

杨夏捷, 马远帆, 鞠园华, 等. 华南农产品主产区 2005—2014 年秸秆露天燃烧污染物排放估算及时空分布[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(2): 358–368.

YANG Xia-jie, MA Yuan-fan, JU Yuan-hua, et al. Temporal and spatial distribution of air pollutants emitted from field burning of straw crops in Southern China during 2005—2014[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(2): 358–368.

华南农产品主产区 2005—2014 年秸秆露天燃烧 污染物排放估算及时空分布

杨夏捷^{1,2}, 马远帆^{1,2}, 鞠园华^{1,2}, 蔡奇均^{1,2}, 郭福涛^{1,2*}

(1. 福建农林大学林学院, 福州 350002; 2. 海峡两岸红壤区水土保持协同创新中心, 福州 350002)

摘要: 为了解华南农产品主产区秸秆露天燃烧大气污染物排放情况, 通过室内模拟试验, 实测该地区水稻、小麦、豆类、油菜、玉米、棉花和花生秸秆 CO、CO₂、NO_x、C_xH_y 和 PM_{2.5} 的排放因子, 并基于统计年鉴计算出的研究区域农作物秸秆产量和露天燃烧量, 对华南主产区 4 省 2005—2014 年间秸秆露天燃烧各类污染物的排放总量进行估算, 并分析其时空动态变化。结果表明: 不同农作物秸秆燃烧时 CO、CO₂、NO_x、C_xH_y 和 PM_{2.5} 的平均排放因子分别为 165.32、1 231.76、1.94、38.47 g·kg⁻¹ 和 7.54 g·kg⁻¹。2005—2014 年, 华南农产品主产区农作物秸秆产量范围 59.361(福建)~185.890 Mt(云南); 秸秆燃烧量范围 13.629(福建)~41.902 Mt(广东); CO、CO₂、NO_x、C_xH_y 和 PM_{2.5} 的排放总量分别为 18 926.32、149 866.73、153.13、6 467.09 kt 和 870.33 kt。水稻是研究区域大气污染物的主要来源, 对各类污染物贡献率为 61.16%~84.83%。研究区域污染物时空分布结果显示, 广东全省、广西中部和云南东部是大气污染物单位网格排放高值区, 福建全省污染物排放较低且分散。研究区域各省不同污染物排放在时间上的变化存在差异。福建污染物排放呈下降趋势, 广东、广西、云南呈上升趋势。

关键词: 室内模拟试验; 排放因子; 大气污染物; 排放清单; 时空变化

中图分类号: X571 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2018)02-0358-11 **doi:**10.11654/jaes.2017-1105

Temporal and spatial distribution of air pollutants emitted from field burning of straw crops in Southern China during 2005—2014

YANG Xia-jie^{1,2}, MA Yuan-fan^{1,2}, JU Yuan-hua^{1,2}, CAI Qi-jun^{1,2}, GUO Fu-tao^{1,2*}

(1. College of Forest, Fujian Agriculture and Forest University, Fuzhou 350002, China; 2. Collaborative Innovation Center of Soil and Water Conservation in Red Soil Region of the Cross-Strait, Fuzhou 350002, China)

Abstract: The objective of the present study was to estimate the emission of air pollutants from straw crop burning in four main crop production provinces of Southern China. Crop straw yield and amount of field combustion during 2005—2014 were calculated based on the statistical yearbook data. Indoor simulation experiments were also conducted to measure emission factors for CO, CO₂, NO_x, C_xH_y, and PM_{2.5} in rice, wheat, beans, rape, maize, cotton, and peanut straw. The straw crop yield in Southern China ranged from 59.361 Mt to 185.890 Mt during the study period; the lowest being in Fujian Province and the highest being in Yunnan Province. The total amount of field combustion ranged from 13.629 Mt (in Fujian Province) to 41.902 Mt (in Guangdong Province). The average emission factors for CO, CO₂, NO_x, C_xH_y, and PM_{2.5} from combustion of straw crops were 165.32, 1 231.76, 1.94, 38.47 g·kg⁻¹, and 7.54 g·kg⁻¹, respectively. Emissions of CO, CO₂, NO_x, C_xH_y, and PM_{2.5} from simulated burning experiments were 18 926.32, 149 866.73, 153.13, 6 467.09 kt, and 870.33 kt, respectively. Rice

收稿日期: 2017-08-14 录用日期: 2017-09-27

作者简介: 杨夏捷(1992—), 男, 硕士研究生, 从事林火生态学研究。E-mail: fafuyxj@126.com

* 通信作者: 郭福涛 E-mail: guofutao@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(KAa17023A, 31400552); 福建农林大学杰出青年基金项目(XJQ201613); 福建农林大学国际科技合作与交流项目(KXB16008A)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(KAa17023A, 31400552); Fujian Agriculture and Forestry University Funds for Distinguished Young Scholar(XJQ201613); International Science and Technology Cooperation Program of Fujian Agriculture and Forestry University(KXB16008A)

was the main source of air pollutants throughout the study areas, accounting for 61.16% to 84.83% of all types of pollutants. The temporal distribution of pollutants varied in each province, with emissions of pollutants having a decreasing trend in Fujian and an increasing trend in Guangdong, Guangxi, and Yunnan. The spatial pattern of pollution emissions was explicit, with a high area of air pollutant emission per unit grid in Guangdong, central Guangxi, and Eastern Yunnan, while it was relatively low and dispersed in Fujian Province. It can be concluded that burning crop residue contributes to environmental pollution in the study areas; thus, efforts should be made to develop alternative crop residue management techniques.

Keywords: indoor simulation experiments; emission factors; air pollutants; emission inventory; temporal and spatial variation

生物质燃烧一直被视为大气污染物的来源之一。作为生物质燃烧的一种重要形式,农作物秸秆露天燃烧能够释放大量颗粒物和CO、NO_x等污染性气体,对生态环境和人体健康产生重要影响^[1]。随着农村经济水平的不断提高以及能源结构的改变,秸秆露天焚烧的现象日趋严重,不仅造成了生物资源的浪费,而且容易引发火灾、污染大气,并引发了广泛的环境与社会问题,因而受到国内外学者的关注^[2-3]。

目前,国内关于秸秆燃烧污染物排放量的估算研究已有报道,但存在研究时间跨度较短、研究区域集中等问题^[4-7]。此外,国内外多数研究中污染物排放因子均选取不同研究的平均值,但由于不同研究中农作物的种植品种及实际生长环境之间往往存在较大差异,根据平均排放因子所计算出的结果容易产生较大误差。华南农产品主产区是我国“七区二十三带”农业战略布局的重要组成部分,同时也是南方地区重要的农业产地,农作物秸秆资源丰富,其露天燃烧造成的环境污染问题也不容忽视。然而,目前国内关于该地区秸秆燃烧污染物排放的研究较少。鉴于此,本文基于自行设计的生物质燃烧烟气分析实验室,对产自华南主产区水稻、玉米等7种主要农作物秸秆燃烧释放大气污染物(CO、CO₂、C_xH_y、NO_x和PM_{2.5})的排放因子进行同标准计算。同时,结合统计年鉴估算华南主产区4省2005—2014年不同污染物的排放总量,并分析其时空分布规律。研究结果可为该地区空气质量分析提供更为准确的基础数据,并为推进秸秆露天燃烧导致的环境污染研究提供数据支持。

1 研究区域概况

华南农产品主产区,包括福建、广东、广西和云南4省^[8],地处北纬20°15′~28°20′,东经97°30′~120°40′,横跨中国东、西部,土地面积约93.05万km²。该地区属于亚热带气候区,年平均降水量约为1600mm,年均气温16.8~22.1℃。华南主产区土壤肥沃,雨水和日照条件充足,是我国以优质高档籼稻为主的优

质水稻产业带。华南主产区农业发达,农作物秸秆焚烧情况严重。根据卫星火点数据显示,研究区域2005—2014年秸秆露天燃烧火点个数为29773个。其中,福建东部、西北部,广西东部、云南东部及广东全省均有较高的农田火密度(图1)。

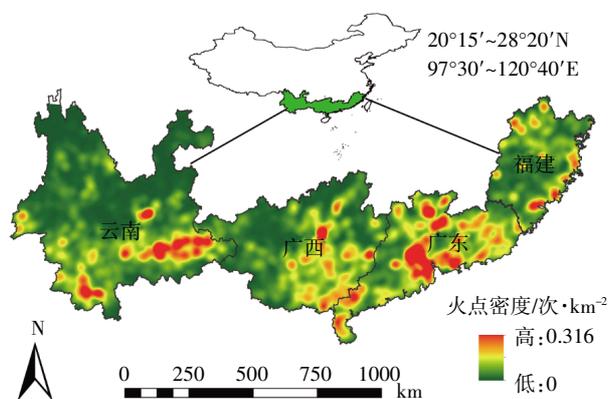


图1 研究区域示意图

Figure 1 Sketch map of the study area

2 材料与方法

2.1 材料

2.1.1 试验材料

材料的选取和处理参照国内外相关研究成果^[9-11]。本试验选用来自研究区域内广泛种植的水稻(浙福802、双桂1号、II优3301)、小麦(M76优3301、云麦39号)、豆类(华夏1号、华夏3号)、油菜(南油10号、浙油28)、玉米(桂单589、闽紫糯1号)、棉花(中棉所63)和花生(粤油18、闽花6号)秸秆。在清除表面泥土杂物后,为模拟真实燃烧情况,将上述不同品种的7种农作物秸秆分别自然晾干。为便于充分燃烧,并结合燃烧装置的实际大小,将已晾干的秸秆样本分别剪成6cm左右长度。之后,将各农作物秸秆依次在分析天平上称重(精度:0.01g),并将每种作物分为3组。先将每组各称量30g,作为燃烧样本;之后,

将各组秸秆及其燃烧后的灰分研磨,依次在十万分之一电子天平(精度:0.000 01 g)上精确称取 0.1 g,分别用锡箔纸包好,作为碳元素分析样本。

2.1.2 数据来源

本次研究所使用的卫星火点数据来自于分辨率高且适用于中国区域的 MODIS 林火数据^[12],精度为 1 km。利用 ArcGIS 10.2 软件,结合中国植被功能型图(精度 1 km),提取 2005—2014 年研究区域内农田火点数据,包括每个火点的起火时间和地理坐标。同时,根据华南农产品主产区 4 个省份的统计年鉴(2006—2015 年),得到各省水稻、小麦、豆类、油菜、玉米、棉花和花生等农作物在 2005—2014 年的年产量(Mt)。并广泛参考前人相关研究^[13-17],以其对研究区域各省不同作物秸秆系数的平均值作为本研究的计算标准(表 1),从而得到华南主产区各省 7 种作物的秸秆产量。通过查阅相关文献^[18-19],得到研究区域各省农作物秸秆的露天燃烧比例(表 2)。同时,根据李瑞敏等^[20]、Zarate 等^[21]和 Wang 等^[22]的研究结论,认为各农作物的平均露天燃烧效率为 80%。

表 1 各地区不同作物秸秆系数

Table 1 Residue to product ratio of various crops in different regions

地区	水稻	小麦	豆类	油菜	玉米	棉花	花生
福建	0.991	1.179	1.588	2.955	1.265	3.078	1.252
广东	1.081	1.158	1.588	2.955	1.265	3.078	1.324
广西	1.024	1.143	1.588	2.955	1.268	3.078	1.324
云南	1.135	1.137	1.588	2.955	1.265	3.078	1.324

表 2 各地区秸秆露天燃烧比例(%)

Table 2 Ratio of field combustion of crop straw in different regions(%)

地区	燃烧比例/%
福建	28.70
广东	37.35
广西	25.20
云南	21.30

2.2 仪器和设备

Testo350 升级型烟气分析仪(德国);TSI8533 颗粒物分析仪(美国);自主设计燃烧装置体系(图 2);Elementar Analysensysteme GmbH vario macro cube 型微量碳氮元素分析仪(德国)。

2.3 实验过程与方法

2.3.1 样本燃烧

真实秸秆燃烧时由于处于堆积状态,在燃烧初期存在不完全燃烧的过程。但由于很难判断出秸秆燃烧过程中充分和不充分燃烧的比例,因此,在大尺度大区域污染物排放估算时,同时考虑上述两种燃烧状态较为困难。根据多次试验结果显示,温度控制在 180 °C 时秸秆进入不充分燃烧状态。此时,根据秸秆露天燃烧真实情况,将样本以堆压的形式放入燃烧箱内,并迅速关闭箱门。随着燃烧进行,温度达到 280 °C 后,进入充分燃烧阶段。为实现充分燃烧,每个样本的燃烧过程持续 40 min。

2.3.2 气态污染物排放测定

农作物秸秆燃烧时会排放出大量污染性气体。其中,CO、CO₂、NO_x 和 C_xH_y 等气态污染物运用 Testo350

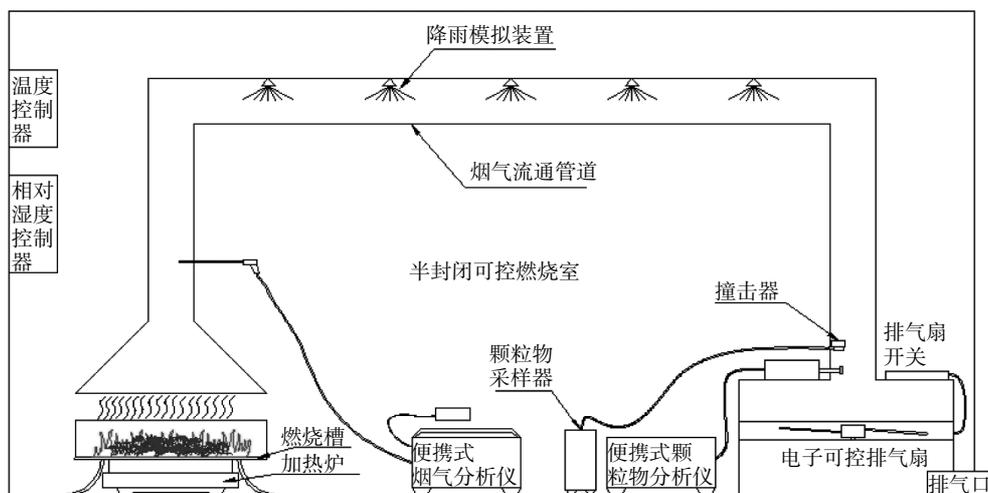


图 2 燃烧装置示意图

Figure 2 Sketch map of the combustion system

升级型烟气分析仪实时监测。该仪器基于分光红外在线监测仪器测定烟气中的污染性气体。仪器记录数据间隔5 s, CO、CO₂、NO_x和C_xH_y的测量精度分别为1 μL·L⁻¹、0.01%、1 μL·L⁻¹和1 μL·L⁻¹。

2.3.3 颗粒物排放测定

不同农作物秸秆在燃烧过程中产生的细小颗粒物(PM_{2.5})通过TSI8533颗粒物分析仪实时监测。该仪器基于分光红外在线监测仪器测定烟气中的颗粒物浓度。仪器记录数据间隔5 s, PM_{2.5}的测量精度为0.001 mg·m⁻³。为保证颗粒物浓度测量的准确性,试验过程中将仪器连接的烟气导引通道的长度适当增大,并通过实验室内设空调进行温度调节,从而保证PM_{2.5}采集进样口的温度接近于室温。

2.3.4 碳元素含量测定

将研磨好的各组农作物秸秆及其燃烧灰分别用包样器包好,作为元素分析样本,依次放入微量碳氮元素分析仪中,分别测得每个样本中碳元素的含量(%)并记录。每个样本的分析时间约为20 min。

2.4 数据计算与分析

2.4.1 排放因子计算

本研究采用碳守恒的方法来计算排放因子^[23]。该方法的基本假设是燃料中的碳排放主要以气态CO₂、CO、总碳氢(THC)和颗粒物形态的碳形式存在,根据元素守恒原则,分别计算CO₂、CO、NO_x、C_xH_y和PM_{2.5}的排放因子。

设定一个不完全燃烧系数PIC:

$$PIC = \frac{C_{C-CO} + C_{C-PM} + C_{C-THC}}{C_{C-CO_2}} \quad (1)$$

式中: C_{C-CO} 、 C_{C-PM} 、 C_{C-THC} 和 C_{C-CO_2} 分别表示CO、颗粒物、THC和CO₂的碳排放。

则CO₂的排放因子可利用公式(2)计算:

$$EF_{CO_2} = \frac{(C_f - C_a) f_{CO_2}}{(PIC + 1)M} \quad (2)$$

式中: EF_{CO_2} 、 C_f 、 C_a 、 f_{CO_2} 分别代表CO₂排放因子、燃料碳质量、灰分碳质量、CO₂中碳和CO₂的转换因子(即44/12=3.67); M 代表燃料质量。

目标化合物的排放因子,可以通过目标化合物浓度和CO₂浓度之比与CO₂排放因子相乘得到,即公式(3):

$$EF_i = \frac{C_i}{C_{CO_2}} \times EF_{CO_2} \quad (3)$$

式中: EF_i 、 C_i 、 C_{CO_2} 、 EF_{CO_2} 分别代表目标化合物排放因子、目标化合物浓度、CO₂浓度和CO₂排放因子。

2.4.2 秸秆露天燃烧量计算

秸秆露天燃烧量利用公式(4)计算^[24]:

$$M = \sum (P_n \times N_n \times B \times \eta) \quad (4)$$

式中: M 为作物燃烧量,t; P_n 为第 n 种作物的产量,t; N_n 为第 n 种作物的秸秆系数; B 为秸秆露天燃烧比例; η 为秸秆的露天燃烧效率。

2.4.3 秸秆燃烧排放污染物计算

基于室内模拟计算出各类农作物秸秆的排放因子,利用公式(5)计算研究区域各省排放的气体污染物总量^[24]:

$$E = 10^{-3} \times \sum M_i \times EF_i \quad (5)$$

式中: E 为污染性气体排放量,t; M_i 为第 i 种生物质的燃烧量,t; EF_i 为第 i 种物质燃烧后污染性气体的排放因子,g·kg⁻¹。

2.5 华南主产区秸秆露天燃烧污染物排放时空特性

由于农作物秸秆燃烧具有较强的空间差异性,传统监测方法很难准确揭示其空间分布情况。而具有时效性强、分辨率高、覆盖范围广等特点的卫星数据,近年来被广泛应用于揭示污染物时空分布特性^[25]。本研究在MODIS林火数据基础上,将整个研究区域网格化(10 km×10 km),计算各省不同污染物的网格排放强度及空间分布;同时,运用Mann-Kandell趋势检验法,分析华南主产区各省2005—2014年CO、CO₂、NO_x、C_xH_y和PM_{2.5}等污染物排放情况的年尺度时间变化趋势及其显著性。Mann-Kandell趋势检验法是一种非参数统计检验方法。该方法不需要样本遵循一定的分布规律,且不受少量异常值的干扰,因此被广泛用于检验时间序列上的数据变化趋势^[26]。

3 结果与讨论

3.1 污染物排放因子计算

本试验和相关研究结果^[10-11]表明,在种植环境相近的情况下,同种作物不同品种之间的污染物排放因子没有明显差别。因此,使用同种作物不同品种的平均排放因子作为污染物估算的排放因子更符合大尺度范围污染物排放估算的要求(表3)。结果表明,不同农作物秸秆燃烧计算出的同一污染物的排放因子变化范围不大。同时,表3也列出国内外学者对于农作物秸秆燃烧污染物排放因子的研究结果^[27-30]。从表中数据对比可以看出,本试验得出排放因子与国内外类似实验条件下得出的结论比较接近,说明本试验所采用的方法同国外燃烧试验方法具有一定的可比性。由于本试验中秸秆燃烧过程包含了挥发性物质的释

表 3 不同秸秆燃烧污染物排放因子($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 3 Emission factors of contaminants from different types of straw burning($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

秸秆种类	品种	污染物种类				
		CO	CO ₂	NO _x	C _x H _y	PM _{2.5}
水稻	浙福 802	141.23±14.78	1 557.91±52.82	1.12±0.19	63.22±23.12	6.28±1.59
	双桂 1 号	174.81±10.89	1 047.72±32.58	0.91±0.23	78.67±11.84	7.83±1.69
	Ⅱ优 3301	153.28±12.37	1 138.67±43.25	1.39±0.47	58.35±18.17	6.73±1.98
	平均值	156.44±12.68	1 248.1±42.88	1.14±0.30	66.78±17.71	6.95±1.75
小麦	M76 优 3301	147.63±24.42	1 239.84±45.38	0.98±0.28	26.61±2.36	8.70±0.89
	云麦 39 号	162.49±27.16	1 231.77±45.37	1.15±0.22	30.80±2.86	5.81±0.69
	平均值	155.06±25.79	1 235.81±45.38	1.07±0.25	28.71±2.61	7.26±0.79
豆类	华夏 1 号	168.49±26.28	1 355.97±46.73	1.39±0.27	24.06±2.62	8.17±2.76
	华夏 3 号	176.09±16.04	1 341.63±31.17	0.85±0.09	27.70±2.78	12.47±3.86
	平均值	172.29±21.16	1 348.77±38.95	1.12±0.18	25.88±2.70	10.15±3.31
油菜	南油 10 号	117.55±18.22	1 079.86±43.92	3.47±0.99	6.94±3.01	3.28±1.98
	浙油 28	168.13±7.85	905.77±21.54	4.69±0.76	6.72±4.34	5.54±2.40
	平均值	142.84±13.04	992.82±32.73	4.08±0.88	6.83±3.68	4.41±2.19
玉米	桂单 589	154.20±21.73	1 341.48±49.24	1.83±0.05	17.90±7.45	8.97±1.43
	闽紫糯 1 号	162.27±31.31	1 320.43±67.26	0.91±0.23	11.45±1.71	7.82±0.95
	平均值	158.24±26.52	1 330.96±58.25	1.36±0.14	14.68±4.58	8.40±1.19
棉花	中棉所 63	172.40±4.84	1 253.31±27.75	2.49±0.23	44.76±9.65	8.54±2.83
花生	粤油 18	193.99±3.68	1 130.73±9.98	2.47±0.27	73.21±3.98	7.32±1.51
	闽花 6 号	205.97±7.06	1 294.35±13.06	2.15±0.39	90.07±5.44	6.84±1.44
	平均值	199.98±5.37	1 212.54±11.52	2.31±0.33	81.64±4.71	7.08±1.48
相关文献		110.6±37.9 ^[27]	1 248.8±8.7 ^[27]	3.3±1.7 ^[27]	10.53±4.87 ^[27]	9.85±4.11 ^[27]
		141.2±14.8 ^[28]	1787±36 ^[28]	1.70±1.68 ^[28]	29.00±12.12 ^[29]	18.3±13.5 ^[28]
		170.3±12.3 ^[29]	1350±16 ^[29]	2.5±1.0 ^[30]	53±19 ^[30]	4.12±1.10 ^[29]
		199.9±32.7 ^[30]	1515±177 ^[30]			12.1±4.4 ^[30]

放、明显火焰的出现和灰烬形成等阶段,与田间露天燃烧的真实过程基本相符,并在试验过程中通过调节温度,使排放因子在计算中包含了充分和不充分 2 种燃烧状态。因此,造成上述差异的主要原因是农作物的生长环境。本试验分别选择每种农作物在研究区域广泛种植的不同品种进行室内模拟燃烧及计算分析,并以各品种排放因子平均值作为该作物秸秆在研究区域的排放因子。因此,相比国内外目前以单一品种试验及选择不同文献排放因子均值的排放估算,本研究统一了试验方法和条件,研究结果更能体现研究区域的实际情况,对于该地区污染物排放清单估算的准确性较高。

3.2 华南主产区农作物秸秆产量与露天燃烧量

表 4 为 2005—2014 年福建、广东、广西和云南各省秸秆产量和露天燃烧量清单。结果显示,作物秸秆产量和燃烧情况存在较明显的空间差异。2005—2014 年华南主产区农作物秸秆总产量为 542.37 Mt, 秸秆

露天燃烧总量为 118.84 Mt, 秸秆露天燃烧比例为 21.91%。这与赵建宁等^[31]的研究结论相近。其中,广东省农作物秸秆露天燃烧所占比例最高,为 29.88%,其次为福建、广西和云南。Cao 等^[32]的研究结果表明,农民的收入水平和秸秆利用成本是影响该地区秸秆露天燃烧的主要因素。广东和福建地处我国东南沿海,农业经济较为发达,秸秆的露天燃烧量较高;而广西和云南位于我国西南地区,其农村经济发展水平和农村人口密度较低,因此燃烧比例较低。

3.3 华南主产区农作物秸秆燃烧污染物排放清单

表 5 为 2005—2014 年华南农产品主产区 CO、CO₂、NO_x、C_xH_y 和 PM_{2.5} 等大气污染物排放量清单。其中,广东 CO、CO₂、NO_x、C_xH_y 和 PM_{2.5} 的排放总量占研究区域总排放量的比例最高,分别为 35.53%、35.02%、34.34%、41.21%和 34.29%;福建比例最低,分别为 11.49%、11.39%、10.96%、13.29%和 11.21%。该结果同苏继峰等^[33]对于研究区域的结论趋势相同。

表4 估算各省农作物秸秆产量和露天燃烧量(Mt)

Table 4 Estimation of crop straw yield and amount of field burning in different provinces(Mt)

项目	省份	农作物类型						
		水稻	小麦	豆类	油菜	玉米	棉花	花生
秸秆产量	福建	50.398	0.139	3.222	0.468	1.969	0.003	3.162
	广东	116.201	0.067	3.200	0.245	8.994	0	11.530
	广西	116.402	0.077	4.367	0.758	28.947	0.063	6.269
	云南	72.734	10.015	16.951	11.207	74.141	0.001	0.841
秸秆燃烧量	福建	11.571	0.032	0.740	0.107	0.452	0.001	0.726
	广东	34.721	0.020	0.956	0.073	2.687	0	3.445
	广西	23.467	0.016	0.880	0.153	5.836	0.013	1.264
	云南	12.394	1.707	2.888	1.910	12.634	0.001	0.143

表5 华南主产区各省2005—2014年秸秆露天焚烧大气污染物排放清单(kt)

Table 5 Municipal emission inventory of crop straw open burning of Southern China main producing areas of agricultural products during 2005—2014(kt)

省份	CO	CO ₂	NO _x	C _x H _y	PM _{2.5}
福建	2 174.83±180.49	17 069.05±564.71	16.79±3.97	859.47±268.76	97.58±24.61
广东	6 724.29±551.74	52 476.69±1 725.73	52.59±12.05	2 665.20±911.38	298.45±72.52
广西	5 025.42±480.19	39 962.59±1 401.17	39.27±8.49	1 780.80±548.61	230.89±53.26
云南	5 001.78±622.99	40 358.41±1 521.50	44.49±8.11	1 161.62±308.33	243.41±52.07

陆柄等^[34]曾研究大陆地区各省2007年生物质露天燃烧污染物的排放情况,其计算的华南主产区各省CO、CO₂、NO_x和PM_{2.5}的排放量估算值高于本研究结论。原因在于陆柄等估算的农作物秸秆包括薯类、芝麻和谷类。而田贺忠等^[35]对于2007年研究区域内各类污染物的排放量估算值均显著高于本研究结果,原因是田贺忠等计算了所有农作物秸秆室内和露天燃烧的排放总量,而本文仅研究了水稻等7类农作物秸秆露天燃烧下的污染物排放情况。

3.4 华南主产区农作物秸秆燃烧污染物排放空间分布

图3至图7为各类污染物10 km×10 km分布情况。结果显示,华南农产品主产区2005—2014年农作物秸秆燃烧污染物排放空间上分布不均匀。其中,CO₂、C_xH_y和PM_{2.5}的单位排放强度较大,分布较为分散,CO和NO_x单位排放强度较低且较为集中。此外,各省排放情况也有所不同,广东中部和云南东部是排放强度较大的区域,广西中部地区污染物排放较为集中,而福建全省秸秆燃烧污染物排放量较少,分布也

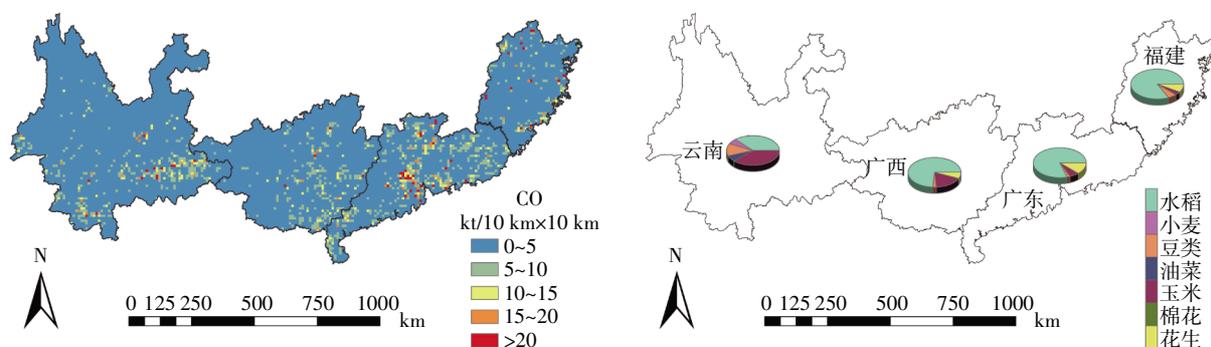


图3 2005—2014年华南农产品主产区不同农作物秸秆燃烧CO排放量空间分布

Figure 3 Regional distribution of total emissions of CO from different straw burning in Southern China main producing areas of agricultural products during 2005—2014

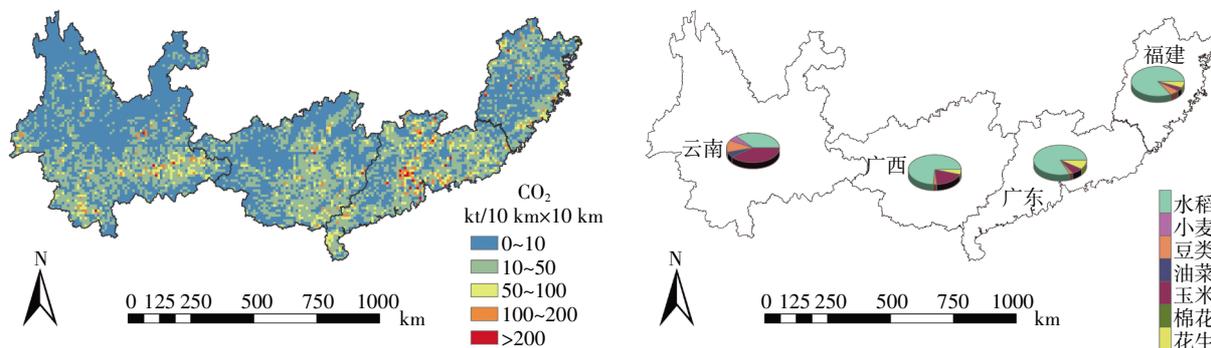


图 4 2005—2014 年华南农产品主产区不同农作物秸秆燃烧 CO_2 排放量空间分布

Figure 4 Regional distribution of total emissions of CO_2 from different straw burning in Southern China main producing areas of agricultural products during 2005—2014

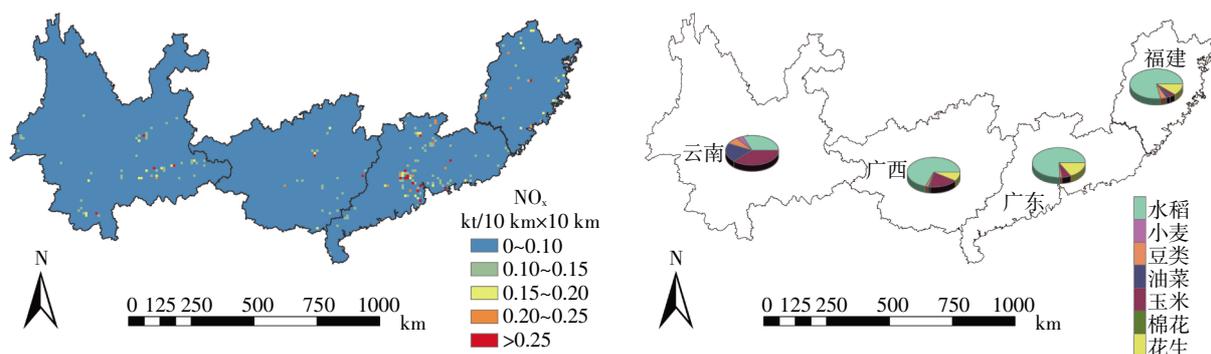


图 5 2005—2014 年华南农产品主产区不同农作物秸秆燃烧 NO_x 排放量空间分布

Figure 5 Regional distribution of total emissions of NO_x from different straw burning in Southern China main producing areas of agricultural products during 2005—2014

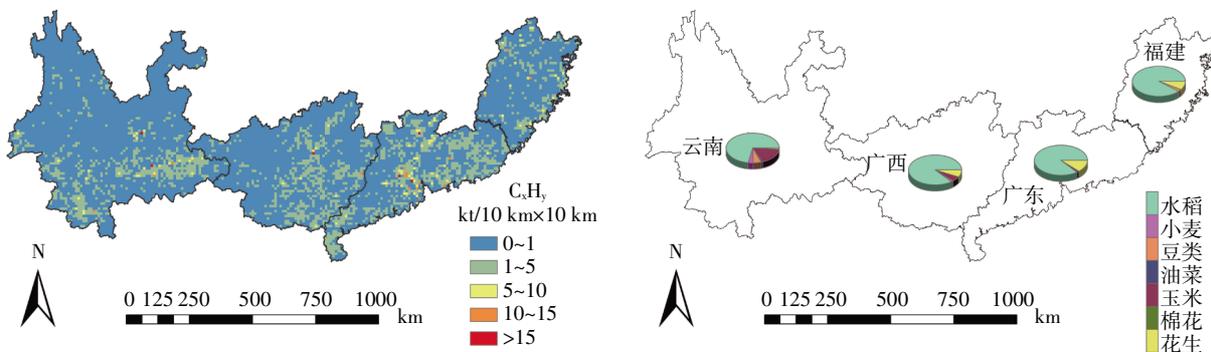


图 6 2005—2014 年华南农产品主产区不同农作物秸秆燃烧 C_xH_y 排放量空间分布

Figure 6 Regional distribution of total emissions of C_xH_y from different straw burning in Southern China main producing areas of agricultural products during 2005—2014

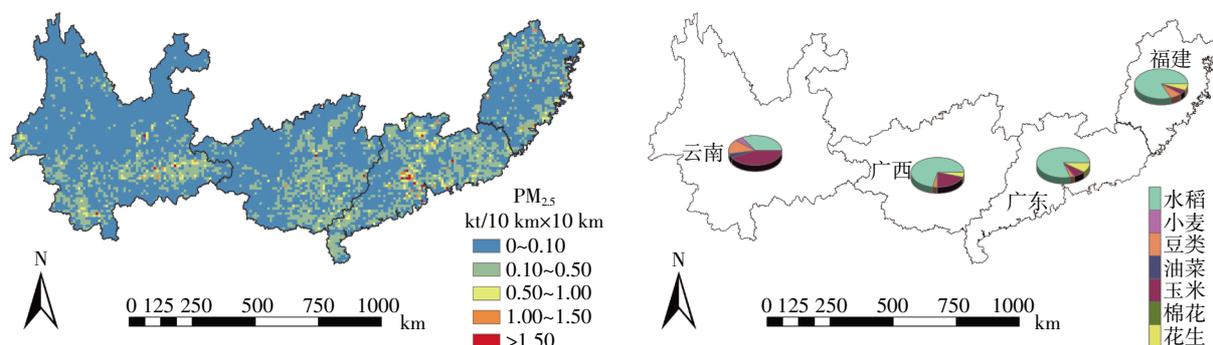


图7 2005—2014年华南农产品主产区不同农作物秸秆燃烧PM_{2.5}排放量空间分布

Figure 7 Regional distribution of total emissions of PM_{2.5} from different straw burning in Southern China main producing areas of agricultural products during 2005—2014

较为分散。

此外,不同农作物对于不同污染物的贡献程度也存在差异。研究表明,2005—2014年,水稻对研究区域CO、CO₂、NO_x、C_xH_y和PM_{2.5}排放总量的贡献率依次为67.91%、68.42%、61.16%、84.83%和65.60%;小麦的贡献率依次为1.45%、1.46%、1.24%、0.79%和1.48%;豆类的贡献率依次为4.97%、4.92%、4.00%、2.19%和6.37%;油菜的贡献率依次为1.69%、1.49%、5.98%、0.24%和1.14%;玉米的贡献率依次为18.07%、19.19%、19.19%、4.97%和20.86%;棉花的贡献率依次为0.01%、0.01%、0.02%、0.01%和0.01%;花生的贡献率依次为5.89%、4.51%、8.42%、7.04%和4.54%。

3.5 华南主产区农作物秸秆燃烧污染物排放时间变化

图8显示,2005—2014年华南主产区各省农作物燃烧各类污染物的排放具有明显的时间差异性。结果表明,相同省份不同污染物的变化情况总体趋势一致。其中,福建10年内各污染物排放情况较为平稳,总体呈下降趋势;广东、广西和云南污染物排放尽管存在波动,但总体均呈上升趋势。造成上述污染物排放量时间差异的原因主要是各省农作物播种面积的变化。根据研究区域各省统计年鉴显示,福建2005—2014年农作物播种面积逐年减少,其余各省播种面积总体均呈上升趋势。这与付雨晴等^[36]对于研究区域的结论一致。

此外,不同污染物变化趋势也存在一定的时空异质性。Mann-Kandell趋势检验结果显示(图9),2005—2014年,广东NO_x、广西PM_{2.5}排放呈显著上升,其余各污染物上升趋势并不显著;云南各类污染物排放均呈显著上升趋势,福建各污染物排放变化趋势均不

显著。

3.6 排放清单不确定性讨论

污染物排放清单的建立,受排放因子、秸秆露天燃烧效率、燃烧比例、秸秆系数以及燃烧状态比例等多重因素的影响。由于本研究中不同污染物排放因子源于室内模拟试验同标准实测,且秸秆系数、露天燃烧效率等数据来源充分,因此,影响本文排放清单不确定性的主要因素在于秸秆露天燃烧比例以及真实燃烧过程中不同燃烧状态的比例。由于目前对我国秸秆露天燃烧情况的研究情况及统计数据较少,因此对本文排放清单的不确定性造成一定影响。此外,真实秸秆燃烧时存在充分和不充分2个过程。但由于在真实燃烧过程中较难确定2种燃烧状态所占比例,因此,在大区域长时间尺度污染物排放估算时,同时准确考虑2种燃烧过程较为困难。本研究在模拟实验的设计中,尽量模拟真实情况,通过温度调节模拟充分和不充分2个燃烧过程。由于各污染物的排放因子计算是基于实时记录的数据,因此理论上,排放因子及污染物排放量的计算结果中也包含了不充分燃烧过程。尽管如此,还是与真实的露天燃烧情况有所偏差,这也是今后研究的方向。

4 结论

(1)通过室内模拟试验,实测华南主产区7种农作物秸秆燃烧CO平均排放因子范围142.84~199.98 g·kg⁻¹;CO₂平均排放因子范围992.82~1348.77 g·kg⁻¹;NO_x平均排放因子范围1.07~4.08 g·kg⁻¹;C_xH_y平均排放因子范围6.83~81.64 g·kg⁻¹;PM_{2.5}平均排放因子范围4.41~10.15 g·kg⁻¹。

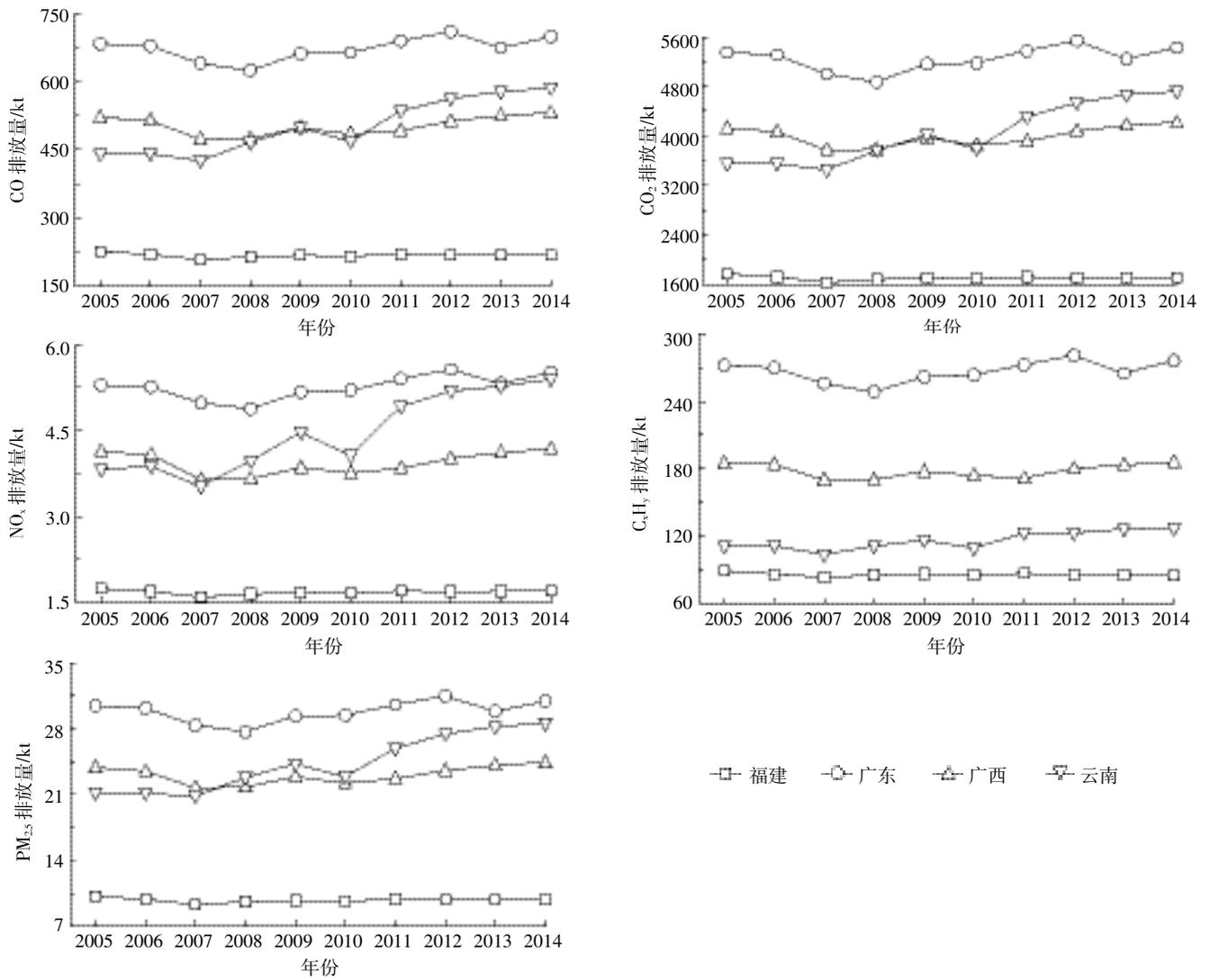


图 8 华南主产区各省 2005—2014 年污染物排放量时间变化

Figure 8 Time variation of pollutant discharge of Southern China during 2005—2014

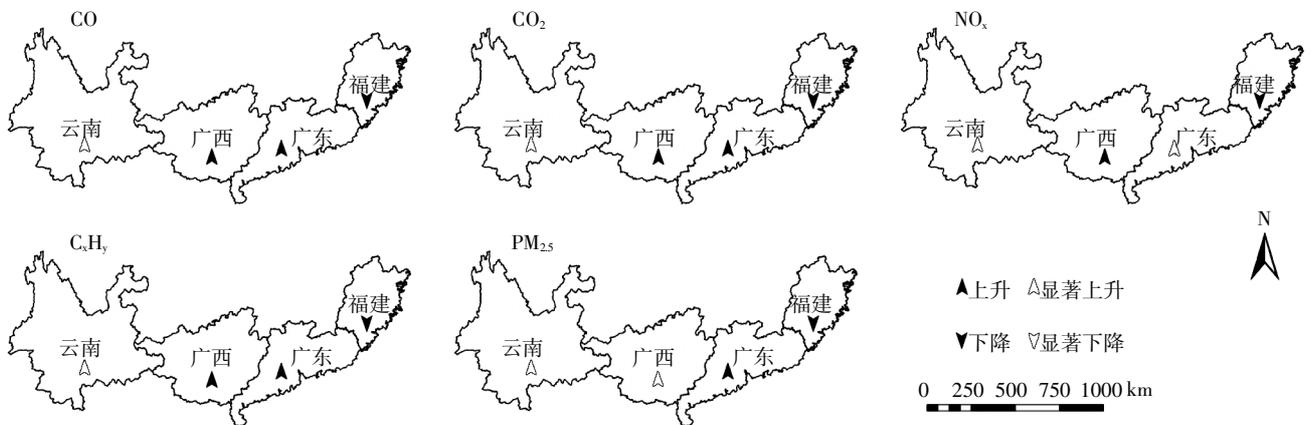


图 9 华南主产区各省 2005—2014 年污染物排放量趋势变化

Figure 9 Trend variation of pollutant discharge of Southern China during 2005—2014

(2)2005—2014年,华南主产区秸秆年均产量54.24 Mt,秸秆年均露天燃烧11.88 Mt。水稻所占秸秆产量和燃烧量的比例最高,分别为65.59%和69.13%;小麦和棉花最低,不足5%。

(3)华南主产区2005—2014年CO、CO₂、NO_x、C_xH_y和PM_{2.5}的排放总量依次为18 926.32、149 866.73、153.13、6 467.09 kt和870.33 kt。其中,广东大气污染物排放占总体比例最高,范围34.34%~41.21%;福建最低,范围10.96%~13.29%。

(4)广东、广西中部和云南东部地区秸秆燃烧污染物网格排放强度较大且集中,福建全省污染物排放量相对较少且分散。水稻和玉米是研究区域污染物排放的重要来源。

(5)2005—2014年,福建CO、CO₂、NO_x、C_xH_y和PM_{2.5}的排放呈下降趋势但不显著,广东NO_x、广西PM_{2.5}及云南各类污染物的排放呈显著上升趋势。

参考文献:

- [1] Yang H H, Tsai C H, Chao M R, et al. Source identification and size distribution of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons during rice straw burning period[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(7): 1266-1274.
- [2] Li L J, Wang Y, Zhang Q, et al. Wheat straw burning and its associated impacts on Beijing air quality[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(3): 403-414.
- [3] 刘晓慧, 马翠平, 赵玉广, 等. 2014年河北中南部两次重霾天气成因分析[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(6): 1621-1629.
LIU Xiao-hui, MA Cui-ping, ZHAO Yu-guang, et al. Formation mechanism of two severe haze episodes over central and Southern Hebei in 2014[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(6): 1621-1629.
- [4] 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.
CAO Guo-liang, ZHANG Xiao-ye, GONG Shan-ling, et al. Emission inventories of primary particles and pollutant gases for China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(3): 261-268.
- [5] 刘丽华, 蒋静艳, 宗良纲. 秸秆燃烧比例时空变化与影响因素: 以江苏省为例[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(9): 1535-1545.
LIU Li-hua, JIANG Jing-yan, ZONG Liang-gang. The spatial-temporal variation of the burning proportion of crop straw and its influencing factors: A case study of Jiangsu Province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(9): 1535-1545.
- [6] 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.
ZHENG You-fei, TIAN Hong-wei, CHEN Huai-liang, et al. Estimation of pollutants emission from straw burning in summer in Henan Province [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(8): 1590-1594.
- [7] 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.
FU Le, WANG Shan-shan, WU Zhi-li, et al. Estimation of air pollutant emissions from straw residues open burning in Henan Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(4): 808-816.
- [8] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要[N]. 人民日报, 2011-03-17(1版).
The Twelfth Five-Year Plan[N]. *People's Daily*, 2011-03-17(1st Edition).
- [9] Zhang H F, Ye X N, Cheng T T, et al. A laboratory study of agricultural crop residue combustion in China: Emission factor and emission inventory[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(36): 8432-8441.
- [10] 洪蕾, 刘刚, 杨孟, 等. 稻草烟尘中有机碳/元素碳及水溶性离子的组成[J]. *环境科学*, 2015, 36(1): 25-33.
HONG Lei, LIU Gang, YANG Meng, et al. Composition of organic carbon/elemental carbon and water-soluble ions in rice straw burning[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(1): 25-33.
- [11] 祝斌, 朱先磊, 张元勋, 等. 农作物秸秆燃烧PM_{2.5}排放因子的研究[J]. *环境科学研究*, 2005, 18(2): 29-33.
ZHU Bin, ZHU Xian-lei, ZHANG Yuan-xun, et al. Emission factor of PM_{2.5} from crop straw burning[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, 18(2): 29-33.
- [12] Amraoui M, Pereira M G, Dacamura C C, et al. Atmospheric conditions associated with extreme fire activity in the Western Mediterranean region[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, s524/525: 32-39.
- [13] 王晓玉, 薛帅, 谢光辉. 大田作物秸秆量评估中秸秆系数取值研究[J]. *中国农业大学学报*, 2012, 17(1): 1-8.
WANG Xiao-yu, XUE Shuai, XIE Guang-hui. Value-taking for residue factor as a parameter to assess the field residue of field crops[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(1): 1-8.
- [14] 谢光辉, 韩东倩, 王晓玉, 等. 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.
XIE Guang-hui, HAN Dong-qian, WANG Xiao-yu, et al. Harvest index and residue factor of cereal crops in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(1): 1-8.
- [15] 谢光辉, 王晓玉, 韩东倩, 等. 中国非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): 9-17.
XIE Guang-hui, WANG Xiao-yu, HAN Dong-qian, et al. Harvest index and residue factor of non-cereal crops in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(1): 9-17.
- [16] 刘刚, 沈镭. 中国生物质能源的定量评价及其地理分布[J]. *自然资源学报*, 2007, 22(1): 9-19.
LIU Gang, SHEN Lei. Quantitative appraisal of biomass energy and its geographical distribution in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(1): 9-19.
- [17] 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.
HAN Lu-jia, YAN Qiao-juan, LIU Xiang-yang, et al. Straw resources and their utilization in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(3): 87-91.
- [18] 孙剑峰. 中国农作物秸秆露天燃烧排放大气污染物的实验室模拟[D]. 济南: 山东大学, 2016.

- SUN Jian-feng. A laboratory study on emission characteristics of gaseous and particulate pollutants emitted from agricultural crop residue open burning in China[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [19] 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.
- PENG Li-qun, ZHANG Qiang, HE Ke-bin. Emissions inventory of atmospheric pollutants from open burning of crop residues in China based on a national questionnaire[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(8): 1109-1118.
- [20] 李瑞敏, 童全松, 陈卫卫, 等. 东北地区农业源一次颗粒物排放清单研究[J]. 中国环境科学, 2016, 36(6): 1601-1609.
- LI Rui-min, TONG Quan-song, CHEN Wei-wei, et al. Primary particulate matter (PM) emission inventory from agricultural activities in Northeastern China[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(6): 1601-1609.
- [21] Ortiz de Zárate I, Ezcurra A, Lacaux J P, et al. Emission factor estimates of cereal waste burning in Spain [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(19): 3183-3193.
- [22] Wang Q, Geng C, Lu S H, et al. Emission factors of gaseous carbonaceous species from residential combustion of coal and crop residue briquettes[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2013, 7(1): 66-76.
- [23] 沈国锋. 室内固体燃料燃烧产生的碳颗粒物和三环芳烃的排放因子及影响因素[D]. 北京: 北京大学, 2012.
- SHEN Guo-feng. Emission factors of carbonaceous particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbons from residential solid fuel combustions[D]. Beijing: Peking University, 2012.
- [24] Lu Z, Zhang Q, Streets D G. Sulfur dioxide and primary carbonaceous aerosol emissions in China and India, 1996—2010[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2011, 11(18): 9839-9864.
- [25] 冯小琼, 陈军辉, 姜涛, 等. 四川省 2005—2014 年农业源氨排放清单及分布特征[J]. 环境科学, 2017, 38(7): 2728-2737.
- FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, et al. Agricultural ammonia emission inventory and its spatial distribution in Sichuan Province from 2005 to 2014[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(7): 2728-2737.
- [26] Neeti N, Eastman J R. A contextual Mann-Kendall approach for the assessment of trend significance in image time series[J]. *Transactions in GIS*, 2011, 15(5): 599-611.
- [27] Wei W, Zhang W, Hu D, et al. Emissions of carbon monoxide and carbon dioxide from uncompressed and pelletized biomass fuel burning in typical household stoves in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 56: 136-142.
- [28] Qin Y, Xie S D. Historical estimation of carbonaceous aerosol emissions from biomass open burning in China for the period 1990—2005[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(12): 3316-3323.
- [29] Zhang Y S, Min S, Yun L, et al. Emission inventory of carbonaceous pollutants from biomass burning in the Pearl River Delta region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 76(5): 189-199.
- [30] Andreae M O. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15(4): 955-966.
- [31] 赵建宇, 张贵龙, 杨殿林. 中国粮食作物秸秆焚烧释放碳量的估算[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(4): 812-816.
- ZHAO Jian-ying, ZHANG Gui-long, YANG Dian-lin. Estimation of carbon emission from burning of grain crop residues in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(4): 812-816.
- [32] Cao G L, Zhang X Y, Wang D, et al. Inventory of atmospheric pollutants discharged from biomass burning in China continent[J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(4): 389-393.
- [33] 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.
- SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, et al. Applications of pollutants released from crop residues at open burning in Yangtze River delta region in air quality model[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(5): 1418-1424.
- [34] 陆炳, 孔少飞, 韩斌, 等. 2007 年中国大陆地区生物质燃烧排放污染物清单[J]. 中国环境科学, 2011, 31(2): 186-194.
- LU Bing, KONG Shao-fei, HAN Bin, et al. Inventory of atmospheric pollutants discharged from biomass burning in China continent in 2007 [J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(2): 186-194.
- [35] 田贺忠, 赵丹, 王艳. 中国生物质燃烧大气污染物排放清单[J]. 环境科学学报, 2011, 31(2): 349-357.
- TIAN He-zhong, ZHAO Dan, WANG Yan. Emission inventories of atmospheric pollutants discharged from biomass burning in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(2): 349-357.
- [36] 付雨晴, 丑洁明, 董文杰. 气候变化对我国农作物宜播面积的影响[J]. 气候变化研究进展, 2014, 54(2): 110-117.
- FU Yu-qing, CHOU Jie-ming, DONG Wen-jie. Impacts of climate change on crop sown area in China[J]. *Progressus Inquisitiones Demutatione Climatis*, 2014, 54(2): 110-117.