下降到 2016 年的 1 087 万 t,年平均减少率为 1.7%。地域分布上,珠江三角洲腹地水稻秸秆产量下降趋势明显,粤东地区略有下降,而粤西和粤北地区则相对较为稳定。2016 年,珠三角地区、粤东地区、粤北地区以及粤西地区秸秆产量分别占全省的 25.12%、12.42%、35.85% 和 26.61%。

2) 受水稻秸秆资源量整体下降的影响,各污染物排放总量在 1990—2016 年也表现为总体减少趋势。1990 年,PM、SO₂、NO_x、CH₄、BC、OC、CO 和 CO₂ 的排放量分别为 18 300、400、10 700、2 200、1 600、6 000、219 800 和 5 337 100 t,到 2016 年则分别减少到 9 500、200、5 500、1 100、800、3 100、113 300 和 2 751 300 t,减少率分别为 48.09%、50.00%、48.60%、50.00%、50.00%、48.33%、48.45% 和 48.45%。

3) 水稻秸秆露天焚烧大气污染物排放量及排放强度在广东省的分布极不均衡。1990 年,茂名、阳江、肇庆、广州、惠州、河源、汕尾、揭阳及潮州市的排放量较大,PM 的排放总量均在 1 000 t 以上。2000 年大部分地市的 PM 排放量均在 1 000 t 以上。2010—2016 年间,除揭阳市外,PM 的排放量均低于 1 000 t。1990—2000 年,除粤北的部分县(市、区)外,全省大部分地区的大气污染物排放强度均较高。到 2016 年,排放强度高的地区仅集中在粤西和粤东地区的小部分县(市、区)。

水稻秸秆产量受统计数据直接影响,大气污染物排放则受样本、测试条件等因素影响,这些因素导致不同学者关于秸秆露天焚烧过程中的草谷比、露天焚烧比例和焚烧效率等指标的研究结果存在一定的差异^[5],最终会影响到研究结果的准确性。

对于秸秆露天焚烧比例,郑有飞等^[40]通过与卫星火点数据结合来提高焚烧比例的准确度,但因卫星对地面监测的时间间隔较长以及卫星只能监测正在焚烧的火点,会导致基于卫星监测的秸秆焚烧污染物排放量偏低。秸秆的焚烧效率与焚烧方式、农民的焚烧习惯以及作物类型有很大关系^[6]。今后的研究中,需要进一步划分区域和秸秆类型,通过实地调查、统计分析等多种方式,确定不同秸秆的露天焚烧比例和效率,以提高研究结果的可靠性。

参考文献:

[1] 陈璐,帅正彬,姚雅韦,等. 秸秆原料综合利用的研究进展 [J]. 四川农业科技, 2015(12): 37-43.

[2] 董清华. 怀集县水稻秸秆焚烧的现状分析和处理方法探讨 [J]. 南方农机, 2018(6): 200-215.

[3] 孙晶晶. 国内外秸秆综合利用现状[EB/OL]. (2015-4-28)[2018-08-10]. <http://news.nongji360.com/html/2015/04/202825.shtml>.

[4] 朱建春,李荣华,杨香云,等. 近 30 年来中国农作物秸秆资源量的时空分布 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(4): 139-145.

[5] 付乐,王姗姗,武志立,等. 河南省秸秆露天焚烧大气污染物排放量的估算与分析 [J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(4): 808-816.

[6] 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.

[7] 李炜,张红. 山西省农田秸秆露天焚烧碳释放量估算 [J]. 中国农学通报, 2013, 29(26): 118-120.

[8] 王雨辰,陈浮,朱伟,等. 江苏省秸秆资源量估算及其区域分布研究 [J]. 江苏农业科学, 2013, 41(6): 305-310.

[9] 方放,李想,石祖梁,等. 黄淮海地区农作物秸秆资源分布及利用结构分析 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 228-234.

[10] 郭冬生,黄春红. 近 10 年来中国农作物秸秆资源量的时空分布与利用模式 [J]. 西南农业学报, 2016, 29(4): 948-954.

[11] 李继福,付国星,梅青青,等. 湖北省主要农作物秸秆资源分布特征及还田现状 [J]. 长江大学学报(自科版), 2016, 13(21): 47-51.

[12] 朱丽君,王光宇,张耀兰. 长三角地区农作物秸秆资源量的时空分布特点 [J]. 贵州农业科学, 2017, 45(4): 138-142.

[13] 曹国良,张小曳,龚山陵,等. 中国区域主要颗粒物及污染气体的排放源清单 [J]. 科学通报, 2011, 56(3): 261-268.

[14] 苏继峰,朱彬,康汉青,等. 长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用 [J]. 环境科学, 2012, 33(5): 1418-1424.

[15] 叶延琼,李韵,章家恩,等. GIS 支持下的广东省水稻种植生态适宜性评价 [J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2013, 39(2): 131-136.

[16] 韩鲁佳,闫巧娟,刘向阳,等. 中国农作物秸秆资源及其利用现状 [J]. 农业工程学报, 2002, 18(3): 87-91.

[17] 毕于运, 王亚静, 高春雨, 等. 中国主要秸秆资源数量及其区域分布 [J]. *农机化研究*, 2010(3): 1-7.

[18] 曹国良, 张小曳, 郑方成, 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): 1826-1831.

[19] 谢光辉, 韩东倩, 王晓玉. 中国禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数 [J]. *中国农业大学学报*, 2011, 16(1): 1-8.

[20] 樊驰, 胡健, 李明. 南充市主要农作物秸秆露天焚烧大气污染物产生量 [J]. *四川环境*, 2017, 36(增刊): 47-50.

[21] HAO W M, LIU M H. Spatial and temporal distribution of tropical biomass burning[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 1994, 8(8): 495-503.

[22] 曹国良, 张小曳, 王丹, 等. 中国大陆生物质焚烧排放的污染物清单 [J]. *中国环境科学*, 2005, 25(4): 389-393.

[23] 曹国良, 张小曳, 王丹, 等. 秸秆露天焚烧排放的 TSP 等污染物清单 [J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(4): 800-804.

[24] 林日强, 宋丹丽. 广东省作物秸秆的利用现状与问题 [J]. *土壤与环境*, 2002, 11(1): 110.

[25] 高利伟, 马林, 张卫峰, 等. 中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(7): 173-179.

[26] 彭立群, 张强, 贺克斌. 基于调查的中国秸秆露天焚烧污染物排放清单 [J]. *环境科学研究*, 2016, 29(8): 1109-1118.

[27] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 中国资源综合利用年度报告 (2012 年)[R/OL].(2013-04-08)[2018-08-10].http://www.Gov.cn/gzdt/2013-04/08/content_2372577.htm.

[28] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 中国资源综合利用年度报告 (2014 年)[R/OL]. (2014-10-09)[2018-08-10].http://www.sdpc.gov.cn/xwzx/xwfb/201410/t20141009_628793.html.

[29] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 关于全国秸秆综合利用和焚烧情况的通报 (发改办环资[2014] 516 号[R/OL])(2014-03-11)[2018-08-11]http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201403/t20140317_602802.html.

[30] STREETS D G, YARBER K F, WOO J, et al. Biomass burning in Asia: Annual and seasonal estimates and atmospheric emissions[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 2003, 17(4): 1099-1119.

[31] DE ZÁRATE I O, EZURRA A, LACAUX J P, et al. Pollution by cereal waste burning in Spain[J]. *Atmospheric Res*, 2005, 73(1/2): 161-170.

[32] JENKINS B M, TURN S Q, WILLIAMS R B, et al. Atmospheric pollutant emission factors from open burning of agricultural and forest biomass by wind tunnel simulations[J]. *Optics Express*, 1996, 18(23): 24344-51.

[33] 崔岩山, 王庆仁. 土壤与大气环境中硫行为及其对植物的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2002, 10(3): 84-86.

[34] 唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 等. 长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究 [J]. *环境科学*, 2014, 35(5): 1623-1632.

[35] 杭维琦, 陈建江. 野外燃烧秸秆对环境质量的影响与防治 [J]. *环境监测管理与技术*, 2000(2): 36-37.

[36] STREETS D G, GUPTA S, WALDHOFF S T, et al. Black carbon emissions in China[J]. *Atmos Environ*, 2001, 35(25): 4281-4296.

[37] DUAN F, LIU X, YU T, et al. Identification and estimate of biomass burning contribution to the urban aerosol organic carbon concentrations in Beijing[J]. *Atmos Environ*, 2004, 38(9): 1275-1282.

[38] IPCC. Greenhouse Gas Inventory, reference manual[M]. Bracknell, UK: IPCC, 1996.

[39] 广东省环境保护厅. 环境状况公报[EB/OL]. (2018-06-04)[2018-09-10]. <http://www.gdep.gov.cn/hjjce/gb/>.

[40] 郑有飞, 田宏伟, 陈怀亮, 等. 河南省夏季秸秆焚烧污染物排放量的估算与分析 [J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(8): 1590-1594.

【责任编辑 周志红】