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.

河南省秸秆露天焚烧大气污染物排放量的估算与分析

付 乐, 王姗姗 *, 武志立, 刘赛男, 杨书娴, 张瑞芹 *

(郑州大学化学与分子工程学院环境科学研究院, 郑州 450001)

摘 要:为了解河南省秸秆露天焚烧大气污染物排放情况,根据 2014 年河南省的主要农作物产量、草谷比、焚烧比例和排放因子,采用排放因子法估算河南省秸秆焚烧大气污染物的排放量,建立河南省秸秆露天焚烧的污染物排放清单,并分析了大气污染物排放量的时空分布。结果表明:2014 年河南省秸秆露天焚烧共排放:CO_2 1 210.45 万 t、CO 51.74 万 t、CH_4 3.27 万 t、NMVOCs 7.19 万 t、NH_3 0.59 万 t、BC 0.42 万 t、OC 2.47 万 t、SO_2 0.55 万 t、NO_X 3.13 万 t、$PM_{2.5}$ 7.48 万 t。小麦和玉米是河南省露天焚烧排放大气污染物主要贡献源,其贡献率分别为 38%~67%和 17%~36%。大气污染物排放的高值区主要集中在驻马店、周口、南阳和商丘四个地市。大气污染物排放的高峰期集中在 6 月和 10 月,这两个月的各类污染物排放量对全年总排放量的分担率分别为 37.1%~65.7%和 11.3%~37%。

关键词:秸秆;露天焚烧;排放清单;时间分布;空间分布;河南省
中图分类号:X511 **文献标志码**:A **文章编号**:1672-2043(2017)04-0808-09 doi:10.11654/jaes.2016-1362

Estimation of air pollutant emissions from straw residues open burning in Henan Province

FU Le, WANG Shan-shan*, WU Zhi-li, LIU Sai-nan, YANG Shu-xian, ZHANG Rui-qin*

(Research Institute of Environmental Science, College of Chemistry and Molecular Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Open burning of agriculture straw residueis a common method to dispose waste after harvesting seasons in Henan Province. Based on the survey data, the air pollutant emission inventory of crop straw open burning in 2014 for Henan Province was established by using emission factor approach. Besides, the temporal and spatial distribution characteristics of air pollutant emissions were also presented in this paper. The results showed that the total emissions of CO_2, CO, CH_4, NMVOCs, NH_3, BC, OC, SO_2, NO_X and $PM_{2.5}$ from straw residues open burning in Henan Province were $1.210\,45\times10^7$, 5.174×10^5, 3.27×10^4, 7.19×10^4, 5.9×10^3, 4.2×10^3, 2.47×10^4, 5.5×10^3, 3.13×10^4 and 7.48×10^4 t in 2014. Wheat and maize were the main sources of air pollution in Henan Province, with the contribution rate 38%~67% and 17%~36%. Spatially, the cities of Zhumadian, Zhoukou, Nanyang and Shangqiu were the highest value areas of atmospheric pollutant emission in Henan Province. Temporally, the emissions were concentrated in June and October, with the contribution rate 37.1%~65.7% and 11.3%~37% respectively. The research results will provide scientific basis for improving the regional environmental air quality in Henan province.

Keywords: straw residues; open burning; emission inventory; temporal distribution; spatial distribution; Henan Province

河南省作为全国重要的粮食生产基地,长期以来粮食产量稳居全国第一, 随着粮食产量的不断提高,河南省秸秆产生量也日益增多。近年来随着农业生产和农民生活方式的转变,河南省的秸秆资源出现地区性、季节性和结构性过剩以及露天焚烧等一系列问题[1]。秸秆露天焚烧不仅浪费资源, 而且容易引发火灾、污染大气环境、对人体健康造成危害和影响交通安全,农作物秸秆露天焚烧会排放大量的 CO、CO_2、NO_X、

收稿日期:2016-10-26
作者简介:付 乐(1992—),男,陕西宝鸡人,硕士。E-mail:fule0305152033@163.com
* **通信作者**:张瑞芹 E-mail:rqzhang@zzu.edu.cn;王姗姗 E-mail:wangshanshan@zzu.edu.cn

SO_2、NH_3 和粉尘等大气污染物[2]，这些大气污染物的排放会加剧河南各地的雾霾现象。

生物质燃烧一直被视为大气颗粒物的来源之一，其对部分区域的空气质量和全球气候变化产生重大影响[2]，国外对于秸秆焚烧的研究起步较早，国内近些年也加快了对这方面的研究。目前国内对于秸秆露天焚烧的研究主要集中在对作物秸秆产量、资源分布特征、秸秆焚烧比例、秸秆焚烧大气污染物排放量及排放空间分布等方面：李幸芳等[3]研究了河南省各地市的秸秆资源量以及时空分布特征；曹国良等[4-5]通过文献调查方法，按照田间被废弃的秸秆量的一半进行计算，得出秸秆露天焚烧的比例为 25%；王书肖等[6]采用问卷调查和数学模型，估算出中国秸秆露天焚烧的比例为 18.6%，并编制了大气污染物排放清单，分析了空间分布；郑有飞等[7]对河南省夏季小麦秸秆焚烧污染物排放量进行了估算和研究，分析了 PM_{25} 排放量的空间分布，并与郑州市的 PM_{25} 质量浓度进行了相关性分析。但是对于河南省不同种类农作物秸秆露天焚烧的大气污染物排放量对污染物总排放的贡献、秸秆焚烧的季节性变化趋势和各类大气污染物的月排放量对于全年排放总量的占比等问题，目前国内研究较少。

本研究以河南省各地市的主要作物秸秆（小麦、玉米、水稻、花生、棉花、大豆、甘薯）为研究对象，对 2014 年河南省各地市秸秆焚烧排放的大气污染物量进行估算，建立河南省秸秆露天焚烧污染物排放清单，对主要大气污染物的地域分布进行空间展示，并对不同种类农作物秸秆露天焚烧的大气污染物排放量对污染物总排放量的贡献率进行比对分析，通过卫星火点数据的月变化趋势来校验秸秆焚烧的季节性变化趋势，同时分析各月秸秆露天焚烧的污染物排放量对全年排放总量的分担率，最后提出控制和减少农业秸秆焚烧大气污染物排放的建议。本研究可为政府有关部门制定相关政策提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　河南省主要作物秸秆成熟期

本研究通过中国学术论文全文期刊网查阅大田试验的原创性论文，辅以其他正式出版的文献[8-9]，获得河南省主要作物秸秆的成熟期，不同作物秸秆的成熟时间详见表 1。经过查询资料及拜访省农业厅，均没有河南省月秸秆产量的数据，故通过作物成熟时间来估算秸秆月产量。对于跨月份和跨区域成熟的作物，将属于该月的某作物成熟期天数分配给相应月份，该月成熟天数所占总天数的比例乘以局部区域占全省面积的比例，与某作物秸秆总产量的乘积，即是该月的某作物秸秆产量。

1.2　秸秆燃烧排放量的计算

秸秆露天焚烧的活动水平，即秸秆露天焚烧消耗的生物量，按照下式进行计算：

$$M=P\times N\times R\times\theta \quad (1)$$

式中：M 为秸秆露天焚烧的活动水平，t；P 为农作物产量，t；N 为草谷比；R 为秸秆露天焚烧比例；θ 为燃烧效率。

2014 年河南省的农作物产量数据来源于《河南省统计年鉴（2015）》[10]。为了相对准确地估计河南省秸秆焚烧比例，本研究咨询河南省农业厅秸秆禁烧综合利用办公室的专家，参考相关文献[4-6,11-12]以及河南省政府关于秸秆禁烧方面的政策[13-15]，结合河南省农村地区处理废弃秸秆的普遍方式和生活习惯，估计 2014 年河南省秸秆露天焚烧的比例范围为 10%~15%，本研究采用 12%。各类农作物的草谷比和燃烧效率数据取值，如表 2 所示。

1.3　大气污染物排放量的计算

对于生物质燃烧，某一种大气污染物的排放量采用下式计算：

$$E_i=\sum_{j,m}(M_{j,m}\times EF_{i,j,m})/1000 \quad (2)$$

表 1　河南省主要作物秸秆成熟期

Table 1　The maturity date of crop residue in Henan Province

农作物	成熟期/（月/日）	种植区域
小麦	5/1—5/31、6/1—6/30	河南大部均属黄淮冬麦区，河南南部信阳等地区属长江中、下游冬麦区
玉米	9/7—10/20	河南属黄淮海夏播玉米区
水稻	8/24—9/29、9/6—10/26	河南南部属华中单季稻稻作区，河南大部属华北单季稻稻作区
花生	9/5—9/30、7/18—8/28（春播）、9/25—11/6（夏播）	河南大部属北方大花生区，河南南部属长江春夏花生区
棉花	10/5—10/30、10/15—11/25	河南中北部属黄河流域棉区，河南西南部属长江流域棉区
大豆	9/11—10/15、10/5—11/10	河南大部属黄淮流域夏大豆区，河南南部属长江流域夏大豆区
甘薯	10/1—10/31、10/20—11/20	河南中南部属黄淮流域春夏薯区，河南淮河以南属长江流域夏薯区

表 2 秸秆露天焚烧量计算参数

Table 2 Parameters used in the calculation of crop residues burning amounts

农作物	草谷比	燃烧效率
小麦	1.3[16]	0.86[6,11]
玉米	1.1[16]	0.92[6,11]
水稻	1[16]	0.89[6,11]
花生	1.5[16]	0.80[6,11]
棉花	5[16]	0.80[6,11]
大豆	1.6[16]	0.68[6,11]
甘薯	0.63[16]	0.80[6,11]

式中：E_i 为大气污染物 i 的排放量，t；$M_{j,m}$ 为 j 市 m 秸秆的露天焚烧活动水平，t；$EF_{i,j,m}$ 为大气污染物 i 在 j 市 m 秸秆焚烧活动中的排放系数，$g \cdot kg^{-1}$。

上述式(1)和式(2)参考环保部于 2014 年发布的《生物质燃烧源大气污染物排放清单编制技术指南(试行)》[17]。秸秆露天焚烧的污染物排放量基于排放因子法计算，排放因子作为表征气态污染物排放特征的重要参数，通过整理文献中各种污染物的排放因子，以及搜集已有的排放测试成果，得到各类秸秆的大气污染物排放因子，结果见表 3。

2 结果与分析

2.1 2014 年河南省主要作物秸秆产量

2.1.1 各地市的秸秆产量

根据河南省各地市主要作物的产量和草谷比，估算得到 2014 年各地市主要作物秸秆产量，结果如表 4 所示。2014 年河南省作物秸秆总量达到 8 128.5 万t，其中周口市、驻马店市、南阳市和商丘市的秸秆总量分别占全省秸秆总量的 13.0%、12.6%、11.4%和 10.8%，秸秆总量之和占全省的 47.8%。这四个地市均是农业发达地区，耕地面积大、农作物产量高，小麦和玉米秸秆产量之和分别占四个地市秸秆总产量的 87.7%、82.2%、73.6%和 89.2%。

2.1.2 各月份的秸秆产量

根据表 4 中各地市秸秆产量，结合河南省作物秸秆成熟期，得到河南省各地市 5—11 月的秸秆产量，结果如图 1 所示。因为气候和地域原因，河南省 12 月至来年 4 月期间没有作物成熟，故没有秸秆产量。从图 1 可以看出，2014 年河南省秸秆产量最高的月份是 6 月，占全年秸秆产量的 52.5%，6 月份小麦秸秆产量最高的地市都是周口市。7 月、8 月和 11 月的秸秆种类为水稻、花生、大豆、棉花和甘薯，这 3 个月份的秸秆产量远远低于其他月份，其产量之和仅占全年的 7%。河南省大部分地区玉米秸秆收获的时间是 9 月和 10 月，这两个月的秸秆产量分别占全年产量的 20.2%和 17.2%。

2.2 河南省秸秆露天焚烧排放大气污染物

2.2.1 各地市秸秆露天焚烧大气污染物排放清单

根据各地区秸秆产量以及燃烧效率，结合不同作物秸秆的燃烧比例和排放因子，计算得到 2014 年河南省各地市秸秆露天焚烧的各种大气污染物排放量清单，结果如表 5 所示。河南省秸秆焚烧共排放：CO_2 1 210.45 万 t、CO 51.74 万 t、CH_4 3.27 万 t、NMVOCs 7.19 万 t、NH_3 0.59 万 t、BC 0.42 万 t、OC 2.47 万 t、SO_2 0.55 万 t、NO_X 3.13 万 t、$PM_{2.5}$ 7.48 万 t。大气污染物排放量靠前的地市为周口市、驻马店市、南阳市和商丘市，这 4 个地市的排放量分别占全省秸秆焚烧大气污染物总排放量的 12.8%、12.7%、11.3%和10.7%。济源市的秸秆焚烧大气污染物排放量仅为 4.21 万 t，远远低于其他地市。

2.2.2 不同种类作物秸秆的同类污染物排放大小比较

根据大气污染物的计算公式，可知污染物排放量与河南省各类农作物秸秆产量、燃烧效率和排放

表 3 秸秆露天焚烧排放因子

Table 3 Emission factors of crop residues open burning

污染物	小麦	玉米	水稻	花生	棉花	大豆	甘薯	参考文献
CO_2	1460	1355	1460	1580	1445	1445	1445	[6,11,22–25]
CO	64.2	54	30	102	68.3	33.5	55.1	[18–19,25]
CH_4	3.4	4.5	3.2	5.8	3.5	3.9	3.9	[6,19–24]
NMVOCs	7.8	10.4	6.1	9.4	8.7	8.7	8.6	[6,11,18–25]
NH_3	0.5	0.7	0.8	2.2	0.8	0.5	0.5	[6,11,18–25]
BC	0.5	0.4	0.7	0.8	0.5	0.2	0.4	[11,18–25]
OC	2.7	3.9	3.3	1.4	4.5	1.1	2.0	[11,19–25]
SO_2	0.8	0.4	0.9	0.4	0.6	0.3	0.3	[6,11,18–25]
NO_X	3.4	4.3	3.1	5.3	3.4	1.1	2.1	[6,11,20–25]
PM_{25}	7.6	11.7	13.0	6.3	11.7	3.3	5.8	[6,18–25]

表 4 河南省各地市主要作物秸秆产量

Table 4 The quantity of main crop straw of each city in Henan Province

地区	小麦/万 t	玉米/万 t	水稻/万 t	花生/万 t	棉花/万 t	大豆/万 t	甘薯/万 t	总量/万 t	比例/%
郑州	105.5	77.6	0.1	22.1	0.2	3.1	5.0	214.6	2.6
开封	236.6	86.9	4.3	71.1	2.2	7.5	5.4	422.6	5.2
洛阳	138.1	88.2	0.9	12.6	0.3	4.0	11.0	256.2	3.2
平顶山	133.0	64.1	0.3	11.6	0.2	3.4	5.2	218.6	2.7
安阳	257.3	171.2	0.4	37.1	0.6	2.6	3.9	475.7	5.9
鹤壁	81.25	61.15	0	4.86	0.04	0.32	0.58	148.36	1.8
新乡	309.21	160.03	22.33	52.16	0.46	6.66	3.42	556.09	6.8
焦作	143.2	97.2	4.7	12.9	0.2	1.6	1.2	261.5	3.2
濮阳	201.9	78.5	29.5	25.5	0.4	5.9	3.2	346.2	4.3
许昌	203.0	115.6	0	10.4	0.3	4.6	9.8	345.0	4.2
漯河	132.4	74.9	0	3.5	0.7	2.7	2.1	219.1	2.7
三门峡	36.0	24.7	0	2.1	0.1	7.1	2.9	73.3	0.9
南阳	488.9	190.3	31.5	156.5	2.5	23.4	19.4	922.3	11.4
商丘	542.3	242.8	0.4	51.8	2.5	24.2	5.6	879.4	10.8
信阳	193.4	16.3	419.5	39.8	0.1	2.6	4.6	676.7	8.3
周口	663.3	265.7	0.6	49.1	3.5	47.9	15.5	1 059.4	13.0
驻马店	584.2	260.4	17.8	143.8	0.8	10.9	6.2	1 027.2	12.6
济源	14.6	11.1	0	0.2	0	0.3	0.2	26.4	0.3
全省	4 464.2	2 086.7	532.1	707.0	15.0	158.9	105.0	8 128.5	1

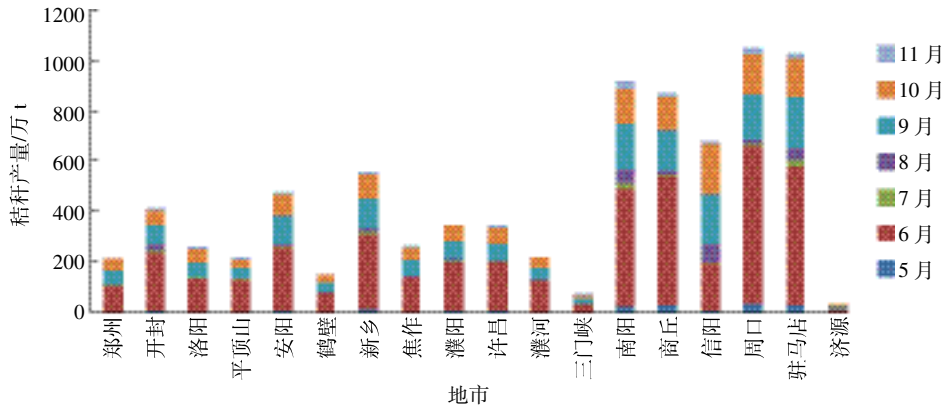

图 1 河南省各地市的秸秆月产量

Figure 1 The quantity of monthly crop straw of each city in Henan Province

因子呈正比关系，并且各类秸秆产量和排放因子的权重分配参数较大，故不同种类作物秸秆的同类污染物排放量差别较大。各类农作物对秸秆露天焚烧大气污染物的相对贡献程度,结果如图 2 所示。小麦和玉米秸秆是河南省秸秆露天焚烧排放大气污染物的主要贡献源，小麦和玉米秸秆对各类大气污染物排放的贡献率分别为 38%~67%和 17%~36%。对于大气污染物 CO_2、CO、NMVOCs、BC、OC、SO_2 和 NO_X 的排放量,小麦秸秆的贡献率均超过了 50%,远远高于其他秸秆;对于大气污染物 CH_4、NH_3 和 $PM_{2.5}$ 的排放量,虽然小麦秸秆贡献率均低于 50%,但仍高于其他秸秆。

2.3 河南省秸秆焚烧大气污染物排放量的空间分布

2014 年河南省各地市秸秆露天焚烧排放大气污染物 CO、NMVOCs、BC、OC、NO_X 和 $PM_{2.5}$ 的空间分布如图 3 所示。从这六部分空间分布图来看,排放的高值区分布在南阳市、驻马店市和周口市;NMVOCs 排放的高值区主要集中在南阳市、驻马店市、周口市和

表 5 河南省各地市秸秆露天焚烧大气污染物排放清单(万 t)

Table 5 Municipal emission inventory of crop straw open burning of Henan Province(10^4 t)

地市	CO_2	CO	CH_4	NMVOCs	NH_3	BC	OC	SO_2	NO_X	$PM_{2.5}$
郑州	31.96	1.41	0.09	0.20	0.02	0.01	0.07	0.01	0.09	0.20
开封	62.04	2.86	0.17	0.37	0.03	0.02	0.12	0.03	0.16	0.35
洛阳	38.09	1.64	0.11	0.24	0.02	0.01	0.08	0.02	0.10	0.24
平顶山	32.58	1.42	0.09	0.20	0.01	0.01	0.07	0.01	0.08	0.20
安阳	71.00	3.12	0.20	0.44	0.03	0.02	0.15	0.03	0.19	0.45
鹤壁	22.25	0.95	0.06	0.14	0.01	0.01	0.05	0.01	0.06	0.15
新乡	83.25	3.62	0.23	0.50	0.04	0.03	0.17	0.04	0.22	0.52
焦作	39.19	1.68	0.11	0.24	0.02	0.01	0.09	0.02	0.10	0.25
濮阳	51.83	2.19	0.14	0.30	0.02	0.02	0.11	0.02	0.13	0.32
许昌	51.40	2.20	0.14	0.32	0.02	0.02	0.11	0.02	0.13	0.32
漯河	32.39	1.38	0.09	0.20	0.01	0.01	0.07	0.01	0.08	0.21
三门峡	10.69	0.44	0.03	0.07	0	0	0.02	0	0.03	0.07
南阳	136.58	6.19	0.38	0.81	0.08	0.05	0.26	0.06	0.36	0.79
商丘	129.93	5.66	0.35	0.79	0.06	0.04	0.27	0.06	0.34	0.78
信阳	103.99	3.14	0.24	0.49	0.06	0.05	0.22	0.06	0.24	0.78
周口	155.51	6.70	0.41	0.93	0.07	0.05	0.31	0.07	0.39	0.92
驻马店	153.82	6.96	0.43	0.92	0.08	0.05	0.30	0.07	0.41	0.91
济源	3.95	0.17	0.01	0.03	0	0	0.01	0	0.01	0.03
全省	1 210.45	51.74	3.27	7.19	0.59	0.42	2.47	0.55	3.13	7.48

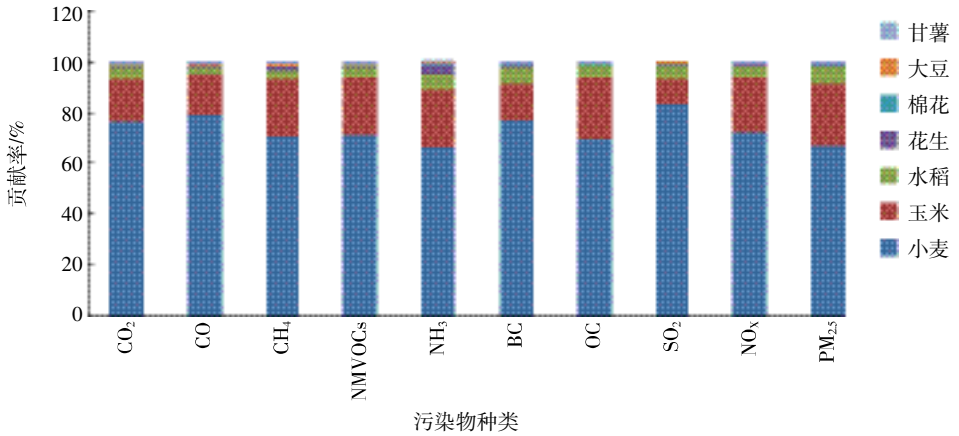

图 2 不同种类农作物秸秆露天焚烧大气污染物排放量对同类污染物排放的贡献

Figure 2 The contribution ratio of crop residues open burning to total pollutant emissions

商丘市;BC 排放的高值区集中在南阳市、驻马店市、周口市、商丘市和信阳市;OC 排放的高值区集中在驻马店市、周口市和商丘市;NO_X 排放的高值区集中在南阳市、驻马店市和周口市;$PM_{2.5}$ 排放的高值区集中在南阳市、驻马店市、周口市、商丘市和信阳市。从图 2 总体分析可知,以上这些大气污染物排放高值区主要集中在河南中南部和东部地区,如驻马店市、周口市、南阳市和商丘市。

2.4 河南省秸秆焚烧大气污染物排放量的时间分布

2.4.1 各类大气污染物的月排放量对全年排放总量的分担率

根据河南省各类秸秆的成熟期,得到各月秸秆产量,计算出各月秸秆露天焚烧大气污染物排放量对全年排放总量的分担率,结果如图 4 所示。河南省秸秆露天焚烧大气污染物排放量在 6 月达到最高,各类污染物排放量对全年总排放量的分担率为 37.1%~

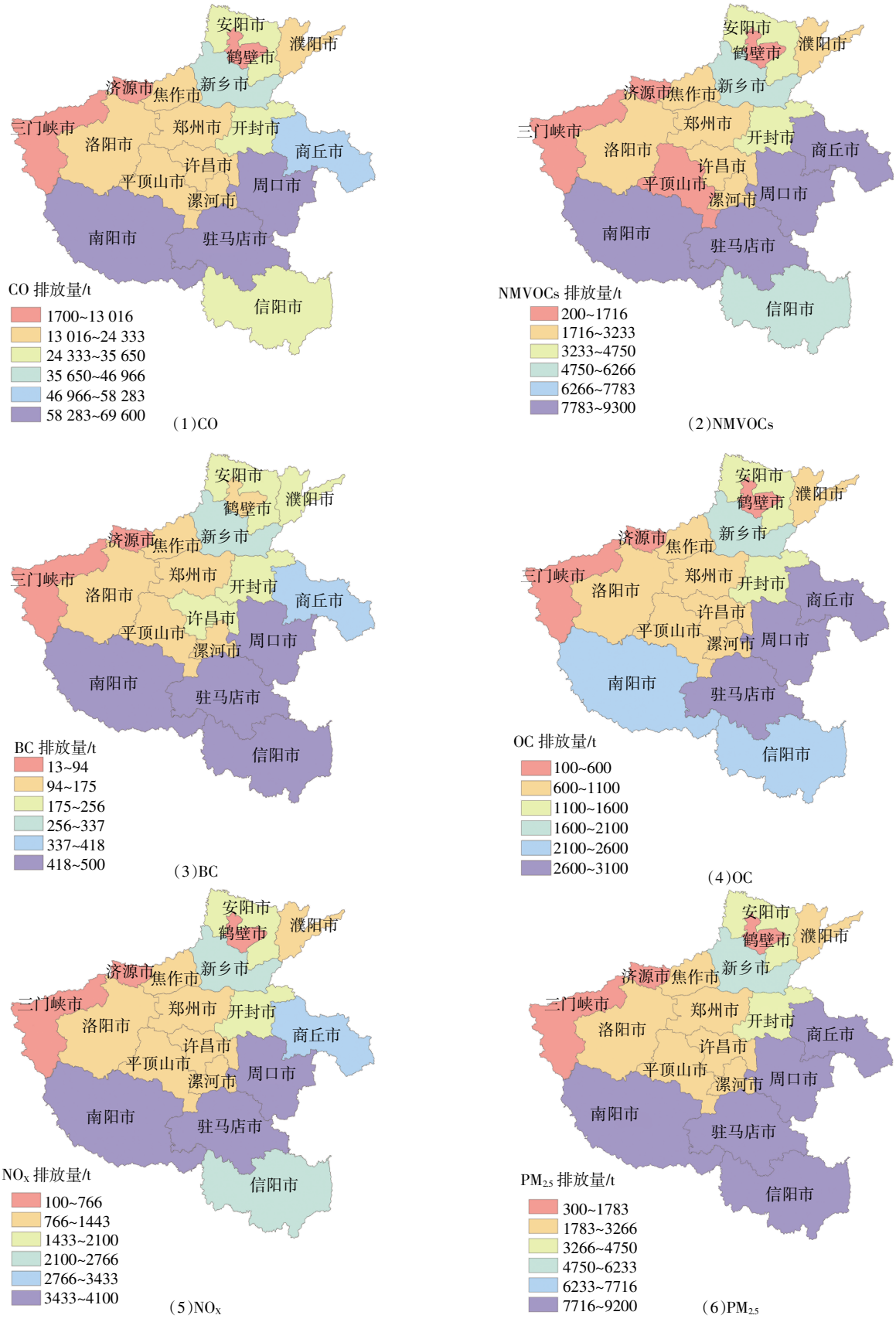

图 3　河南省秸秆焚烧排放大气污染物空间分布

Figure 3　Spatial distribution of pollutant emissions from crop straw open burning of Henan Province

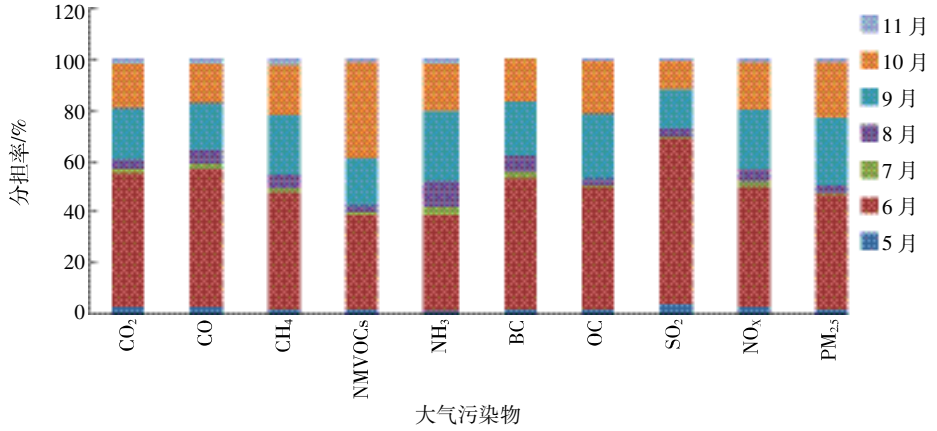

图 4 各类大气污染物的月排放量对全年排放总量的分担率

Figure 4 Contributions of monthly atmospheric pollutants emissions to the annual emissions

65.7%;其次是 10 月,各类污染物排放量的分担率为 11.3%~37%;5 月、7 月和 11 月的秸秆露天焚烧大气污染物排放量相对较低,各类污染物排放量的分担率分别为 1.7%~3.8%、0.2%~3.4%和 0.2%~2.1%。

2.4.2 基于卫星监测的火点数据与不同月份大气污染物排放量变化趋势的比对

为了验证通过表 1 数据计算得到的各月秸秆露天焚烧排放的大气污染物量的可靠性,基于环境保护部发布的《环境卫星秸秆焚烧火点核定月报》,统计得到 2014 年 5—11 月的秸秆露天焚烧卫星监测火点数,来校验同期的大气污染物量,结果如图 5 所示。河南省秸秆露天焚烧主要集中在 6 月和 10 月, 呈现两个明显的高峰。通过卫星火点数来看,6 月和 10 月的火点数目比较多,说明河南省各地的秸秆焚烧情况比较严重;从秸秆成熟期的角度来看,6 月、9 月和 10 月是河南小麦和玉米秸秆收获的黄金时期,相应的秸秆焚烧大气污染物的排放量较多。其他月份的大气污染物排放量与火点数基本上同步,但是从数量关系分析,9 月份的卫星火点数只有 4 个,与该月份大气污染物排放量存在较大的出入。除此之外,其他月份的火点数与各月份根据秸秆成熟期估算的结果基本吻合。

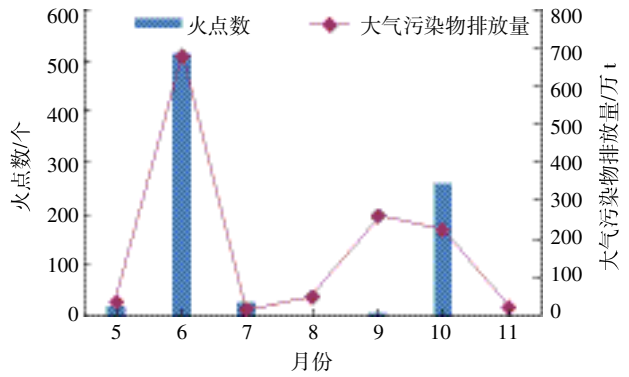

图 5 2014 年各月的大气污染物排放量和火点数

Figure 5 Monthly variations of atmospheric pollutants emissions and fire counts in 2014

3 讨论

3.1 不确定性分析

本研究建立的河南省大气污染物排放清单, 大多数采用国内外学者文献中排放系数值, 由于排放源测试受样本、测试条件等因素的影响,不同学者的研究成果有一定的差异,进而影响清单编制的可靠性。清单建立过程中的最大不确定性是秸秆露天焚烧量,在露天焚烧量估算体系中,秸秆作物产量、草谷比、露天焚烧比例和燃烧效率等数据的选取均存在误差[26]。对于秸秆露天焚烧比例,多数学者通过与卫星火点数据相结合,来提高焚烧比例的准确度,但是由于卫星只能监测到正在焚烧的火点,而且卫星过境时间间隔较长,导致基于卫星监测的秸秆焚烧污染物排放量偏小[7],故图 5 中 9 月份的大气污染物排放量与该月卫星火点数据存在着较大出入。建议后续研究人员可通过问卷调查、统计分析以及基于火点分配的方法,来研究河南省各地区秸秆焚烧情况,确定分区域、分秸秆类型的露天焚烧比例,提高研究结果的可靠性。

3.2 政策建议

河南省秸秆焚烧火点集中的地方大多是粮食主产区,河南省对焚烧秸秆主要采取“以罚代管”的政策。通过一系列严厉措施,2015 年火点数与 2014 年同期相比减少 307 个,大气环境有所改善(根据环境保护部《环境卫星秸秆焚烧火点核定月报》统计得到)。但是,简单的经济处罚和行政干预手段并不能从

根本上解决秸秆禁烧问题,为此,本研究提出一些政策方面的建议。

(1)切实落行秸秆禁烧补贴政策。河南省政府对于秸秆禁烧工作的补贴主要针对灭茬机、旋耕机、打捆机等机械的采购,但相关补贴比例太低,政府应该适当提高补贴比例,提高农民购买秸秆还田相关机械的积极性[27]。此外,政府应该出台具体的政策条文,明确秸秆禁烧补贴的过程和对象。

(2)构建秸秆处理的技术支撑体系。秸秆具有很大的开发价值,如加工成牲畜饲料、发电、生产沼气、制作生活用品等。建议政府牵头整合科研资源,引领和支持河南省农业科研单位、农业高校和企业构建以秸秆综合利用技术创新为目标的研究与开发体系,重点解决秸秆固化、沼气化、发电以及在收储转运过程中的技术难题[27]。通过技术创新,不断开发秸秆利用新用途,提高秸秆综合利用率,大力推广已经成型的秸秆利用技术。

(3)构建秸秆处理的市场服务机制。目前,河南省秸秆处理的市场服务体系不健全,秸秆运输成本高,秸秆收集和贮存困难,秸秆的综合利用率低。政府可以采取一定的激励政策,吸引社会资金投入秸秆开发事业,以政府为主导,建立起完备的秸秆收储转运市场服务体系,通过市场化运作,实现秸秆的产业化经营。政府应鼓励有条件的企业,在粮食收储人员和场地的基础上以点带面,开展农作物收割、贮运一体化的机械化联合作业;发展专业的秸秆收储公司或农民专业合作社,鼓励其建设大型的秸秆收储站[27]。

4 结论

(1)2014 年河南省作物秸秆总量达到 8 128.5 万 t,其中 6 月份的秸秆产量最高,占全年秸秆产量的 52.5%;周口市、驻马店市、南阳市和商丘市分别占全省秸秆总量的 13.0%、12.6%、11.4%和 10.8%。

(2)通过查阅文献和咨询专家,基于河南省主要农作物的秸秆露天焚烧情况,建立了 2014 年河南省农作物秸秆露天焚烧的大气污染物排放清单。全省18个地市的秸秆焚烧污染物排放量:CO_2 1 210.45 万 t、CO 51.74 万 t、CH_4 3.27 万 t、NMVOCs 7.19 万 t、NH_3 0.59 万 t、BC 0.42 万 t、OC 2.47 万 t、SO_2 0.55 万 t、NO_X 3.13 万 t、$PM_{2.5}$ 7.48 万 t。

(3)小麦和玉米是河南省秸秆露天焚烧大气污染物排放量的主要来源,二者对各类污染物排放的贡献率分别为 38%~67%和 17%~36%。

(4)河南省中南部和东部地区是秸秆露天焚烧排放污染物的高值区,排在前边的地市有驻马店市、周口市、南阳市和商丘市。

(5)河南省秸秆露天焚烧的高峰期分别出现在 6 月和 10 月,其中 6 月主要是黄淮冬小麦秸秆焚烧,10 月则是黄淮海夏播玉米秸秆焚烧。这两个月的各类污染物排放量对全年总排放量的分担率分别为 37.1%~65.7%和 11.3%~37%。

参考文献:

[1] 方　放,王　飞,邱　凌,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):229-231.
FANG Fang, WANG Fei, QIU Ling, et al. Analysis on distribution and use structure of crop straw resources in Huang-Huai-Hai Plain of China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(2):229-231.

[2] 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.
LI Wei, ZHANG Hong. Estimation for carbon emission from the open burning of crop straw in Shanxi Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(26):118-120.

[3] 李幸芳,李　刚,刘圣勇,等. 河南省农作物秸秆资源分布及其资源评价[J]. 河南科学,2011,29(12):1464-1465.
LI Xing-fang, LI Gang, LIU Shen-yong, et al. The research on the estimation of crop straw resource distribution and the resource evaluation in Henan Province[J]. *Henan Science*, 2011, 29(12):1464-1465.

[4] 曹国良,张小曳,王　丹,等. 中国大陆生物质燃烧排放的污染物清单[J]. 中国环境科学,2005,25(4):389-393.
CAO Guo-Liang, ZHANG Xiao-ye, WANG Dan, et al. Inventory of atmospheric pollutants discharged from biomass burning in China continent[J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(4):389-393.

[5] 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.
CAO Guo-liang, ZHANG Xiao-ye, WANG Dan, et al. Inventory of emission of pollutants from open burning crop residue[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(4):800-804.

[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):329-331.
WANG Shu-xiao, ZHANG Chu-ying. Spatial and temporal distributionof air pollutants emission from open burning of crop residues in China[J]. *Sciencepaper Online*, 2008, 3(5):329-331.

[7] 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.

[8] 韦茂贵,王晓玉,谢光辉. 我国不同地区主要大田作物田间秸秆成熟期[J]. 中国农业大学学报,2012,17(6):21-26.
WEI Mao-gui, WANG Xiao-yu, XIE Guang-hui. Maturity date of main

field crop residues in different regions of China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(6):21-26.

[9] 韦茂贵, 王晓玉, 谢光辉. 中国各省大田作物田间秸秆资源量及其时间分布[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(6):33-42.
WEI Mao-gui, WANG Xiao-yu, XIE Guang-hui. Field residue of field crops and its temporal distribution among thirty-one provinces of China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(6):33-42.

[10] 河南省统计局. 河南统计年鉴(2015)[Z]. 北京:中国统计出版社, 2015.
Henan Province Bureau of Statistics. Henan Statistical Yearbook (2015)[Z]. Beijing: China Statistics Press, 2015.

[11] Jing L, Yu B, Shao D X, et al. Estimating emissions from crop residue open burning in China based on statistics and MODIS fire products[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 44(6), 158-163.

[12] Jian F S, Hai Y P, Jian M C, et al. An estimation of CO_2 emission via agricultural crop residue open fieldburning in China from 1996 to 2013 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 112(4):2625-2629.

[13] 李 瑞. 我省通报秸秆焚烧监测情况三地焚烧现象突出[EB/OL]. (2014-06-19). http://www.henan.gov.cn/10ztzl/system/2014/06/17/010480327.shtml.
LI Rui. The situation of burning of straw burning in Henan Province [EB/OL]. (2014-06-19). http://www.henan.gov.cn/10ztzl/system/2014/06/17/010480327.shtml.

[14] 环境保护部办公厅. 关于 2015 年夏季秸秆焚烧污染防控工作情况的通报 [EB/OL]. (2015-10-08). http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201510/t20151012_314885.htm.
General Office of the Ministry of Environmental Protection. Report on the prevention and control of pollution of straw burning in summer 2015 [EB/OL]. (2015-10-08). http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201510/t20151012_314885.htm.

[15] 河南省人民政府办公厅. 关于印发 2016 年河南省秸秆禁烧和综合利用工作实施方案的通知[EB/OL]. (2016-05-26). http://www.henan.gov.cn/zwgk/system/2016/06/23/010650706.shtml.
General Office of the People's Government of Henan Province. Notice on issuing the implementation scheme of the prohibition of burning and comprehensive utilization of straw in Henan Province in 2016[EB/OL]. (2016-05-26). http://www.henan.gov.cn/zwgk/system/2016/06/23/010650706.shtml.

[16] 毕于运. 秸秆资源评价与利用研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2010.
BI Yu-yun. Study on straw resources evaluation and utilization in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010.

[17] 环境保护部. 生物质燃烧源大气污染物排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. (2015-01-09).http://www.docin.com/p-1016482742.html.
Ministry of Environmental Protection. Technical guide for preparation of air pollutant emission inventory from biomass combustion source (trial) [EB/OL]. (2015-01-09). http://www.docin.com/p-1016482742.html.

[18] Akagi S K, Yokelson R J, Wiedinmyer C, et al. Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models[J]. *Atmos Chem Phys*, 2011, 11(9):4039-4072.

[19] 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]. *Environ Sci*, 2008, 20(1):50-55.

[20] Zhang Y S, Shao M, Lin Y, et al. Emission inventory of carbonaceous pollutants from biomass burning in the Pearl River Delta Region [J]. *China Atmos Environ*, 2013, 76(4):189-199.

[21] Andreae M O, Merlet P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning[J]. *Glob Biogeochem Cycles*, 2001, 15(4):955-966.

[22] Kudo S, Tanimoto H, Inomata S, et al. Emissions of nonmethane volatile organic compounds from open crop residue burning in the Yangtze River Delta region, China[J]. *Geophys Res-Atmos*, 2014, 119(12):7684-7698.

[23] 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):29-31.
ZHU Bin, ZHU Xian-lei, ZHANG Yuan-xun, et al. Emission factor of-$PM_{2.5}$ from crop burning [J]. *Research of Environmental Science*, 2005, 18(2):29-31.

[24] 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. Emission 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.

[25] 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):10-12.
CAO Guo-liang, ZHANG Xiao-ye, ZHENG Fang-cheng, et al. Estimating the crop residues burnt in open field in China[J]. *Resources Science*, 2006, 28(1):10-12.

[26] 何 敏, 王幸锐, 韩 丽, 等. 四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征[J]. 环境科学, 2015, 36(4):1209-1214.
HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, et al. Emission inventory of crop residues field burning and its temporal and spatial distribution in Sichuan Province[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(4):1209-1214.

[27] 刘 科, 金立科. 河南农村秸秆焚烧问题分析及其政府治理[J]. 创新科技, 2016, 191(1):69-71.
LIU Ke, JIN Li-ke. Analysis on the problem of straw burning in Henan rural areas and its government treatment[J]. *Innovation Science and Technology*, 2016, 191(1):69-71.