

本文引用:王艳,程轲.作物秸秆露天焚烧有害物质排放及其对健康的影响[J].新乡医学院学报,2016,33(10):841-844. DOI:10.7683/xyxyxb.2016.10.001.

尽管秸秆焚烧对全年空气污染的影响相对较小,但在短时间内会突然加剧局部地区的空气污染程度。RYU 等^[13]对韩国农村大麦秸秆焚烧期气溶胶样品的采集、分析结果表明,该期间大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的平均浓度高达 $110.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。VIANA 等^[19]在西班牙的研究发现,水稻秸秆露天焚烧使区域尺度的日均 PM_{10} 浓度平均升高 $10 \sim 15 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,峰值日升高 $30 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。CHENG 等^[20]在台湾的监测结果表明,秸秆焚烧期环境空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{2.5 \sim 10}$ 的浓度显著升高,与非焚烧期相比,细粒子的平均浓度从 $32.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 升至 $123.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,最高值甚至达到 $234.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,远超美国环保署规定的 $\text{PM}_{2.5}$

浓度限值。

近年来的多项研究表明,秸秆焚烧排放会影响人体呼吸系统的正常功能,当吸入足够量时,会引起急性气管炎,伴随咳嗽、呼吸困难和哮喘等症状^[21-22],并对肺功能造成严重影响,对儿童来说,有些影响甚至不可恢复^[23-24]。在秸秆焚烧较为普遍的地区,作物收获期间,距离焚烧源区较远的暴露区的居民表现出与源区居民同样的呼吸系统疾病症状^[25]。秸秆焚烧带来的环境影响和健康危害不单是农村的典型问题,已呈现出农村-城市的区域性特征。

2013 年年初以来,我国连续遭遇多次灰霾天气过程。尽管早在 1999 年,《秸秆焚烧和综合利用管理办法》即规定限制秸秆焚烧,但在中分辨率成像光谱仪监测火点图上仍可以看到,中东部农业发达地区火点密集,秸秆焚烧现象频发。严文莲等^[26]对我国江苏省持续雾霾天气过程的分析表明,江苏及周边省市秸秆焚烧造成的大量气溶胶粒子悬浮于空中是造成持续雾霾天气过程的主要原因。监测还发现,由于秸秆焚烧,我国中东部地区 6 月份的污染物排放量已占全年排放总量的 40%^[27]。在霾污染控制日益受到关注的今天,作为一次 PM_{2.5} 和二次 PM_{2.5} 前体物重要排放源之一的秸秆焚烧源的排放特征研究日益引发关注。

1.2 PAHs PAHs 是分子中含有 2 个以上苯环的碳氢化合物,包括萘、蒽、菲、芘等 150 余种化合物。常见的具有致癌作用的 PAHs 多为 4~6 环的稠环化合物。国际癌症研究中心(international agency for research on cancer, IARC) 1976 年列出了 94 种对实验动物致癌的化合物,其中 15 种属于 PAHs。

秸秆焚烧排放是环境中 PAHs 的重要来源。王真真等^[28]在实验室模拟了玉米、小麦和水稻秸秆的焚烧过程,收集燃烧释放的 PAHs,发现 16 种优控 PAHs 皆有检出,烷基 PAHs 约占总量的 1/3,主要是萘、菲、蒽、荧蒽、芘和屈的烷基衍生物;水稻秸秆燃烧生成的 PAHs 及其烷基衍生物的总量最高,小麦秸秆次之,而玉米秸秆燃烧后的生成量最少;在 16 种优控 PAHs 中,2~4 环的低分子量 PAHs 占多数,而 5~7 环的高分子量 PAHs 较少;PAHs 的生成量随分子量的增加而降低。对于烷基 PAHs,烷基萘占 90% 以上。萘及其烷基衍生物约占 PAHs 总量的 1/2。水稻和小麦秸秆燃烧所释放的 PAHs 在气相

中的量是颗粒相中的 3 倍以上,其烷基衍生物在气相中的量远远高于颗粒相中;而对于玉米秸秆,颗粒物中的 PAHs 及其衍生物高于气相中的量;这种差别主要源于萘的生成量,玉米秸秆燃烧释放的萘类化合物远少于水稻和小麦秸秆。

研究还发现,秸秆露天焚烧使大气中的 PAHs,特别是颗粒态 PAHs 的含量显著升高^[29-30]。YANG 等^[29]采集台湾地区水稻秸秆焚烧期的大气样品,分析了 21 种 PAHs 的含量,结果表明,总 PAHs 中颗粒态平均浓度约为 33.00 ng·m⁻³,气态约为 1 160 ng·m⁻³,高于非焚烧期水平。LU 等^[31]利用实验室燃烧装置模拟了稻秆和豆秸秆的露天焚烧,考察了 16 种 PAHs 的排放情况,稻秆的总 PAHs 排放为 9.29~23.60 μg·g⁻¹,豆秸秆为 3.13~49.90 μg·g⁻¹,在此基础上估算得到每年中国经由稻秆和豆秸秆焚烧排入大气中的 PAHs 可分别达 320.00~357.00 t 和 32.50~76.00 t。

秸秆露天焚烧过程中,燃烧温度、供氧量和秸秆的水分含量均会影响 PAHs 的生成和排放。排放量随燃烧温度升高而增加,随水分含量升高而降低,特别是低分子 PAHs^[31]。KORENAGA 等^[32]研究了稻秆水分含量对 12 种 PAHs 排放的影响,干稻秆的总颗粒态 PAHs 排放因子为 1~38 mg·kg⁻¹,水分含量与排放量呈负相关。另外,燃烧温度也是决定烟气中颗粒态 PAHs 组成的重要因素,挥发性较弱的 5 环和 6 环 PAHs 主要在燃烧的早期阶段形成,易凝结在小颗粒上,而更易挥发的 3 环和 4 环 PAHs 则易在烟温冷却后凝结在较大颗粒上^[33]。

MAZZOLI-ROCHA 等^[34]以甘蔗秸秆为例研究了焚烧排放颗粒物的呼吸毒性,观察了其对暴露小鼠肺功能参数的影响,并将结果与机动车尾气排放颗粒物的影响进行了比较,发现 2 种来源的颗粒物均可对实验小鼠造成实质性损伤,秸秆焚烧排放颗粒物比机动车尾气排放颗粒物对呼吸道功能的损害更为严重。总悬浮颗粒物的组分分析表明,甘蔗秸秆焚烧排放的颗粒物中 PAHs 的含量更高。

1.3 PCDD/Fs PCDD/Fs 是一类典型的剧毒持久性有机污染物,被 IARC 列为一级致癌物。PCDD/Fs 广泛分布于各种环境介质中,化学性质稳定,难以生物降解,且具有生物富集和放大能力,对人类及动、植物危害极大^[35]。PCDD/Fs 主要来源于人类的生产活动^[36],其中,燃烧是其形成的主要途径,含

C、H、O、Cl 的物质在合适条件下便可生成 PCDD/Fs。

生物质燃烧是 PCDD/Fs 的重要来源之一, GULLETT 等^[37]最早研究了农业秸秆焚烧 PCDD/Fs 的排放值,通过收集美国西部 2 个州的小麦和水稻秸秆,模拟田间露天焚烧工况,计算得到排放因子约为 $0.5\text{ ng TEQ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。陈得翼等^[38]研究了生物质燃烧 PCDD/Fs 的排放特性,发现玉米秸秆和稻秆焚烧的 PCDD/Fs 排放因子分别为 $2.59\text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $16.78\text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1}$;对应的国际毒性当量(international toxic equivalent,I-TEQ)浓度分别为 $0.26\text{ ng I-TEQ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.04\text{ ng I-TEQ} \cdot \text{kg}^{-1}$;秸秆和稻草排放的 PCDD/Fs 浓度大于 PCDDs;PCDD/Fs 毒性当量贡献 PCDD/Fs 大于 PCDDs;玉米秸秆和稻秆的 PCDD/Fs 含量分别为 $5.01\text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $21.28\text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1}$,对应的 I-TEQ 含量分别为 $0.01\text{ ng I-TEQ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.62\text{ ng I-TEQ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

SHIH 等^[39]在台湾地区的研究表明,稻秆的露天焚烧是影响环境空气中 PCDD/Fs I-TEQ 浓度的重要因素,焚烧期间,2 个监测区域环境空气中的总 PCDD/Fs 浓度分别约为平时的 4 和 17 倍;如水稻秸秆焚烧达到总量的 10.0%,则秸秆焚烧源在台湾年总 PCDD/Fs I-TEQ 排放中的比例达到 8.1%,如计算周贡献,则秸秆焚烧源的排放比例高达 53.4%,成为 PCDD/Fs I-TEQ 的重要来源。ZHANG 等^[40]估算了 1997~2004 年中国大陆各省份秸秆露天焚烧的 PCDD/Fs 年排放量为 $1\,380\sim1\,520\text{ g I-TEQ}$,平均为 $1\,500\text{ g I-TEQ}$,占全国总排放量的 10%~20%。中国露天焚烧 PCDD/Fs 排放的主要来源为谷类,如水稻、小麦、玉米等,约占总排放量的 70%。

2 结论与展望

中国农作物秸秆产生量极大,根据农业部农业生态与资源保护总站发布的评估报告,2012 年我国主要秸秆总产量约为 9.2 亿吨,可收集量约为 7.9 亿吨。近年来,随着农村生活水平的提高和新型能源的推广使用,秸秆作为燃料直接燃烧的比例逐年下降,但由于缺乏意识和有效的处理技术,很大一部分秸秆就地焚烧。据世界银行组织预计,到 2020 年,中国秸秆焚烧的比例仍将高达 11.5%。

秸秆露天焚烧的污染物排放不仅对于区域环境空气质量影响极大,在短时间内加剧大气污染程度,其中的有害组分如细粒子、PAHs、PCDD/Fs 等更是

严重威胁居民身体健康,因此,这一类排放源更应引发广泛关注。现有研究对秸秆焚烧常规大气污染物排放对区域环境的影响有了初步的认识,但对于有害物质造成的人体健康风险仍处于探索阶段,进一步掌握秸秆焚烧期前后有害物质的时空变化特征,建立对暴露人群疾病的相对危险度模型,合理量化秸秆焚烧有害物质排放对环境 and 人体健康的影响是改善环境空气质量、保障人体健康的关键途径。

参考文献:

[1] ESTRELLAN C R, LINO F. Toxic emissions from open burning [J]. *Chemosphere*, 2010, 80(3): 193-207.

[2] NORTH DAKOTA DEPARTMENT OF HEALTH, DIVISION OF AIR QUALITY (NDDH-DAQ). North dakota air pollution control rules[R]. North Dakota, United States: North Dakota Department of Health, 2007.

[3] LEMIEUX P M, LUTES L C, SANTONIANI D A. Emissions of organic air toxics from open burning: a comprehensive review[J]. *Prog Energ Combust*, 2004, 30(1): 1-32.

[4] PARK Y K, KIM W, JO Y M. Release of harmful air pollutants from open burning of domestic municipal solid wastes in a Metropolitan area of Korea [J]. *Aerosol Air Qual Res*, 2013, 13(4): 1365-1372.

[5] SATYENDRA T, SINGH R N, SHAISHAV S. Emissions from crop/ biomass residue burning risk to atmospheric quality[J]. *Int Res J Earth Sci*, 2013, 1(1): 24-30.

[6] CEC. Burning agricultural waste: a source of dioxins[R]. Montreal, Canada: Commission for Environmental Cooperation, 2014.

[7] 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]. *Atmos Environ*, 2008, 42(9): 1961-1969.

[8] LANGMANN B, DUNCAN B, TEXTOR C, et al. Vegetation fire emissions and their impact on air pollution and climate[J]. *Atmos Environ*, 2009, 43(1): 107-116.

[9] SINGH N, MITTAL S K, AGARWAL R, et al. Impact of rice crop residue burning on levels of SPM, SO₂ and NO₂ in the ambient air of Patiala (India) [J]. *Int J Environ An Ch*, 2010, 90(10): 829-843.

[10] CHOI K C, WOO J H, KIM H K, et al. Modeling of emissions from open biomass burning in Asia using the BlueSky Framework [J]. *Asian J Atmos Environ*, 2013, 7(1): 25-37.

[11] AGARWAL R, AWASTHI A, MITAL S K, et al. Statistical model to study the effect of agriculture crop residue burning on healthy subjects[J]. *MĀPAN*, 2014, 29(1): 57-65.

[12] AWASTHI A, AGARWAL R, MITTAL S K, et al. Study of size and mass distribution of particulate matter due to crop residue burning with seasonal variation in rural area of Punjab, India[J]. *J Environ Monit*, 2011, 13(4): 1073-1081.

- [13] RYU S Y, KWON B G, KIM Y J, *et al.* Characteristics of biomass burning aerosol and its impact on regional air quality in the summer of 2003 at Gwangju, Korea [J]. *Atmos Res*, 2007, 84 (4): 362-373.
- [14] 郭新彪, 魏红英. 大气 PM_{2.5} 对健康影响的研究进展 [J]. *科学通报*, 2013, 58 (13): 1171-1177.
- [15] MENG X, MA Y J, CHEN R J, *et al.* Size-fractionated particle number concentrations and daily mortality in a Chinese city [J]. *Environ Health Persp*, 2013, 121 (10): 1174-1178.
- [16] TSAI D H, WANG J L, CHUANG K J, *et al.* Traffic-related air pollution and cardiovascular mortality in central Taiwan [J]. *Sci Total Environ*, 2010, 408 (8): 1818-1823.
- [17] GULSON V B. Stable lead isotopes in environmental health with emphasis on human investigations [J]. *Sci Total Environ*, 2008, 400 (1/2/3): 75-92.
- [18] TOVALIN-AHUMADA H, WHITEHEAD L. Personal exposures to volatile organic compounds among outdoor and indoor workers in two Mexican cities [J]. *Sci Total Environ*, 2007, 376 (1/2/3): 60-71.
- [19] VIANA M, LOPEZ J M, QUEROLA X, *et al.* Tracers and impact of open burning of rice straw residues on PM in Eastern Spain [J]. *Atmos Environ*, 2008, 42 (8): 1941-1957.
- [20] CHENG M T, HORNG C L, SUA Y R, *et al.* Particulate matter characteristics during agricultural waste burning in Taichung City, Taiwan [J]. *J Hazard Mater*, 2009, 165 (1/2/3): 187-192.
- [21] BOOPATHY R, ASRABADI B R, FERGUSON T G. Sugar cane (*Saccharum officinarum*) burning and asthma in Southeast Louisiana, USA [J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2002, 68 (2): 173-179.
- [22] REGALADO J, PÉREZ-PADILLA R, SANSORES R, *et al.* The effect of biomass burning on respiratory symptoms and lung function in rural Mexican women [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2006, 174 (8): 901-905.
- [23] AGARWAL R, AWASTHI A, SINGH N, *et al.* Effects of exposure to rice-crop residue burning smoke on pulmonary functions and oxygen saturation level of human beings in Patiala (India) [J]. *Sci Total Environ*, 2012, 429 (7): 161-166.
- [24] AWASTHI A, SINGH N, MITTAL S, *et al.* Effects of agriculture crop residue burning on children and young on PFTs in North West India [J]. *Sci Total Environ*, 2010, 408 (20): 4440-4445.
- [25] OLIVEIRA B F, IGNOTTI E, HACON S S. A systematic review of the physical and chemical characteristics of pollutants from biomass burning and combustion of fossil fuels and health effects in Brazil [J]. *Cad Saude Publica*, 2011, 27 (9): 1678-1698.
- [26] 严文莲, 刘端阳, 孙燕, 等. 秸秆焚烧导致的江苏持续雾霾天气过程分析 [J]. *气候与环境研究*, 2014, 19 (2): 237-247.
- [27] YAMAJI K, LI J, UNO I, *et al.* Impact of open crop residual burning on air quality over Central Eastern China during the Mount Tai Experiment 2006 (MTX2006) [J]. *Atmos Chem Phys*, 2010, 10 (15): 7353-7368.
- [28] 王真真, 谭吉华, 毕新慧, 等. 三种农作物秸秆燃烧颗粒态多环芳烃排放特征 [J]. *中国环境科学*, 2015, 35 (4): 1065-1071.
- [29] 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]. *Atmos Environ*, 2006, 40 (7): 1266-1274.
- [30] 赵起越, 李新中, 陈添. 燃烧麦秸对大气颗粒物中多环芳烃含量的影响 [J]. *岩矿测试*, 2003, 22 (4): 273-276.
- [31] LU H, ZHU L, ZHU N. Polycyclic aromatic hydrocarbon emission from straw burning and the influence of combustion parameters [J]. *Atmos Environ*, 2009, 43 (4): 978-983.
- [32] KORENAGA T, LIU X, HUANG Z. The influence of moisture content on polycyclic aromatic hydrocarbons emission during rice straw burning [J]. *Chemosphere-Global Change Sci*, 2001, 3 (1): 117-122.
- [33] HALEH KESHTKAR H, ASHBAUGH L L. Size distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon particulate emission factors from agricultural burning [J]. *Atmos Environ*, 2007, 41 (13): 2729-2739.
- [34] MAZZOLI-ROCHA F, MAGALHAES C B, MALM O, *et al.* Comparative respiratory toxicity of particles produced by traffic and sugar cane burning [J]. *Environ Res*, 2008, 108 (1): 35-41.
- [35] SHIH Y H, KASAON S J, TSENG C H, *et al.* Health risks and economic costs of exposure to PCDD/Fs from open burning: a case study in Nairobi, Kenya [J]. *Air Qual Atmos Health*, 2016, 9 (2): 201-211.
- [36] KULKARNI P S, CRESPO J G, AFONSO C A M. Dioxins sources and current remediation technologies: a review [J]. *Environ Int*, 2008, 34 (1): 139-153.
- [37] GULLETT B, TOUATI A. PCDD/F emissions from burning wheat and rice field residue [J]. *Atmos Environ*, 2003, 37 (35): 4893-4899.
- [38] 陈德翼, 彭平安, 胡建芳, 等. 生物质燃烧的二噁英排放特性 [J]. *环境化学*, 2011, 30 (7): 1271-1279.
- [39] SHIH S I, LEE W J, LIN L F, *et al.* Significance of biomass open burning on the levels of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in the ambient air [J]. *J Hazard Mater*, 2008, 153 (1/2): 276-284.
- [40] ZHANG Q, HUANG J, YU G. Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans emissions from open burning of crop residues in China between 1997 and 2004 [J]. *Environ Pollut*, 2008, 151 (1): 39-46.

(本文编辑: 孟 月)