

散煤采暖清洁化替代方式的生命周期清单分析

武娟妮,程 亮*,逯元堂,宋玲玲 (环境保护部环境规划院,北京 100012)

摘要: 从生命周期的角度出发,以 1m² 房屋每日的供热量为基准,对散煤采暖,电锅炉,低温空气源热泵,燃气壁挂炉,热电联产集中供热,燃气锅炉集中供热,洁净型煤等 7 种采暖方式的生命周期污染物排放和能源利用效率进行对比分析. 结果发现:相比散煤取暖,清洁采暖方式可有效地降低大气污染物排放量,尤其是 PM₁₀ 和 PM_{2.5}. 其中,以天然气为热源的燃气锅炉集中供热和燃气壁挂炉最为清洁,可减排 SO₂ 和 NO_x 85%左右,减排 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 99%左右;洁净型煤和电锅炉的减排效率相对较低. 低温空气源热泵和热电联产集中供热对能源利用效率最高,可达到 80%以上,而电锅炉仅 30%左右. 此外,改善建筑围护结构保温性能可有效降低农村地区采暖的大气污染物排放.

关键词: 散煤; 清洁采暖; 生命周期; 大气排放; 能效

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2018)04-1570-09

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2018.0190

Life cycle inventory analysis of clean alternatives to scattered coal heating. WU Juan-ni, CHENG Liang*, LU Yuan-tang, SONG Ling-ling (Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China). *China Environmental Science*, 2018,38(4): 1570~1578

Abstract: Comparisons of life cycle pollution emission and energy efficiency among seven heating methods from the perspective of life cycle based on daily heat supply of 1m² housing area were made in this paper. The methods included scattered coal heating, and other clean ones, which were electric boiler heating, low temperature air source heat pump heating, wall-mounted gas boiler heating, cogeneration central heating, gas boiler central heating and clean briquette heating. The results showed that compared with scattered coal heating, clean heating method can efficiently reduce the air emissions, especially significant for PM₁₀ and PM_{2.5}. Among all these methods, gas boiler central heating and wall-mounted gas boiler heating with natural gas are the cleanest, which reduced SO₂ and NO_x by 85%, and reduced PM₁₀ and PM_{2.5} by 99%, and clean briquette heating and electric boiler heating perform worst. Highest energy efficiency (over 80%) could be reached by low temperature air source heat pump heating and cogeneration central heating energy efficiency, and lowest energy efficiency (about 30%) is obtained by electric boiler heating. The results also showed that improving thermal insulation of building envelope is an effective way to keep warm and decrease pollution in rural area.

Key words: scattered coal; clean heating; life cycle; air emission; energy efficiency

采暖期是我国北方地区雾霾的高发期,以京津冀区域为例,2016 年采暖期的 PM_{2.5} 浓度是非采暖期的 2.4 倍,仅 12 月份就发生了 5 次大范围空气重污染过程^[1]. 采暖用散煤因其“数量众多,分布广泛,低空排放,无治理设施”^[2],逐渐被公认为造成北方冬季雾霾的重要原因^[3-5]. 2017 年 5 月,财政部出台了《关于开展中央财政支持北方地区冬季清洁取暖试点工作的通知》,支持试点城市推进清洁方式取暖替代散煤燃烧取暖,并同步开展既有建筑节能改造,实现试点地区散烧煤供暖全部“销号”和清洁替代,形成示范带动效应.

目前大部分文献中对清洁取暖的污染物减

排效果未在同一供暖量下比较,而是直接以燃烧 1t 电煤与燃烧 1t 散煤进行对比. 事实上,由于能源转换和输送过程的损耗,燃烧 1t 电煤产生的电能不足以替代 1t 散煤. 文献[6]在同一供暖量下进行了对比,但未从系统生命周期的角度分析,并且选择的供暖方式较少,未覆盖目前的主要形式. 散煤采暖的清洁化替代不仅是散煤的使用量减少,更带动了上下游能源供应链的变化,所以应从能源生命周期的角度进行比较.

收稿日期: 2017-09-20

基金项目: 财政预算资金项目投资绩效管理支持

* 责任作者, 高级工程师, chengl@caep.org.cn

本文基于生命周期的角度,在相同供热量的基准下,对“电代煤”,“气代煤”,“洁净型煤替代”等主要替代方式的大气污染物排放和能效进行比较,从而为散煤采暖清洁化替代试点工作提供参考。

1 中国北方居民采暖散煤使用情况

由于散煤销售渠道分散,统计难度大,《中国能源统计年鉴》的统计口径低于实际量^[3],文献^[7]采用入户调研的户均散煤消费量计算得出了农村生活用煤量,城镇生活用煤量仍采用《中国能源统计年鉴》的数据,最终得出了 2014 年全国各省(市)的农村和城镇生活散煤用量。据统计,京津冀农村和城镇居民生活用散煤主要用于采暖和炊事等,其中采暖用煤占 90%以上^[8]。本文采用上述散煤用量和采暖用煤占比数据,计算我国北方各省的采暖用散煤量,得出中国北方采暖用散煤约 1.54 亿 t,主要分布在河北,山西,河南,陕西,黑龙江,内蒙古和山东,如图 1 所示。

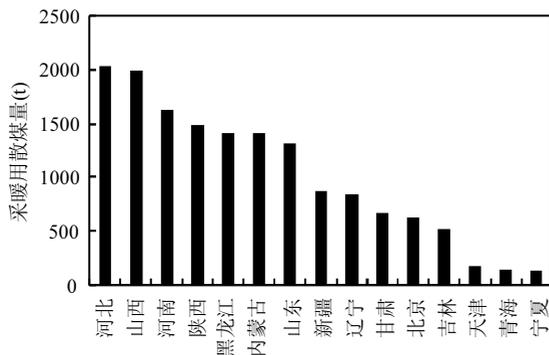


图 1 中国北方各省居民采暖散煤用量(2014 年)

Fig.1 Scattered coal consumption of residential heating in China's northern provinces in 2014

2 散煤采暖清洁化替代生命周期系统界定

2.1 研究对象和功能单位

生命周期评价(LCA)是用于评估产品在其整个生命周期中,即从原材料的获取,产品的生产直至产品使用后的处置,对环境影响的技术和方法,包含目标与范围的确定,生命周期清单分析,生命周期影响评价和生命周期解释等 4 个部

分^[9],广泛应用于能源的环境影响相关研究^[10-12],本文主要开展前两个部分的研究。本文研究对象为散煤采暖,电采暖,气采暖,洁净型煤采暖以及集中供暖等目前主要采暖形式。对于散煤采暖,低变质烟煤由于价格低,易点燃,好烧,在民用散煤中占有较大的比重^[13],所以本文以烟煤作为研究对象。对于电采暖,采用传统的电锅炉和近年来比较热门的低温空气源热泵作为研究对象,低温空气源热泵以空气能和电能转化为热能,制热性能系数更高。气采暖以燃气壁挂炉作为研究对象。对于洁净型煤,本文的研究对象为无烟煤和部分添加剂加工而成的煤球,挥发分含量相对于散煤来说较少,故而燃烧过程污染物排放较少。集中供暖以燃煤热电联产和燃气锅炉为研究对象。本文以 1m² 房子每日供热量为基准,结合文献^[14-15]和笔者的实地调研情况,就目前未进行保温改造的民居,4 个月供暖期内的单位面积供暖负荷约为 90kWh/m²,折合 0.75kWh/(m²·d)。

2.2 系统边界

各种采暖方式的生命周期评价系统边界如图 2 所示。散煤采暖包括煤炭开采,运输,燃烧 3 个环节。电锅炉和低温空气源热泵的生命周期系统是相同的,包括煤炭开采,煤炭运输,燃煤发电,电力输送和电力使用 5 个环节。热电联产集中供热包括煤炭开采,煤炭运输,热电联产和热力输配 4 个环节,由于热电联产会产生电和热两种产品,故而其原料消耗和污染物排放根据产品的产量和热值进行分配。洁净型煤采暖包括煤炭开采,煤炭运输,洁净型煤生产和型煤燃烧 4 个环节。燃气壁挂炉采暖包括天然气开采,天然气输送和天然气燃烧 3 个环节。燃气锅炉集中供暖包括天然气开采,天然气输送,天然气燃烧和热力输配 4 个环节。

本文的目的是比较不同采暖方式的生命周期大气污染物排放和能效,故而对系统的输入主要考虑能源投入,系统的输出主要考虑大气污染物排放。大气污染物选择与雾霾相关的 SO₂,NO_x,PM₁₀ 和 PM_{2.5}。系统输入的除煤炭和天然气以外的能源中,仅电力追溯其上游产业链的能源消耗和污染物排放,其余能源(如柴油、燃料油等)用量

较小,不再对其上游产业链进行追溯.此外,产品 其生产过程的能源消耗和污染物排放折算到本生产,运输,使用等环节涉及的设备服役时间长, 文功能单位下可以忽略不计

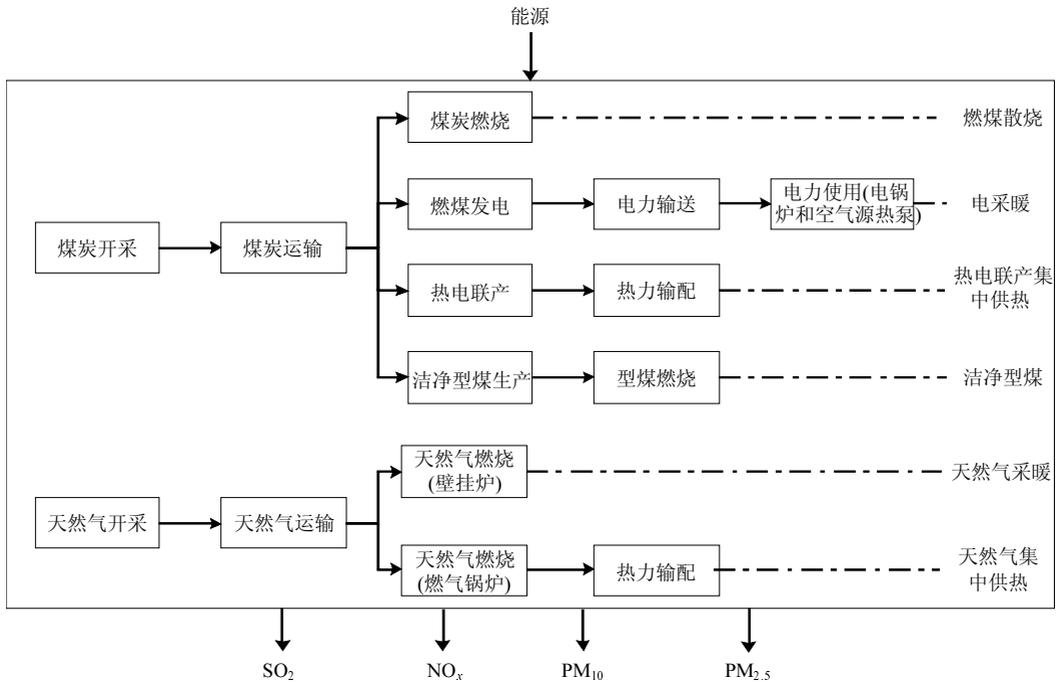


图 2 散煤采暖和清洁采暖的生命周期系统边界

Fig.2 Life cycle system boundary of scattered coal heating and clean heating

2.3 清单和参数

2.3.1 污染物排放和能效计算方法 污染物排放量包括因本环节能源使用产生的直接排放和对该能源生命周期进行追溯产生的间接排放,本文中间接排放仅考虑电力.系统能效为系统最终提供的有效热能占生命周期投入能量总和的比重.计算所需的参数主要来自公开发表文献,部分为实地调研数据.

$$E_i = E_{i \text{ 直接}} + E_{i \text{ 间接}} \quad (1)$$

$$E_{i \text{ 直接}} = \sum M_j \times e_{ji} \quad (2)$$

$$E_{i \text{ 间接}} = P \times e_{pi} \quad (3)$$

式中: E_i 为该环节污染物*i*的总排放量,kg; $E_{i \text{ 直接}}$ 为该环节直接的污染物*i*排放量,kg; $E_{i \text{ 间接}}$ 为对该环节所用电力进行生命周期追溯产生的污染物*i*排放量,kg; M_j 为该环节能源*j*的使用量,kg(或 m^3); e_{ji} 为单位能源*j*的污染物*i*排放量,kg/kg(或 m^3); P 为该环节用电量,kWh; e_{pi} 为单位电力生命周期污染物*i*排放量,kg/kWh.

$$\eta = W \times 3600 / (\sum N_j \times w_j) \quad (4)$$

式中: η 为系统能效; W 为单位面积每日供暖负荷,取 $0.75 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; N_j 为单位供热面积下,系统生命周期每日对一次能源*j*的使用量,kg(或 m^3)/ $(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; w_j 为一次能源*j*的低位发热量 kJ/kg (或 m^3).

2.3.2 散煤采暖(烟煤)清单 1t 烟煤的生命周期各环节的能源输入,产品及大气污染物排放量如表 1 所示.我国煤炭运输主要依靠铁路,目前我国电力机车占 58.1%,其余为柴油动力^[16];电力机车电耗约 $1.024 \text{ kWh}/(100 \text{ t} \cdot \text{km})$,内燃机车油耗约 $0.264 \text{ kg}/(100 \text{ t} \cdot \text{km})$ ^[17].散煤的生产和消费均在北方地区,故煤炭运输距离以陕西神木到石家庄为例,约 510km.

2.3.3 电采暖清单 电采暖以电力作为能源物质,用户端的 1kWh 电力的生命周期各环节的能源输入,产品及大气污染物排放如表 2 所示.煤炭生产环节的参数选取与散煤采暖相同.电煤的运

输距离取我国煤炭平均运输距离,约 700km.供电能耗取国家能源局发布的 2015 年全国供电能耗 315(g 标煤/kWh)^[23].燃煤发电的单位煤耗量 SO₂ 和 NO_x 排放量根据一般火电厂排放限值推算^[6], PM₁₀ 和 PM_{2.5} 分别根据环保部发布的《大气可吸入颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行)》^[24]和《大气细颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行)》^[25]计算,煤炭灰分取 25%.输电损失取国家能源局发布的 2015 年全国线路损失率 6.6%^[23].

表 1 1t 烟煤的生命周期清单

Table 1 Life cycle inventory of 1t bituminous coal

环节	输入	输出
煤炭生产	煤矿石(kg) 2000	烟煤(kg) 1000
	燃料煤(kg) 50 ^[17-18]	SO ₂ (kg) 0.569 ^[19]
	电(kWh) 26.4 ^[17]	NO _x (kg) 0.194 ^[19]
		PM ₁₀ (kg) 0.092 ^[19]
	一次 PM _{2.5} (kg) 0.048 ^[19]	
煤炭运输	柴油(kg) 0.563	NO _x (kg) 0.031 ^[20]
	电(kWh) 3.034	PM ₁₀ (kg) 0.001 ^[20]
		一次 PM _{2.5} (kg) 0.001 ^[20]
煤炭燃烧	烟煤(kg) 1000	SO ₂ (kg) 4 ^[21-22]
		NO _x (kg) 1.6 ^[21]
		PM ₁₀ (kg) 13.5 ^[21]
		一次 PM _{2.5} (kg) 10.8 ^[21]
电力间接排放		SO ₂ (kg) 0.020
		NO _x (kg) 0.015
		PM ₁₀ (kg) 0.027
		一次 PM _{2.5} (kg) 0.007
总排放		SO ₂ (kg) 4.589
		NO _x (kg) 1.840
		PM ₁₀ (kg) 13.620
		一次 PM _{2.5} 10.856

2.3.4 燃煤热电联产集中供热清单 热电联产集中供暖向用户直接提供热能.用户端 1GJ 热能的生命周期各环节的能源输入,产品及大气污染物排放如表 3 所示.煤炭生产和运输环节的参数选取与散煤采暖相同.供热煤耗取 39.3(kg 标煤/GJ),热力输配管网效率取 99%^[26].热电联产环节的污染物排放系数与燃煤发电取相同值.

表 2 1kWh 电的生命周期清单

Table 2 Life cycle inventory of 1kWh electricity

环节	输入	输出
煤炭生产	煤矿石(kg) 0.944	煤炭(kg) 0.472
	燃料煤(kg) 0.024 ^[17-18]	SO ₂ (kg) 2.69×10 ⁻⁴ ^[19]
	电(kWh) 0.013 ^[17]	NO _x (kg) 9.14×10 ⁻⁵ ^[19]
		PM ₁₀ (kg) 4.33×10 ⁻⁵ ^[19]
	一次 PM _{2.5} (kg) 2.27×10 ⁻⁵ ^[19]	
煤炭运输	柴油(kg) 3.65×10 ⁻⁴	NO _x (kg) 2.03×10 ⁻⁵ ^[20]
	电(kWh) 1.97×10 ⁻³	PM ₁₀ (kg) 7.55×10 ⁻⁷ ^[20]
		一次 PM _{2.5} (kg) 7.19×10 ⁻⁷ ^[20]
燃煤发电	煤炭(kg) 0.472	电(kwh) 1.07
		SO ₂ (kg) 4.01×10 ⁻⁴
		NO _x (kg) 4.01×10 ⁻⁴
		PM ₁₀ (kg) 8.51×10 ⁻⁴
	一次 PM _{2.5} (kg) 2.22×10 ⁻⁴	
输电	电(kWh) 1.07	电(kwh) 1
总排放		SO ₂ (kg) 6.80×10 ⁻⁴
		NO _x (kg) 5.20×10 ⁻⁴
		PM ₁₀ (kg) 9.08×10 ⁻⁴
		一次 PM _{2.5} 2.49×10 ⁻⁴

表 3 1GJ 燃煤热电联产热能的生命周期清单

Table 3 Life cycle inventory of 1GJ heat from cogeneration central heating

环节	输入	输出
煤炭生产	煤矿石(kg) 111	煤炭(kg) 55.6
	燃料煤(kg) 2.78 ^[17-18]	SO ₂ (kg) 0.032 ^[19]
	电(kWh) 1.47 ^[17]	NO _x (kg) 0.011 ^[19]
		PM ₁₀ (kg) 0.005 ^[19]
	一次 PM _{2.5} (kg) 0.003 ^[19]	
煤炭运输	柴油(kg) 0.031	NO _x (kg) 1.74×10 ⁻³ ^[20]
	电(kWh) 0.169	PM ₁₀ (kg) 6.47×10 ⁻⁵ ^[20]
		一次 PM _{2.5} (kg) 6.16×10 ⁻⁵ ^[20]
热电联产	煤炭(kg) 55.6	热能(GJ) 1.01
		SO ₂ (kg) 0.047
		NO _x (kg) 0.047
		PM ₁₀ (kg) 0.100
	一次 PM _{2.5} (kg) 0.026	
热能输配	热能(GJ) 1.01	热能(GJ) 1
电力间接排放		SO ₂ (kg) 1.11×10 ⁻³
		NO _x (kg) 8.51×10 ⁻⁴
		PM ₁₀ (kg) 1.48×10 ⁻³
		一次 PM _{2.5} (kg) 4.07×10 ⁻⁴
总排放		SO ₂ (kg) 0.080
		NO _x (kg) 0.061
		PM ₁₀ (kg) 0.107
		一次 PM _{2.5} 0.029

2.3.5 洁净型煤采暖清单 1t 洁净型煤的生命

周期各环节的能源输入,产品及大气污染物排放量如表 4 所示.煤炭生产和运输环节的参数选取与散煤采暖相同.参考某型煤厂的可研报告,型煤生产环节,1t 洁净型煤消耗无烟煤 0.974t, PM₁₀ 排放 0.04kg, PM_{2.5} 排放 0.012kg.洁净型煤一般仅在本地生产和消费,故型煤的运输距离忽略不计.

表 4 1t 洁净型煤的生命周期清单

Table 4 Life cycle inventory of 1t clean briquette

环节	输入		输出	
煤炭生产	煤矿石(kg)	1948	煤炭(kg)	974
	燃料煤(kg)	49 ^[17-18]	SO ₂ (kg)	0.554 ^[19]
	电(kWh)	25.714 ^[17]	NO _x (kg)	0.188 ^[19]
			PM ₁₀ (kg)	0.089 ^[19]
		一次 PM _{2.5} (kg)	0.047 ^[19]	
煤炭运输	柴油(kg)	0.548	NO _x (kg)	0.031 ^[20]
	电(kWh)	2.955	PM ₁₀ (kg)	0.001 ^[20]
			一次 PM _{2.5} (kg)	0.001 ^[20]
型煤生产	煤炭(kg)	974	型煤(kg)	1000
	电(kWh)	12.845	PM ₁₀ (kg)	0.04
			一次 PM _{2.5} (kg)	0.012
型煤燃烧	型煤(kg)	1000	SO ₂ (kg)	2 ^[21]
			NO _x (kg)	0.8 ^[21]
			PM ₁₀ (kg)	1.1 ^[21]
			一次 PM _{2.5} (kg)	0.8 ^[21]
电力间接排放			SO ₂ (kg)	0.028
			NO _x (kg)	0.022
			PM ₁₀ (kg)	0.038
			一次 PM _{2.5} (kg)	0.010
总排放			SO ₂ (kg)	2.582
			NO _x (kg)	1.041
			PM ₁₀ (kg)	1.268
			一次 PM _{2.5}	0.870

2.3.6 天然气采暖清单 用户端 1000m³天然气的生命周期各环节的能源输入,产品及大气污染物排放量如表 5 所示.我国天然气产区主要为西部地区,采用长距离管道输送,输送距离设为 2000km.输送动力设为电力,能耗取 0.5568MJ/(1000m³·km)^[27].由于输送距离较长,存在一定的损耗,本文取 0.2%.各环节的 SO₂和 NO_x排放量根据《燃料燃烧排放大气污染物物料衡算办法(暂行)》^[28].计算,PM₁₀和 PM_{2.5}分别根据《大气可吸入颗粒物一次源排放清单编织技术指南(试行)》^[24]和《大气细颗粒物一次源排放清单编织技术指南(试行)》^[25]计算.

表 5 1000m³天然气的生命周期清单

Table 5 Life cycle inventory of 1000m³ natural gas

环节	输入		输出	
天然气开采	天然气(m ³)	1323 ^[18]	天然气(m ³)	1002
	柴油(kg)	11.196 ^[18]	SO ₂ (kg)	0.504
	燃料油(kg)	11.723 ^[18]	NO _x (kg)	0.240
			PM ₁₀ (kg)	0.025
		一次 PM _{2.5} (kg)	0.022	
天然气输送	天然气(m ³)	1002	天然气(m ³)	1000
	电(kWh)	309.333		
天然气燃烧	天然气(m ³)	1000	SO ₂ (kg)	1.429
			NO _x (kg)	0.63
			PM ₁₀ (kg)	0.03
			一次 PM _{2.5} (kg)	0.03
电力间接排放			SO ₂ (kg)	0.210
			NO _x (kg)	0.161
			PM ₁₀ (kg)	0.281
			一次 PM _{2.5} (kg)	0.077
总排放			SO ₂ (kg)	2.143
			NO _x (kg)	1.031
			PM ₁₀ (kg)	0.336
			一次 PM _{2.5}	0.129

表 6 1GJ 燃气锅炉产生热能的生命周期清单

Table 6 Life cycle inventory of 1GJ heat from gas boiler central heating

环节	输入		输出	
天然气开采	天然气(m ³)	40.39	天然气(m ³)	30.6
	柴油(kg)	0.34	SO ₂ (kg)	0.015
	燃料油(kg)	0.36	NO _x (kg)	0.007
			PM ₁₀ (kg)	7.69×10 ⁻⁴
		一次 PM _{2.5} (kg)	6.87×10 ⁻⁴	
天然气输送	天然气(m ³)	30.6	天然气(m ³)	30.54
	电(kWh)	9.45		
燃气锅炉	天然气(m ³)	30.54	热能(GJ)	1.01
			SO ₂ (kg)	0.044
			NO _x (kg)	0.019
			PM ₁₀ (kg)	9.16×10 ⁻⁴
			一次 PM _{2.5} (kg)	9.16×10 ⁻⁴
热能输配	热能(GJ)	1.01	热能(GJ)	1
电力间接排放			SO ₂ (kg)	0.006
			NO _x (kg)	0.005
			PM ₁₀ (kg)	0.009
			一次 PM _{2.5} (kg)	0.002
总排放			SO ₂ (kg)	0.065
			NO _x (kg)	0.031
			PM ₁₀ (kg)	0.010
			一次 PM _{2.5}	0.004

2.3.7 燃气锅炉集中供热清单 燃气锅炉产生 1GJ 热能的生命周期各环节的能源输入,产品及大气污染物排放量如表 6 所示.天然气开采,运输环节的参数取值以及各环节污染物排放参数取值与天然气采暖相同.热气锅炉效率取 94%,管网

效率取 99%,得出供热气耗为 $30.23\text{m}^3/\text{GJ}$.

2.3.8 用户终端采暖设备能效 不同采暖方式在用户终端使用的设备不同,效率也不同,在供热负荷 $0.75\text{kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 的前提下,各设备的能源使用量见表 7.

表 7 不同采暖方式用户端设备的能效和能源使用量

Table 7 Energy efficiency and energy consumption of client devices using different heating methods

采暖方式	散煤采暖	电采暖		天然气采暖	集中供热		洁净型煤
		电锅炉	低温空气源热泵	燃气壁挂炉	燃煤热电联产	燃气锅炉	
用户端设备	燃煤锅炉	电锅炉	低温空气源热泵	燃气壁挂炉	—	—	洁净型煤炉
设备效率(%)	40 ^[13]	90 ^[1]	240 ^[1]	90 ^[1]	—	—	58 ^[15]
用户端直接使用的能源	烟煤	电	电	天然气	热能	热能	洁净型煤
用户端能源使用量	0.29	0.83kWh	0.31kWh	0.084	0.0027	0.0027	0.23
	$\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	$/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	$/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	$\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	$\text{GJ}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	$\text{GJ}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$	$\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$

注:1)电采暖和天然气采暖设备效率数据来源于在河北省实地调研.2)低温空气源热泵的设备效率即制热能效比COP=空气能热泵产生的热量/空气能热泵消耗的电量.

3 结果与讨论

3.1 清洁化采暖的生命周期污染物减排

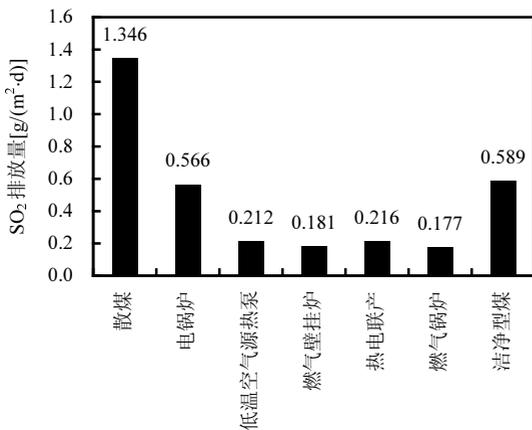


图 3 单位面积每日不同采暖方式的生命周期 SO₂ 排放量

Fig.3 Life cycle SO₂ emission of different heating methods for 1m² housing area per day

不同采暖方式生命周期 SO₂,NO_x,PM₁₀ 和一次 PM_{2.5} 排放量分别如图 3、图 4、图 5 和图 6 所示.相比散煤采暖,电锅炉和洁净型煤 SO₂ 减排率分别为 57.91%和 56.21%,热电联产集中

供暖,低温空气源热泵,燃气壁挂炉和燃气锅炉的 SO₂ 减排率可以达到 85%左右,分别为 83.95%, 84.22%,86.56%和 86.87%.在 NO_x 方面,电锅炉仅下降了 19.63%,主要原因是在当前的燃煤发电大气污染物排放标准下,电煤与散煤相比,对 NO_x 的减排效果相对其它污染物较低.由表 1 和表 2 可见,1t 电煤比 1t 散烧可减少 80%的 SO₂, 85%的 PM₁₀ 和 95%的 PM_{2.5},但 NO_x 仅可减少 50%.洁净型煤,热电联产集中供暖和低温空气源热泵分别减排 NO_x 约 55.99%,69.68%和 69.86%.以天然气为热源的方式对 NO_x 减排率较高,燃气壁挂炉和燃气锅炉供暖的 NO_x 减排率分别达到 83.87%和 84.25%.6 种清洁采暖方式的 PM₁₀ 减排率都较高,从高到低依次为燃气锅炉(99.31%),燃气壁挂炉(99.29%),低温空气源热泵(92.90%),热电联产集中供暖(92.78%),洁净型煤(92.75%)和电锅炉(81.06%).同样,一次 PM_{2.5} 减排率也较高,从高到低依次为燃气锅炉(>99.99%),燃气壁挂炉(99.66%),低温空气源热泵(97.56%),热电联产集中供暖(97.52%),洁净型煤(93.76%)和电锅炉(93.49%).

SO₂ 和 NO_x 是 PM_{2.5} 的前体物,经过化学反应后,生成硫酸盐、硝酸盐、铵盐及有机颗粒物等,

其中硫酸铵和硝酸铵是 $PM_{2.5}$ 的主要成分^[29].假设 17.2%的 SO_2 转换为硫酸铵,16.0%的 NO_x 转换为硝酸铵^[6],则燃气锅炉,燃气壁挂炉,低温空气源热泵,热电联产集中供暖,洁净型煤和电锅炉的 $PM_{2.5}$ 的减排率依次为 98.74%, 98.40%, 95.99%, 95.94%, 90.35%和 89.31%,参见表 8.

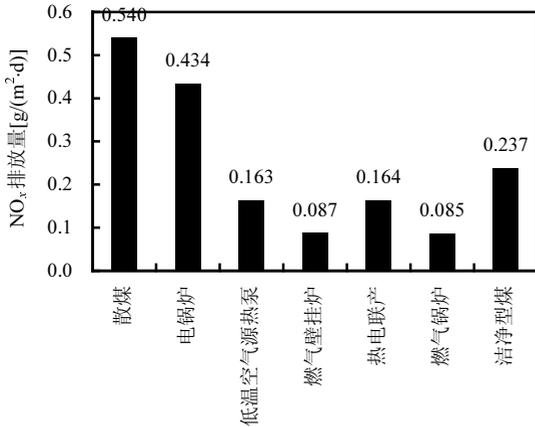


图4 单位面积每日不同采暖方式的生命周期 NO_x 排放量
Fig.4 Life cycle NO_x emission of different heating methods for 1m² housing area per day

综上,以天然气为热源的方式最为清洁,其次为低温空气源热泵和热电联产集中供热,最后为洁净型煤和电锅炉.根据 2014 年我国北方的采暖散煤用量,通过以上方式替代散煤采暖后,以 4 个月的采暖期计算,我国可实现 SO_2 减排 40~61 万 t, NO_x 减排 6~24 万 t, PM_{10} 减排 170~208 万 t, $PM_{2.5}$ 减排 164~181 万 t.

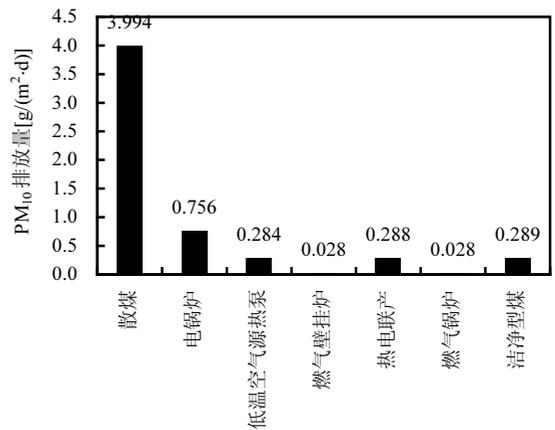


图5 单位面积每日不同采暖方式的生命周期 PM_{10} 排放量
Fig.5 Life cycle PM_{10} emission of different heating methods for 1m² housing area per day

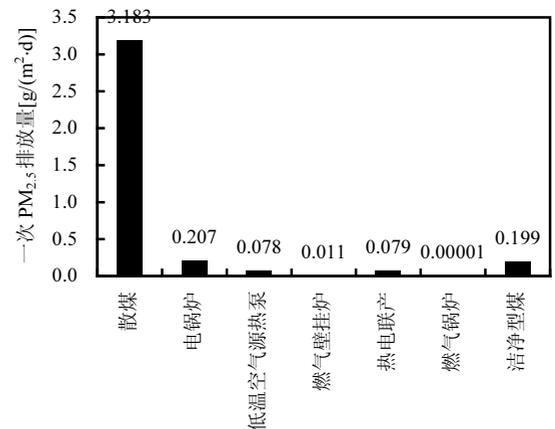


图6 单位面积每日不同采暖方式的生命周期一次 $PM_{2.5}$ 排放量
Fig.6 Life cycle primary $PM_{2.5}$ emission of different heating methods for 1m² housing area per day

表 8 不同采暖方式生命周期 $PM_{2.5}$ 排放量

Table 8 Life cycle $PM_{2.5}$ emission of different heating methods for heating 1m² housing area per day

采暖方式	生命周期排放量[g/(m ² ·d)]			$PM_{2.5}$ 合计[g/(m ² ·d)]	相比散煤下降率(%)	
	硫酸铵	硝酸铵	一次 $PM_{2.5}$			
散煤	0.231	0.086	3.183	3.501	—	
电采暖	电锅炉	0.097	0.069	0.207	0.374	89.31
	低温空气源热泵	0.037	0.026	0.078	0.140	95.99
天然气采暖	燃气壁挂炉	0.031	0.014	0.011	0.056	98.40
集中供暖	热电联产	0.037	0.026	0.079	0.142	95.94
	燃气锅炉	0.030	0.014	≈0.000	0.044	98.74
洁净型煤	0.101	0.038	0.199	0.338	90.35	

3.2 不同采暖方式的生命周期能耗和能效对比

几种采暖方式的生命周期能耗及能效参见图 7,电锅炉和散煤采暖的生命周期能耗量较高,分别为 8.76 和 7.19MJ/(m²·d),所以能源利用效率最低,分别为 30.82%和 37.58%.其次为洁净型煤,燃气壁挂炉和燃气锅炉,能耗量分别为 4.98, 4.32 和 4.22MJ/(m²·d),能效分别为 54.17%,62.44%和 63.92%.低温空气源热泵和热电联产集中供热的能耗量较低,分别为 3.29 和 3.34MJ/(m²·d),所以能效较高,分别为 82.18%和 80.74%.由于燃煤发电的能效较低,所以直接用电能加热的电锅炉能效较低,而低温空气源热泵利用空气能,可将电能做功放大 1.8~3.2 倍(本文取 2.4 倍),提高了一次能源的利用效率,但需要指出的是,空气源热泵的应用范围受到气候条件的约束,室外温度低于其适用温度时,热泵的制热效率会急剧下降,从而影响系统生命周期能效以及污染物的减排效果.热电联产集中供热利用的是电厂发电余热,所以其能源利用效率要远高于单纯的发电.

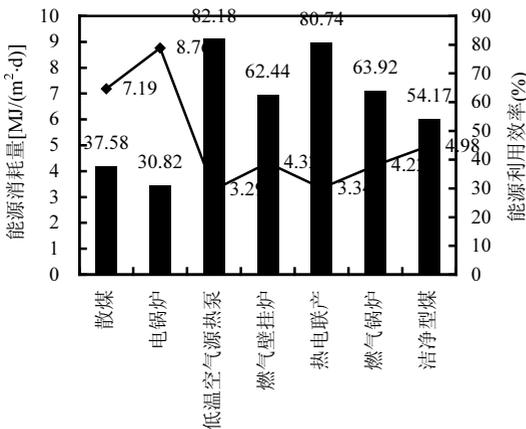


图 7 不同采暖方式的生命周期能耗和能效

Fig.7 Life cycle energy consumption and energy efficiency of different heating modes

■ 能源利用效率 ◆ 能源消耗量

3.3 建筑保温改造的减排效果

中国农村,城乡结合部 80%左右的农宅(北京约 72%,天津约 85%,河北约 89%)^[6]没有保温措施,热工性能差,热量散失严重,能耗高.降低建筑能耗^[30].如对所有农宅完成保温改造,按 30%~40%

的节能量计算,即使在燃烧散煤的情况下,以 4 个月采暖期计算,我国相比 2014 年可实现 SO₂ 减排 17~23 万 t, NO_x 减排 7~9 万 t, PM₁₀ 减排 50~67 万 t, PM_{2.5} 减排 44~59t.

4 结论

4.1 从生命周期的角度,清洁采暖方式均可有效降低大气污染物排放,其中以天然气为热源的燃气锅炉集中供热和燃气壁挂炉最为清洁,相比散煤,可减排 SO₂ 和 NO_x 85%左右,减排 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 99%左右;其次为低温空气源热泵和热电联产集中供热;洁净型煤和电锅炉减排率最低.

4.2 以 4 个月采暖期计算,通过北方地区清洁采暖替代散煤后,我国相比 2014 年可实现 SO₂ 减排 40~61 万 t, NO_x 减排 6~24 万 t, PM₁₀ 减排 170~208 万 t, PM_{2.5} 减排 164~181 万 t.

4.3 从生命周期能效上看,低温空气源热泵(82.18%)和热电联产集中供热(80.74%)的能源利用效率最高,其次为燃气锅炉(63.92%),燃气壁挂炉(62.44%)和洁净型煤(54.17%).最后为散煤采暖(37.58%)和电锅炉(30.82%).

4.4 对农宅完成保温改造后,即使在燃烧散煤的情况下,在 4 个月采暖期内,我国相比 2014 年可实现 SO₂ 减排 17~23 万 t, NO_x 减排 7~9 万 t, PM₁₀ 减排 50~67 万 t, PM_{2.5} 减排 44~59t.所以解决农村燃煤污染问题,改善建筑围护结构保温性能是重要的途径.

参考文献:

- [1] 环境保护部.环境保护部发布 2016 年全国城市空气质量状况 [EB/OL]. 北京:环境保护部, 2017[2017-01-23].http://www.mep.gov.cn/xxgk/hjyw/201701/t20170123_395142.shtml.
- [2] 钟连红,刘 晓,李志凯,等.北京居民生活用煤大气污染控制思路与对策 [J]. 环境保护, 2015,43(3):77-78.
- [3] 王春兰,许 诚,徐 钢,等.京津冀地区天然气和热泵替代燃煤供暖研究 [J]. 中国环境科学, 2017,37(11):4363-4370.
- [4] 赵文慧,姜 磊,张立坤,等.北京平原区平房冬季燃煤量及污染物排放估算 [J]. 中国环境科学, 2017,37(3):859-867.
- [5] 贺晋瑜,燕 丽,雷 宇,等.京津冀地区燃煤锅炉 PM_{2.5} 减排潜力分析 [J]. 中国环境科学, 2017,37(4):1247-1253.
- [6] 徐 钢,王春兰,许 诚,等.京津冀地区散烧煤与电采暖大气污染物排放评估 [J]. 环境科学研究, 2016,29(12):1735-1742.

- [7] 霍沫霖,赵佳,徐朝,等.中国散烧煤消费地图及影响因素研究 [J]. 中国电力, 2017,50(1):1-8.
- [8] 柴发合,薛志钢,支国瑞,等.农村居民散煤燃烧污染综合治理对策 [J]. 环境保护, 2016,44(6):49-50.
- [9] ISO 14040-1997. Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework [S].
- [10] Dubreuil A. Inventory for energy production in Canada [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2001,6(5):281-284.
- [11] Babbitt C W, Lindner A S. A life cycle inventory of coal used for electricity production in Florida [J]. Journal of Cleaner Production, 2005,13(9):903-912.
- [12] Ou X, Zhang X, Chang S. Alternative fuel buses currently in use in China: Life-cycle fossil energy use, GHG emissions and policy recommendations [J]. Energy Policy, 2010,38(1):406-418.
- [13] 麦方代,王东升,刘明锐,等.京津冀地区洁净型煤使用现状及建议 [J]. 环境保护, 2016,44(6):25-27.
- [14] 孟山青,刘靖,袁涛,等.基于 DeST 的忻州市某农村住宅节能改造分析 [J]. 建筑技术开发, 2016,43(4):66-68.
- [15] 叶建东,章永洁,蒋建云,等.农村型煤替代散煤采暖对比分析 [J]. 建筑节能, 2016,(11):102-103.
- [16] 国家铁道部.2016 年铁道统计公报 [R]. 北京:国家铁道部, 2016.
- [17] 丁宁,杨建新.中国化石能源生命周期清单分析 [J]. 中国环境科学, 2015,35(5):1592-1600.
- [18] 袁宝荣,聂祚仁,狄向华,等.中国化石能源生产的生命周期清单(I)——能源消耗与直接排放 [J]. 现代化工, 2006,26(3):59-62+64.
- [19] 王慧丽,雷宇,陈潇君,等.京津冀燃煤工业和生活锅炉的技术分布与大气污染物排放特征 [J]. 环境科学研究, 2015,28(10):1510-1517.
- [20] 环境保护部.非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南(试行) [R]. 北京:环境保护部, 2014.
- [21] 环境保护部.民用煤大气污染排放清单编制技术指南(试行) [R]. 北京:环境保护部, 2016.
- [22] 雷宇.散煤治理与大气污染防治 [J]. 化工管理, 2016,(31):33-34.
- [23] 国家能源局.国家能源局发布 2015 年全社会用电量 [EB/OL]. 北京:国家能源局, 2016[2016-01-15]. http://www.nea.gov.cn/2016-01/15/c_135013789.htm.
- [24] 环境保护部.大气可吸入颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行) [R]. 北京:环境保护部, 2014.
- [25] 环境保护部.大气细颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行) [R]. 北京:环境保护部, 2014.
- [26] 赵红石,付卫东,张杏静,等.热电联产项目供热煤耗计算探讨 [J]. 能源与节能, 2017,(1):189-190.
- [27] 付子航.煤制天然气碳排放全生命周期分析及横向比较 [J]. 天然气工业, 2010,30(9):100-104.
- [28] 环境保护部.燃料燃烧排放大气污染物物料衡算办法(暂行) [Z]. 2003.
- [29] Zhang Y, Huang W, Cai T, et al. Concentrations and chemical compositions of fine particles (PM_{2.5}) during haze and non-haze days in Beijing [J]. Atmospheric Research, 2016,174-175:62-69.
- [30] 李军.北京周边农村住宅节能改造效果分析 [J]. 节能与环保, 2015,(2):66-67.

作者简介: 武娟妮(1984-),女,山西朔州人,工程师,硕士,主要从事环境规划与管理研究.发表论文 7 篇.