

张双奇, 邓梦思, 单明, 等. 基于秸秆露天焚烧量的北方农村地区秸秆成型燃料替代采暖散煤节能减排研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(12):2506-2514.

ZHANG Shuang-qi, DENG Meng-si, SHAN Ming, et al. Study on the energy and environmental impacts of substituting molded straw fuels for heating coal in rural areas of northern China based on the amount of straw open burning[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(12):2506-2514.

## 基于秸秆露天焚烧量的北方农村地区秸秆成型燃料替代采暖散煤节能减排研究

张双奇<sup>1</sup>, 邓梦思<sup>1</sup>, 单明<sup>1</sup>, 周闯<sup>2</sup>, 刘伟<sup>2</sup>, 徐晓秋<sup>2</sup>, 杨旭东<sup>1\*</sup>

(1.清华大学建筑技术科学系, 北京 100084; 2.黑龙江能源环境研究院, 哈尔滨 150027)

**摘要:** 基于农村采暖散煤消耗量及秸秆露天焚烧比例的实地调研结果, 从资源数量的角度验证了将露天焚烧的秸秆加工为秸秆成型燃料并用于替代北方农村地区采暖散煤使用的可行性, 同时定量计算了替代后产生的能源环境影响, 给出了散煤消耗的减少量和污染物减排清单。结果表明, 北方大部分省份能够通过将露天焚烧的秸秆加工为成型燃料来实现对农村采暖散煤的替代。替代后北方各省总计能够减少散煤使用量 8 603.6 万 t, 分别减少 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO、PM<sub>2.5</sub>、CO<sub>2</sub> 排放量 32.3 万、27.47 万、613.76 万、63.30 万、25 195.29 万 t, 其中黑龙江、河南、新疆、山东、河北、辽宁节能减排效果最显著。研究显示, 秸秆成型燃料替代农村地区采暖散煤的能源环境影响显著, 对我国能源短缺、农村废物处理、大气环境污染等问题能起到很好的改善作用, 建议加强成型燃料在农村地区的应用和研究。

**关键词:** 农村; 问卷调查; 采暖散煤; 减煤量; 排放清单; 成型燃料; 散煤替代

**中图分类号:** X712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2017)12-2506-09 **doi:**10.11654/jaes.2017-0782

### Study on the energy and environmental impacts of substituting molded straw fuels for heating coal in rural areas of northern China based on the amount of straw open burning

ZHANG Shuang-qi<sup>1</sup>, DENG Meng-si<sup>1</sup>, SHAN Ming<sup>1</sup>, ZHOU Chuang<sup>2</sup>, LIU Wei<sup>2</sup>, XU Xiao-qiu<sup>2</sup>, YANG Xu-dong<sup>1\*</sup>

(1. Department of Architectural Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Energy & Environmental Research Institute of Heilongjiang Province, Harbin 150027, China)

**Abstract:** Based on the results of a field survey on scattered coal consumption for rural heating and the proportion of straw burned in open fields, this study assesses the feasibility of using densified solid fuels (DSFs) produced from field straw as an alternative for space heating purposes in rural areas of northern China. A quantitative analysis from the perspective of resource use was performed to evaluate the energy and environmental impacts of this alternative on reducing coal consumption as well as the emission of air pollutants. The results show that a majority of provinces in northern China may be able to realize a reduction in coal consumption and emissions by replacing coal with DSF produced from field straw for rural heating. Overall, this could yield a total reduction in coal consumption of  $8.60 \times 10^7$  t. In addition, a total emissions reduction of  $3.23 \times 10^5$ ,  $2.75 \times 10^5$ ,  $6.14 \times 10^6$ ,  $6.33 \times 10^5$ ,  $2.52 \times 10^8$  t may be accomplished for SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, PM<sub>2.5</sub>, and CO<sub>2</sub>, respectively. In particular, provinces such as Heilongjiang, Henan, Xinjiang, Shandong, Hebei, and Liaoning could achieve the most significant energy savings and emissions reductions. The potential energy and environmental impacts of coal-to-DSF substitution are demonstrated to be substantial. The application of DSF will help to address energy shortages, rural waste disposal, and air pollution. It is recommended that further research into the application of DSF in rural areas of northern China is needed.

**Keywords:** rural areas; questionnaire; heating coal; reduction of coal consumption; emission inventory; straw densified solid fuel; substitution of coal

收稿日期: 2017-06-02 录用日期: 2017-08-14

作者简介: 张双奇(1991—), 男, 重庆江津人, 博士研究生, 主要研究方向为农村能源环境。E-mail: 645307394@qq.com

\* 通信作者: 杨旭东 E-mail: xyang@tsinghua.edu.cn

我国拥有丰富的秸秆资源,国家发改委、农业部办公厅联合印发《关于编制“十三五”秸秆综合利用实施方案的指导意见》所提供的数据显示,2015年全国秸秆产量理论值为10.4亿t。但由于秸秆露天焚烧和废弃,大量秸秆资源被浪费,并且造成了严重的环境问题,秸秆资源的合理利用对环境治理和能源生产有着重要意义。与化石能源相比,秸秆能源密度小、储存和运输效率低,这是影响秸秆资源能源化利用的主要障碍。秸秆固化成型技术通过改善秸秆的特性有效解决了上述问题<sup>[1]</sup>,是我国最有可能在近期内实现的规模化产业技术<sup>[2]</sup>。目前,国内外已有较多生物质成型燃料生产应用的相关研究,但大部分是研究生物质成型燃料在燃煤电厂锅炉或中小型锅炉中的燃烧特性<sup>[3]</sup>,以及替代燃煤电厂或中小型燃煤锅炉的燃煤所带来的经济、环境、能源效益<sup>[4-12]</sup>;虽然也有少部分是研究生物质成型燃料在农村家庭使用的污染物排放情况<sup>[13-14]</sup>,但从区域尺度分析生物质成型燃料替代农村地区采暖散煤使用的节能减排研究还鲜有报道。我国农村地区采暖散煤消耗量大,且与电厂燃煤锅炉或城镇集中采暖锅炉相比,农村散煤采暖的燃烧效率低下,污染物排放量高,造成的能源浪费和环境污染问题不容小视。

基于以上原因,本研究以2014年相关数据为依据,利用模型,基于农村采暖散煤及秸秆焚烧比例的调研数据,从资源数量角度分析秸秆成型燃料替代农村采暖散煤的可行性;计算秸秆成型燃料替代农村采暖散煤前后耗煤量和污染物排放量的差异,定量计算秸秆成型燃料替代我国北方农村地区采暖散煤使用的能源和环境影响,据此提出相应建议和意见。

## 1 材料与方法

秸秆成型燃料替代农村采暖散煤从以下五个方面对能耗和污染物排放产生影响:农村采暖的散煤使用量、秸秆成型燃料使用量、散煤和秸秆成型燃料生产运输过程中产生的能耗和排放、秸秆露天焚烧量。下面分别介绍各部分的计算方法和数据来源。

### 1.1 能耗计算方法

#### 1.1.1 北方农村地区采暖散煤量

北方15个省份农村地区采暖散煤消耗量通过调研得到。清华大学建筑节能中心分别于2006—2007年和2015年组织了两次全国大规模农村家庭能源消费调研<sup>[15-17]</sup>,由经过统一培训的师生入户对选取的农户进行问卷调研。2006—2007年调研采用省、县、村

三级抽样的方法,覆盖全国24个省份,150个县级行政区;2015年调研则主要以回访为主,覆盖全国21个省份,得到2120个样本,其中北方11省样本991个。本研究主要采用2015年调研得到的991个有效样本数据,对于2015年调研未涉及的省份(山西、吉林、河南、新疆)则沿用2006—2007年的调研数据。两次调研均涉及的北方11省农村家庭用煤总量相差仅6.0%,因此可以认为北方地区农村家庭散煤消耗量变化不大,2006—2007年的调研数据能够反映山西、吉林、河南、新疆4省的近况。各省农村地区采暖散煤消耗总量由调研得到的户均消费量乘以该省农户总数得到,详见表1。

表1 2014年北方15省农村地区采暖散煤消耗量

Table 1 Consumption of heating coal in rural areas for 15 provinces of northern China

省份	采暖散煤消耗量(10 <sup>4</sup> t)	省份	采暖散煤消耗量(10 <sup>4</sup> t)
北京	527.8	山东	798
天津	87.2	河南	931.5*
河北	1 362.4	陕西	540.4
山西	2 061.6*	甘肃	152.6
内蒙古	790.1	青海	219.5
辽宁	824.4	宁夏	113.8
吉林	361.2*	新疆	811*
黑龙江	1 454.5	合计	11 036

注:\*采用2006—2007年调研数据。

#### 1.1.2 用于加工成型燃料的秸秆资源量

目前,我国秸秆资源利用的方式主要包括能源化、肥料化、饲料化、基料化、原料化等<sup>[18]</sup>,为了不影响各地区原有的秸秆使用模式,充分保证秸秆成型燃料替代农村地区散煤使用的可行性,本研究考虑将各省原本露天焚烧的秸秆用于加工成型燃料。各省秸秆露天焚烧的比例部分来自于2015年的问卷调研,调研未涉及的省份则采用其他研究的调研结果。部分省份露天焚烧的秸秆量比较大,在完全替代农村采暖散煤之后仍有富余,这部分富余的秸秆则仍视为露天焚烧,不算入替代散煤的秸秆。此外,由于秸秆在收储运及成型燃料加工过程中损耗量不大,故本研究不考虑这部分损耗。各省2014年秸秆露天焚烧量通过式(1)进行计算。

$$S_i = \sum_j Y_{i,j} \cdot R_j \cdot P_i \quad (1)$$

式中: $i$ 为省份; $j$ 为作物种类,本研究 $j$ 取水稻、小麦、

玉米、大豆、花生、棉花;  $Y_{ij}$  为  $i$  省作物  $j$  的产量<sup>[19]</sup>,  $10^4$  t;  $R_j$  为作物  $j$  的草谷比<sup>[20]</sup>, 取值见表 2;  $P_i$  为  $i$  省秸秆露天焚烧的比例, 取值见表 3。

### 1.1.3 成型燃料替代采暖散煤量

本研究在计算秸秆成型燃料对北方农村地区采暖散煤的替代时, 考虑了两种燃料的热值及其在农村地区使用的燃烧效率, 计算方法如式(2)、(3)所示。

$$M_{i,c} = M_{i,s} \cdot h_i \quad (2)$$

$$h_i = \frac{r_s \cdot \eta_s}{r_c \cdot \eta_c} \quad (3)$$

式中:  $M_{i,s}$  和  $M_{i,c}$  分别为  $i$  省用于替代农村采暖散煤的成型燃料量及其所替代的采暖散煤量,  $10^4$  t;  $h_i$  为单位质量的秸秆成型燃料所能替代的采暖散煤量,  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $r_s$  和  $r_c$  分别为秸秆成型燃料和散煤的折标煤系数, 分别取  $0.5 \text{ kgce} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $0.71 \text{ kgce} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[22]</sup>;  $\eta_c$  和  $\eta_s$  分别为散煤和秸秆成型燃料用于农村地区采暖时的燃烧效率, 根据本课题组对自主研发的成型燃料采暖设备以及农村主流散煤采暖设备的实际测试结果,  $\eta_c$  和  $\eta_s$  分别取 80% 和 32.7%<sup>[16,23]</sup>。

### 1.1.4 散煤和秸秆成型燃料生产、运输过程的耗煤量

散煤和秸秆成型燃料从生产到最终使用, 需要经过生产、运输等过程, 这些过程也将产生能耗。散煤和秸秆成型燃料在生产和运输过程中的能耗可以通过使用燃料的量乘以单位质量能源在生产和运输过程中

表 2 各类作物草谷比

Table 2 Residue to product ratio

作物种类	水稻	小麦	玉米	大豆	花生	棉花
草谷比	0.95	1.3	1.1	1.6	1.5	5

表 3 各省秸秆露天焚烧量及比例

Table 3 Percentage and quantity of open burning of straw

省份	秸秆露天焚烧量( $10^4$ t)	焚烧比例	省份	秸秆露天焚烧量( $10^4$ t)	焚烧比例
北京	6.0	8.2% <sup>[20]</sup>	山东	1 865.2	30.1% <sup>a</sup>
天津	25.9	11.8% <sup>a</sup>	河南	1 608.9	20.8% <sup>[20]</sup>
河北	419.1	9.9% <sup>[20]</sup>	陕西	284.0	22.0% <sup>a</sup>
山西	344.4	24.3% <sup>[20]</sup>	甘肃	194.7	18.8% <sup>a</sup>
内蒙古	184.5	6.6% <sup>[20]</sup>	青海	3.0	4.5% <sup>[20]</sup>
辽宁	414.9	22.2% <sup>a</sup>	宁夏	76.9	21.4% <sup>a</sup>
吉林	547.2	14.7% <sup>[20]</sup>	新疆	532.7	15.3% <sup>[20]</sup>
黑龙江	924.5	14.0% <sup>a</sup>	合计	7 431.8	18.0% <sup>b</sup>

注: a 来源于清华大学实地调研结果, 其他未涉及的省份来源于彭立群等<sup>[21]</sup>的调研结果; b 为各省秸秆焚烧比例按各省秸秆焚烧量的加权平均值。

的能耗系数得到。根据 Wang 等<sup>[4]</sup>的研究成果, 1 t 燃煤在生产和运输过程中消耗的能源折合燃煤量为 0.197 t; 根据课题组实地调研结果, 1 t 秸秆成型燃料在生产和运输过程中消耗的能源折合燃煤量为 0.087 4 t。

## 1.2 排放量计算

### 1.2.1 秸秆露天焚烧的排放量

秸秆用于加工成型燃料后, 避免了秸秆露天焚烧, 能减少污染物的排放。这部分污染物排放量可以基于排放因子法计算, 如式(4)所示。

$$EB_{i,k} = r_{ij} \cdot M'_{i,s} \cdot E_{j,k} \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

式中:  $k$  为污染物种类, 本研究取  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{CO}_2$ ;  $EB_{i,k}$  为  $i$  省秸秆露天焚烧的污染物  $k$  减排量,  $10^4$  t;  $r_{ij}$  为  $i$  省秸秆  $j$  的量占秸秆总量的比例;  $M'_{i,s}$  为  $i$  省农村地区采暖秸秆成型燃料的使用量,  $10^4$  t, 本研究重在对比替代前后产生的能耗和排放差异, 农村地区现有秸秆成型燃料使用量不会对本研究的结果产生影响, 因此成型燃料替代散煤取暖前  $M'_{i,s}$  取 0, 替代后  $M'_{i,s}$  则根据前文的方法计算得到;  $E_{j,k}$  为作物  $j$  秸秆露天焚烧的污染物  $k$  排放因子,  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 取值见表 4。

### 1.2.2 农村采暖用能的排放量

北方农村地区采暖用能的污染物排放量通过式(5)进行计算。

$$EH_{i,k} = M'_{i,c} \cdot E_{c,k} \cdot 10^{-3} + M'_{i,s} \cdot E_{s,k} \cdot 10^{-3} \quad (5)$$

式中:  $EH_{i,k}$  为  $i$  省采暖用能的污染物  $k$  排放量,  $10^4$  t;  $E_{c,k}$  和  $E_{s,k}$  分别为农村地区使用散煤和秸秆成型燃料进行采暖时的污染物  $k$  排放因子,  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 取值来源于本课题组在农村地区的实地测试结果(表 5);  $M'_{i,c}$  为  $i$  省农村地区采暖散煤的使用量,  $10^4$  t。

### 1.2.3 散煤和秸秆成型燃料生产、运输过程的排放量

表 4 秸秆露天焚烧排放因子

Table 4 Emission factors for open burning of straw

秸秆种类	排放因子/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$				
	$\text{SO}_2^a$	$\text{NO}_x^a$	$\text{CO}^a$	$\text{PM}_{2.5}^a$	$\text{CO}_2^b$
水稻	0.15	2.25	52.11	3.03	1 460.00
小麦	0.35	2.45	59.29	7.42	1 470.00
玉米	0.31	2.57	68.61	8.35	1 350.00
大豆	0.25	1.10	31.72	2.58	1 380.85
花生	0.25	2.11	55.13	5.76	1 380.85
棉花	0.12	2.83	68.99	11.70	1 445.00

注: a 何敏等<sup>[24]</sup>搜集了秸秆露天焚烧排放因子的现有研究成果, 本研究取其均值; b 大豆、花生  $\text{CO}_2$  排放因子取自曹国良等<sup>[25]</sup>的研究成果, 水稻、小麦、玉米、棉花  $\text{CO}_2$  排放因子取自李建峰等<sup>[26]</sup>的研究成果。

散煤和秸秆成型燃料在生产和运输过程中的排放量可以通过排放因子法计算得到,即排放量通过使用燃料的量乘以单位质量能源在生产和运输过程中的排放因子得到,取值见表6。

## 2 结果与分析

### 2.1 秸秆成型燃料替代农村采暖散煤的可行性分析

基于前文的计算方法,可以从资源数量的角度对秸秆成型燃料替代北方农村地区采暖散煤的可行性

表5 农村地区采暖用能排放因子

Table 5 Emission factors for heating in rural areas

能源种类	排放因子/g·kg <sup>-1</sup>				
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	PM <sub>2.5</sub>	CO <sub>2</sub>
秸秆成型燃料	0.05	1.35	27.6	0.67	1 398.76
散煤	1.78	2.05	61.05	3.73	2 497.23

表6 散煤和秸秆成型燃料生产运输过程的排放因子

Table 6 Emission factors for the production and transportation of coal and molded straw fuels

能源种类	排放因子/g·kg <sup>-1</sup>				
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	PM <sub>2.5</sub>	CO <sub>2</sub>
散煤 <sup>①</sup>	4.45	1.148	0.362	0.764	926.98
秸秆成型燃料 <sup>②</sup>	3.55	0.311	0.039	0.015*	119.04

注:\* 由于缺乏 PM<sub>2.5</sub> 的排放因子数据,故取 PM<sub>10</sub> 排放因子替代。

进行定量分析,结果如表7所示。吉林、黑龙江、山东、河南、甘肃、宁夏、新疆7省,可以通过将露天焚烧的秸秆加工为成型燃料,从而完全替代农村地区采暖散煤的使用;辽宁、陕西的替代率也非常高,分别达到了85.90%和90.35%;河北、天津、内蒙古3省的替代率能达到一半左右;山西由于是产煤大省,农村地区使用采暖散煤的量非常大,因此其替代率较低,为28.77%;北京、青海两省的替代率仅为2%左右,主要是因为其秸秆资源总量小、焚烧比例低,且采暖用煤量相对较大。从北方15省采暖散煤的替代总体情况来看,露天焚烧的秸秆加工为成型燃料后,能够替代68.01%的采暖散煤。综上所述,从资源数量角度来看,秸秆成型燃料替代农村地区采暖散煤在我国北方大部分省份是可行的。

### 2.2 秸秆成型燃料替代农村采暖散煤的能源影响

秸秆作为可再生资源,加工为成型燃料后能够替代散煤的使用,缓解我国化石能源紧缺的压力,本研究重在考虑替代前后化石能源即散煤的用量变化,故暂不考虑秸秆成型燃料的消耗。表7中,散煤总计减少量的计算方法为:替代前后的农村采暖散煤消耗量之差,加上替代后散煤生产运输过程减少的煤耗,再减去成型燃料生产运输过程中消耗的煤量。从表7可见,秸秆成型燃料替代农村采暖散煤能够减少各省煤

表7 秸秆成型燃料替代农村采暖散煤的能源影响清单

Table 7 The inventory of energy impacts after substituting straw molding fuel for heating coal in rural areas

省份	采暖散煤消耗量/10 <sup>4</sup> t		采暖散煤替代率/%	用于替代的成型燃料量/10 <sup>4</sup> t	替代后散煤生产运输过程减少的煤耗量/10 <sup>4</sup> t	成型燃料生产运输过程的煤耗量/10 <sup>4</sup> t	散煤总计减少量/10 <sup>4</sup> t
	替代前	替代后					
北京	527.8	517.5	1.95	6.0	2.0	0.5	11.8
天津	87.2	42.5	51.23	25.9	8.8	2.3	51.2
河北	1 362.4	646.5	52.55	415.6	141.0	36.3	820.7
山西	2 061.6	1 468.5	28.77	344.2	116.8	30.1	679.8
内蒙古	790.1	472.4	40.21	184.4	62.6	16.1	364.1
辽宁	824.4	116.3	85.90	411.0	139.5	35.9	811.7
吉林	361.2	0	100	209.6	71.2	18.3	414.0
黑龙江	1 454.5	0	100	844.2	286.5	73.8	1 667.3
山东	798	0	100	463.2	157.2	40.5	914.7
河南	931.5	0	100	540.7	183.5	47.3	1 067.8
陕西	540.4	52.2	90.35	283.4	96.2	24.8	559.6
甘肃	152.6	0	100	88.6	30.1	7.7	174.9
青海	219.5	214.4	2.33	3.0	1.0	0.3	5.9
宁夏	113.8	0	100	66.1	22.4	5.8	130.4
新疆	811	0	100	470.7	159.8	41.1	929.6
合计	11 036.0	3 530.3	68.01*	4 356.5	1 478.6	380.8	8 603.6

注:\* 北方15省采暖散煤替代率的加权平均值。

炭消耗量 5.9 万~1 667.3 万 t 不等,北方 15 省总计减少散煤消耗量 8 603.6 万 t,其中黑龙江、河南、新疆、山东、河北、辽宁等秸秆资源量大且采暖用煤量大的省份减煤效果最为显著。各省用于替代散煤的秸秆成型燃料在生产运输过程中的耗煤量为 0.3 万~47.3 万 t,总计 380.8 万 t,与替代后所产生的煤炭减少量 8 603.6 万 t 相比,仅占 4.4%。替代后北方地区农村采暖散煤量总计减少 7 505.7 万 t,替代后散煤生产运输过程减少的煤耗量为 1 478.6 万 t,二者对煤耗减少总量的贡献率分别为 87.2%和 17.2%。

秸秆成型燃料替代农村采暖散煤所能产生的耗煤减少量与秸秆焚烧比例、农村散煤消耗量、农村采暖散煤燃烧效率、成型燃料燃烧效率以及散煤和成型燃料生产运输过程的能耗系数有关。本研究分别将各个影响因素在±20%范围内变动,同时保持其他影响因素不变,以此进行各个影响因素的敏感性分析,结果如图 1 所示。替代前的采暖散煤消耗量对煤炭减少量计算结果影响最大,其变化范围为 7 424.1 万~9 419.7 万 t;其次是秸秆成型燃料燃烧效率、采暖散煤的燃烧效率和秸秆露天焚烧比例。散煤和秸秆成型燃料生产运输过程的能耗系数对煤炭减少量的计算结果影响则较小。

### 2.3 秸秆成型燃料替代农村采暖散煤的环境影响

秸秆成型燃料替代农村散煤后,污染物排放量从三方面得以减少:一是农村采暖散煤的使用排放减少,二是替代后散煤生产运输过程的排放减少,三是秸秆露天焚烧量减少;同时,污染物排放量也从两方面增大:一是秸秆成型燃料用于农村采暖带来的排

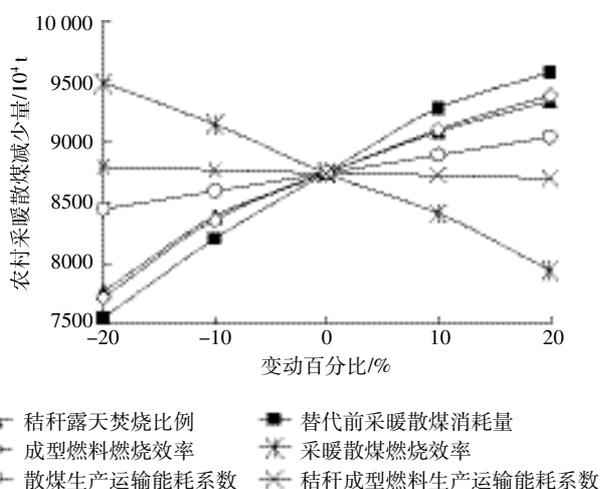


图 1 减煤量敏感性分析

Figure 1 Sensitivity analysis for the reduction of coal consumption

放,二是生产运输秸秆成型燃料过程中的排放。各省替代前后的环境影响清单如表 8 所示。秸秆成型燃料替代农村地区采暖散煤后,北方农村地区 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO、PM<sub>2.5</sub>、CO<sub>2</sub> 排放量分别下降 32.3 万、27.47 万、613.76 万、63.30 万、25 195.29 万 t,减排量靠前的省份为黑龙江、河南、新疆、山东、河北、辽宁。这 6 个省份也是替代量排名靠前的省份,可见秸秆成型燃料替代农村散煤的污染物减排作用显著。

图 2 为不同环节对减排量的相对贡献。替代后 CO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 的减排量主要是来自于农村采暖散煤量的减少;PM<sub>2.5</sub> 和 CO 减排量主要来自于农村采暖散煤量的减少和秸秆露天焚烧的减少;而 SO<sub>2</sub> 的减排量主要来自于替代后散煤生产运输过程排放的减少,其次则是来自于农村采暖散煤的减少。秸秆成型燃料排放的 NO<sub>x</sub>、CO、PM<sub>2.5</sub>、CO<sub>2</sub> 主要产生于燃烧利用过程,而 SO<sub>2</sub> 则主要产生于生产和运输过程。

### 3 讨论

我国 2014 年煤炭消费总量达 41.2 亿 t,占全年能源消费总量的 66.0%<sup>[27]</sup>,这一比例远高于世界平均水平。随着生活水平的提高,我国用能需求量还将继续增大,化石能源短缺的问题将更加紧迫。可再生能源替代化石燃料的使用是减缓气候变化和保证能源

表 8 秸秆成型燃料替代农村采暖散煤的环境影响清单

Table 8 An inventory of environmental impacts from substituting molded straw fuels for heating coal in rural areas

省份	减排量/10 <sup>4</sup> t				
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	PM <sub>2.5</sub>	CO <sub>2</sub>
北京	0.04	0.04	0.86	0.09	34.42
天津	0.19	0.17	3.69	0.39	150.06
河北	3.09	2.63	58.80	6.20	2 407.20
山西	2.56	2.19	49.46	5.19	1 983.46
内蒙古	1.37	1.17	26.56	2.76	1 059.08
辽宁	3.04	2.59	58.17	5.73	2 367.25
吉林	1.55	1.33	30.06	3.03	1 205.37
黑龙江	6.23	5.19	115.86	11.01	4 872.70
山东	3.45	2.93	65.12	6.85	2 686.04
河南	4.03	3.39	74.99	7.70	3 142.03
陕西	2.11	1.79	39.89	4.12	1 641.41
甘肃	0.66	0.56	12.63	1.33	511.66
青海	0.02	0.02	0.42	0.04	17.25
宁夏	0.49	0.42	9.41	0.95	380.95
新疆	3.46	3.06	67.83	7.91	2 736.42
合计	32.3	27.47	613.76	63.30	25 195.29

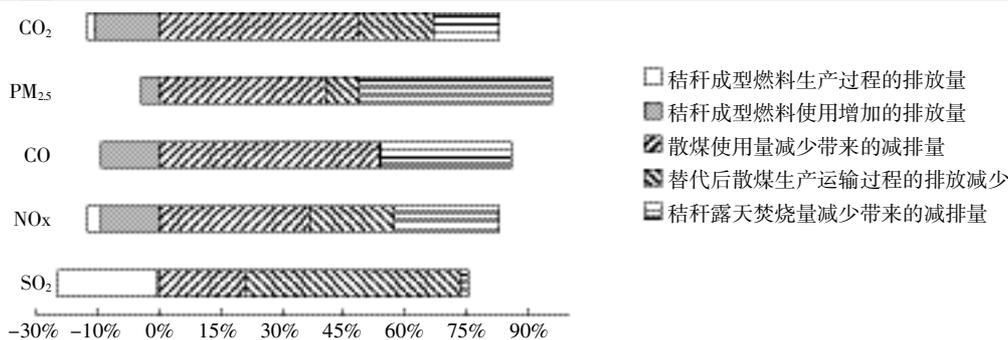


图 2 不同环节对污染物减排量的相对贡献

Figure 2 The contribution ratio of different pollutants to total emissions reduction

安全的重要途径,因而可再生能源的开发和利用受到了越来越多的关注和重视。在我国,生物质能是继水电和风能之后的第三大可再生能源<sup>[28]</sup>,生物质能的利用显得尤为重要。目前,我国生物质能利用的主要途径之一是利用农业和林业废弃物进行发电和采暖。由本研究结果可以看出,2014年我国北方15个省份农村地区采暖耗煤量为11 036万t,约占2014年非工业煤炭消费总量的37.1%。将露天焚烧的秸秆用于加工成型燃料来替代采暖散煤后,北方农村地区采暖散煤消耗量将下降到3 530.3万t,采暖散煤直接用量下降了7 505.7万t,将生产运输能耗算入之后,散煤总计减少量则将达到8 603.6万t。研究结果还发现露天焚烧的秸秆加工为成型燃料能很好地替代我国北方大部分省份农村地区的采暖散煤,秸秆成型燃料对我国农村用能有着巨大的影响潜力。由此可见,秸秆成型燃料替代农村采暖散煤对我国尤其我国农村地区用能问题有着重要的作用,建议政府相关部门在制定秸秆利用相关政策时充分考虑秸秆成型燃料替代农村采暖散煤的巨大节能减煤潜力,尤其在黑龙江、河南、新疆、山东、河北、辽宁等减煤潜力较大的省份,应更加重视秸秆成型燃料对采暖散煤的替代。

我国是农业大国,拥有丰富的秸秆资源,但受农业集约化程度、资金等因素制约,秸秆资源综合利用水平仍然较低<sup>[29]</sup>,还存在大量的焚烧秸秆的现象<sup>[30-32]</sup>。焚烧秸秆不仅造成资源浪费,而且造成严重的大气污染,降低土壤肥力,破坏土壤墒情,减少土壤微生物数量和多样性<sup>[33-35]</sup>。相关研究表明,农民焚烧秸秆的主要原因是农村劳动力减少,劳动力机会成本越来越高导致其他秸秆处置方法成本过高,焚烧秸秆才成为不得已的选择<sup>[36-37]</sup>。因此,解决秸秆露天焚烧问题的关键是要找到合理的利用方式<sup>[38]</sup>。秸秆成型燃料替代散煤后,农户采暖热效率能从32.7%提高至80%,按前文

的计算方法算得1 kg秸秆成型燃料能够替代1.72 kg散煤。若按农户一年采暖用煤量2.5 t,煤价700元(RMB)·t<sup>-1</sup>,秸秆成型燃料250元(RMB)·t<sup>-1</sup><sup>[39]</sup>[市场售价400元(RMB)·t<sup>-1</sup>,除去原料成本150元(RMB)·t<sup>-1</sup>]计算,则秸秆成型燃料采暖只需1.45 t·a<sup>-1</sup>,采暖费用从1750元(RMB)·a<sup>-1</sup>下降到363元(RMB)·a<sup>-1</sup>。若考虑成型燃料采暖设备单价为3000元(RMB),则两年左右就能收回设备成本。由此可见,秸秆成型燃料作为农村地区采暖散煤的替代品,可将秸秆与农户采暖用能及家庭开支等切身利益紧密联系在一起,使秸秆变废为宝,农村秸秆露天焚烧的问题也将得到有效解决。因此,建议政府在落实秸秆禁烧政策时,注重“疏堵结合”,一方面禁止秸秆露天焚烧,一方面也提供合理的秸秆消纳方式。与饲料化、基料化、肥料化、原料化等秸秆消纳途径不同,采暖是北方地区农户的共同需求,秸秆成型燃料替代采暖散煤为秸秆的合理消纳提供了很好的解决途径,应得到相关部门更多的关注。

秸秆成型燃料替代北方农村采暖散煤,能够减少散煤消耗量8 603.6万t,分别减少SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO、PM<sub>2.5</sub>、CO<sub>2</sub>排放量32.3万、27.47万、613.76万、63.30万、25 195.29万t,节能减排效果显著。之所以能够产生巨大的减排量,其主要原因是我国农村采暖设备简陋、燃烧效率低、污染物排放因子大,存在较大的减排空间。按照同样的计算方法,可以计算秸秆成型燃料用于替代工业锅炉燃煤使用的节能减排效果。工业锅炉的排放因子如表9所示。散煤和秸秆成型燃料生产运输过程中的相关参数维持不变,用于替代的秸秆成型燃料量与之前相等,仍为4 356.5万t,并考虑工业锅炉散煤燃烧和秸秆成型燃料燃烧的效率均为80%。计算得到,替代后散煤消耗量减少3 291.59万t,仅为前者煤耗减少量的38.3%;SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO、PM<sub>2.5</sub>、CO<sub>2</sub>排放

表9 工业锅炉排放因子  
Table 9 Emissions factors for industrial boilers

能源种类	排放因子/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$				
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	PM <sub>2.5</sub>	CO <sub>2</sub>
秸秆成型燃料	0.04 <sup>b</sup>	1.18 <sup>b</sup>	1.61 <sup>b</sup>	0.44 <sup>b</sup>	1 398.76 <sup>a</sup>
散煤	10.47 <sup>c</sup>	3.95 <sup>c</sup>	0.81 <sup>c</sup>	0.07 <sup>c</sup>	1 744.26 <sup>c</sup>

注:a、b 由于缺少工业锅炉燃烧秸秆成型燃料的排放因子数据,CO<sub>2</sub>排放因子取值同农村地区成型燃料采暖排放因子,其余排放因子根据 Wang 等<sup>[40]</sup>研究成果中木质成型燃料的排放因子;c 根据谭福太<sup>[40]</sup>的数据计算得到。

量分别减少 31.37 万、19.87 万、269.66 万、33.13 万和 7 689.34 万 t,分别占前者减排量的 97%、72%、44%、52%和 31%。由此可见,秸秆成型燃料替代农村地区采暖散煤与替代工业锅炉用煤相比节能减排效果更为显著。目前,对秸秆成型燃料的研究多以工业锅炉和中小型集中采暖锅炉为对象,建议加强秸秆成型燃料在农村地区的应用研究。此外,政府部门对秸秆成型燃料使用的补贴政策也多面向工业用能单位,建议政府相关部门充分考虑到秸秆成型燃料替代农村燃煤使用的合理性和优越性,加强在农村地区使用秸秆成型燃料补贴政策方面的研究,以促进秸秆成型燃料的合理利用,发挥其最大的作用。

目前,我国成型燃料生产量和使用量比较有限,并且主要用于工业。影响成型燃料推广使用的主要原因之一是秸秆资源比较分散,导致原材料收集成本高、供应不足。将秸秆资源用于农村地区的采暖,能很好地实现分散资源的分布式利用,能够有效避免原材料供应不足的问题。Shan 等<sup>[41]</sup>对秸秆成型燃料在农村地区的应用推广模式进行了分析研究,提出建立村级加工厂的推广模式,并通过四川、黑龙江、吉林的示范案例对该模式推广的可行性进行了论证。虽然我国目前秸秆成型燃料使用量还比较少,仅有的成型燃料还不足以完全作为替代散煤的能源,但本研究给出了秸秆成型燃料替代农村散煤采暖的节能减排清单,验证了这种替代方式的可持续性和优越性,可为秸秆资源能源化利用提供参考和理论支持。进一步的研究则应当对秸秆成型燃料替代农村散煤与其他秸秆消纳途径进行节能减排效果进行对比,如将露天焚烧的秸秆用作饲料或肥料等,以进一步完善本研究结果。

## 4 结论

目前,我国北方农村地区采暖散煤使用量为 11 036 万 t。我国北方大部分省份能够通过秸秆成型燃料的

使用来实现对农村地区采暖散煤的替代。替代后,北方各省总计能够减少散煤使用量 8 603.6 万 t,分别减少 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO、PM<sub>2.5</sub>、CO<sub>2</sub> 排放量 32.3 万、27.47 万、613.76 万、63.30 万、25 195.29 万 t,其中黑龙江、河南、新疆、山东、河北、辽宁煤耗量和排放量减少最多。秸秆成型燃料替代农村采暖散煤有较好的经济性和可持续性,且与替代工业用煤相比,节能减排效果更为显著。目前关于秸秆成型燃料在农村地区的应用和研究尚不多,建议加强秸秆成型燃料在农村地区的应用和研究。由于秸秆成型燃料的研究、应用和补贴政策主要集中于替代工业用煤方面,建议政府及相关部门充分考虑秸秆成型燃料替代农村地区采暖散煤的节能减排潜力,加强秸秆成型燃料替代农村地区用能的研究、应用和补贴力度,从而促进秸秆成型燃料更加合理地利用,最大限度地发挥秸秆成型燃料的节能减排作用。

## 参考文献:

- [1] 田宜水. 生物质固体成型燃料产业发展现状与展望[J]. 农业工程技术:新能源产业, 2009(3):20-26.  
TIAN Yi-shui. Present situation and prospect of biomass solid form fuel industry[J]. *Agricultural Engineering Technology: New Energy Industry*, 2009(3):20-26.
- [2] 姜秋玥, 鞠菲, 周立岱. 秸秆固化成型燃料技术研究进展与展望[J]. 辽宁化工, 2014, 43(7):872-874.  
JIANG Qiu-yue, JU Fei, ZHOU Li-dai. Research progress and prospect of straw densification briquetting fuel[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2014, 43(7):872-874.
- [3] Mylläri F, Karjalainen P, Taipale R, et al. Physical and chemical characteristics of flue-gas particles in a large pulverized fuel-fired power plant boiler during co-combustion of coal and wood pellets[J]. *Combustion & Flame*, 2017, 176:554-566.
- [4] Wang C, Chang Y, Zhang L, et al. A life-cycle comparison of the energy, environmental and economic impacts of coal versus wood pellets for generating heat in China[J]. *Energy*, 2017, 120:374-384.
- [5] Xian H, Colson G, Mei B, et al. Co-firing coal with wood pellets for U. S. electricity generation: A real options analysis[J]. *Energy Policy*, 2015, 81:106-116.
- [6] Judl J, Koskela S, Korpela T, et al. Net environmental impacts of low-share wood pellet co-combustion in an existing coal-fired CHP (combined heat and power) production in Helsinki, Finland[J]. *Energy*, 2014, 77:844-851.
- [7] Zhang Y M, McKechnie J, Cormier D, et al. Life cycle emissions and cost of producing electricity from coal, natural gas, and wood pellets in Ontario, Canada[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(1):538-544.
- [8] 肖宏儒, 钟成义, 宋卫东, 等. 秸秆成型燃料加工装备与掺烧发电研

- 究[J]. 能源研究与利用, 2008(2):31-33.
- XIAO Hong-ru, ZHONG Cheng-yi, SONG Wei-dong, et al. Study on straw molding fuel processing equipment and blending power generation [J]. *Energy Research & Utilization*, 2008(2):31-33.
- [9] 林成先, 杨尚宝, 陈景文, 等. 煤与秸秆成型燃料的复合生命周期对比评价[J]. 环境科学学报, 2009, 29(11):2451-2457.
- LIN Xian-cheng, YANG Shang-bao, CHEN Jing-wen, et al. Hybrid life cycle analysis for coal versus straw briquettes[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(11):2451-2457.
- [10] 李英丽, 王建, 程晓天. 生物质成型燃料及其发电技术[J]. 农机化研究, 2013(6):226-229.
- LI Ying-li, WANG Jian, CHENG Xiao-tian. Biomass briquetting fuel and its applications in power generation technology[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2013(6):226-229.
- [11] 马孝琴, 李刚. 小型燃煤锅炉改造成秸秆成型燃料锅炉的前景分析[J]. 可再生能源, 2001(5):20-22.
- MA Xiao-qin, LI Gang. Prospect analysis of small coal-fired boiler transformed into straw-forming fuel boiler[J]. *Renewable Energy Resources*, 2001(5):20-22.
- [12] 朱金陵, 王志伟, 师新广, 等. 玉米秸秆成型燃料生命周期评价[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6):262-266.
- ZHU Jin-ling, WANG Zhi-wei, SHI Xin-guang, et al. Life cycle assessment of corn straw pellet fuel[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(6):262-266.
- [13] Isobe Y, Yamada K, Wang Q, et al. Measurement of indoor sulfur dioxide emission from coal-biomass briquettes [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2005, 163(1/2/3/4):341-353.
- [14] Yamada K, Sorimachi A, Wang Q, et al. Abatement of indoor air pollution achieved with coal-biomass household briquettes[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42:7924-7930.
- [15] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2012[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Building Energy Conservation Research Center, Tsinghua University. China building energy conservation annual development research report 2012[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2012.
- [16] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2016[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- Building Energy Conservation Research Center, Tsinghua University. China building energy conservation annual development research report 2016[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2016.
- [17] Shan M, Wang P, Li J, et al. Energy and environment in Chinese rural buildings: Situations, challenges, and intervention strategies[J]. *Building & Environment*, 2015, 91:271-282.
- [18] 彭春艳, 罗怀良, 孔静. 中国作物秸秆资源量估算与利用状况研究进展[J]. 中国农业资源与区划, 2014, 35(3):14-20.
- PENG Chun-yan, LUO Huai-liang, KONG Jing. Advance in estimation and utilization of crop residues resources in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2014, 35(3):14-20.
- [19] 国家统计局农村社会经济调查司. 2015 中国农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- Rural Social and Economic Research Bureau of National Bureau of Statistics. 2015 China rural statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2015.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- National Bureau of Statistics Energy Statistics Division. China energy statistics yearbook 2015[M]. Beijing: China Statistics Press, 2015.
- [23] Shan M, Carter E, Baumgartner J, et al. A user-centered, iterative engineering approach for advanced biomass cookstove design and development[J]. Submitted to *Environmental Research Letters* (Accepted).
- [24] 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):1208-1216.
- HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, et al. Emission inventory of crop residues field burning and its temporal and spatial distribution in Sichuan Provinces[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(4):1208-1216.
- [25] 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):1826-1831.
- CAO Guo-liang, ZHANG Xiao-ye, WANG Ya-qiang, et al. Estimation of the emission from farmland straw open burning in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(15):1826-1831.
- [26] 李建峰, 宋宇, 李蒙蒙, 等. 江汉平原秸秆焚烧污染物排放的估算[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2015, 51(4):647-656.
- LI Jian-feng, SONG Yu, LI Meng-meng, et al. Estimating air pollutants Emissions from open burning of crop residues in Jianghan Plain[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2015, 51(4):647-656.
- [27] 国家统计局. 中国统计年鉴 2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- National Bureau of Statistics. China statistical yearbook 2015[M]. Beijing: China Statistics Press, 2015.
- [28] 王仲颖, 任东明, 高虎. 中国可再生能源产业发展报告(2009) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- WANG Zhong-ying, REN Dong-ming, GAO Hu. The renewable energy industrial development report (2009) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [29] 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.
- [30] 王如芳, 张吉旺, 董树亭, 等. 我国玉米主产区秸秆资源利用现状及其效果[J]. 应用生态学报, 2011, 22(6):1504-1510.
- WANG Ru-fang, ZHANG Ji-wang, DONG Shu-ting, et al. Present sit-

- uation of maize straw resource utilization and its effect in main maize production regions of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(6):1504-1510.
- [31] 包建财, 郁继华, 冯致, 等. 西部七省区作物秸秆资源分布及利用现状[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(1):181-187.  
BAO Jian-cai, YU Ji-hua, FENG Zhi, et al. Situation of distribution and utilization of crop straw resources in seven western provinces, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(1):181-187.
- [32] 苏瑜, 黄连光, 王秀敏. 秸秆焚烧现状与对策探讨[J]. *宁夏农林科技*, 2012, 53(3):113-114.  
SU Yu, HUANG Lian-guang, WANG Xiu-min. Analysis on present condition and countermeasures of straw burning[J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2012, 53(3):113-114.
- [33] 宗义, 朱萌嶝, 马龙, 等. 秸秆就地焚烧对大气环境影响及其对策建议[J]. *科技传播*, 2014(6):113-116.  
ZONG Yi, ZHU Meng-di, MA Long, et al. Effects of straw open burning on atmospheric environment and its countermeasures[J]. *Public Communication of Science & Technology*, 2014(6):113-116.
- [34] 毕于运, 王亚静, 高春雨. 我国秸秆焚烧的现状危害与禁烧管理对策[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(27):13181-13184.  
BI Yu-yun, WANG Ya-jing, GAO Chun-yu. Problems of burning straw and its management countermeasures in China[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(27):13181-13184.
- [35] 叶仁宏, 易福华. 焚烧秸秆的危害[J]. *农业装备技术*, 2006, 32(5):55-56.  
YE Ren-hong, YI Fu-hua. The harm of straw open burning[J]. *Agricultural Equipment & Technology*, 2006, 32(5):55-56.
- [36] 梅付春. 秸秆焚烧污染问题的成本-效益分析——以河南省信阳市为例[J]. *环境科学与管理*, 2008, 33(1):30-32.  
MEI Fu-chun. Cost-benefit analysis of straw-burning in China[J]. *Environmental Science and Management*, 2008, 33(1):30-32.
- [37] 张琳, 尹少华. 焚烧秸秆:外部性及政府管制分析[J]. *华商*, 2007(Z2):91-93.  
ZHANG Lin, YIN Shao-hua. Open burning of straw: Analysis of externalities and government regulation[J]. *Chinese Businessman*, 2007(Z2):91-93.
- [38] 邬莉, 陈静, 朱晓东, 等. 农村秸秆焚烧的原因及对策研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2001, 11(增刊1):111-113.  
WU Li, CHEN Jing, ZHU Xiao-dong, et al. Straw-burning in rural areas of China: Causes and controlling strategy[J]. *China Population Resources and Environment*, 2001, 11(Suppl 1):111-113.
- [39] Hu J J, Lei T Z, Wang Z W, et al. Economic, environmental and social assessment of briquette fuel from agricultural residues in China: A study on flat die briquetting using corn stalk[J]. *Energy*, 2014, 64(1):557-566.
- [40] 谭福太. 秸秆建材燃烧特性及生命周期研究[D]. 广州:华南理工大学, 2013.  
TAN Fu-tai. Study on combustion characteristic and life cycle assessment of straw building material[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2013.
- [41] Shan M, Li D K, Jiang Y, et al. Re-thinking China's densified biomass fuel policies: Large or small scale?[J]. *Energy Policy*, 2016, 93:119-126.