

# 中外火电节能减排效率分析与比较

刘志强<sup>1,2</sup>, 赵毅<sup>1</sup>, 潘荔<sup>2</sup>

(1.华北电力大学环境科学与工程学院, 北京 102206; 2.中国电力企业联合会, 北京 100761)

**[摘要]** 本文对中国、日本、德国、美国、韩国以及经济合作与发展组织的电力发展情况进行了总结分析, 并依据各国电力发展状况及构成对发电热效率、碳排放强度、污染物排放强度进行了比较及分析。结果表明: 我国煤电热效率已经达到世界先进水平, 与日本相当, 高于其他国家; 气电、供热已经成为影响火电热效率的重要因素; 我国煤电碳排放强度低于日本、德国等发达国家; 由于气电比重较低, 我国火电碳排放强度、发电碳排放强度均高于其他国家; 我国火电大气污染物排放强度、单位国土面积电力污染物排放强度低于其他国家, 但总体空气质量不及其他国家。下一阶段我国应继续提高气电比重, 加大现有火电的供热比重和节能改造力度, 持续提高热效率; 重点发展低碳发电技术与可再生能源发电技术是应对碳约束的主要手段; 应重点关注非电行业污染物排放情况。

**[关键词]** 火电; 煤电; 气电; 热效率; 碳排放强度; 污染物排放强度

**[中图分类号]** TK05 **[文献标识码]** A **[DOI编号]** 10.19666/j.rlfid.202009232

**[引用本文格式]** 刘志强, 赵毅, 潘荔. 中外火电节能减排效率分析与比较[J]. 热力发电, 2021, 50(3): 9-18. LIU Zhiqiang, ZHAO Yi, PAN Li. Analysis and comparison of energy saving efficiency and emission reduction efficiency of thermal power between China and foreign countries[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(3): 9-18.

## Analysis and comparison of energy saving efficiency and emission reduction efficiency of thermal power between China and foreign countries

LIU Zhiqiang<sup>1,2</sup>, ZHAO Yi<sup>1</sup>, PAN Li<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;  
2. China Electricity Council, Beijing 100761, China)

**Abstract:** The power industry development of China, Japan, Germany, the United States, South Korea and OECD was summarized in this paper. Moreover, the power generation efficiency, carbon emission and pollutant emission intensity were compared according to the power development status and composition of power generation modes in these countries. The results show that, China's coal-fired power generation efficiency has reached advanced level in the world, which is equivalent to Japan, higher than other countries. The gas power and heating has become the important factors affecting the thermal efficiency of thermal power plants. The carbon emission intensity of coal-fired power in China is lower than that of developed countries such as Japan and Germany. Due to the low proportion of gas power, the carbon emission intensity of thermal power and power generation in China is higher than that of other countries. The emission intensity of air pollutants from thermal power plants in China is lower than that of other countries, and the emission intensity of electric pollutants from unit land area of other countries is higher than that of China, but the air environment quality is much better than that of China. In the next stage, China should continue to increase the proportion of gas power, increase the heating proportion of existing thermal power and energy-saving renovation efforts, for improving the thermal efficiency. Developing low carbon power generation technology and renewable energy technology are the main means to deal with carbon constraint. More attentions should be paid to the emission of pollutants from other industries.

**Key words:** thermal power, coal-fired power, gas power, thermal efficiency, carbon emission intensity, emission intensity of pollutants

收稿日期: 2020-09-09

基金项目: 中国电力企业联合会 2020 年研究课题

Supported by: Research Project of China Electricity Council in 2020

第一作者简介: 刘志强(1982), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电力行业节能减排技术, liuzhiqiang@cec.org.cn.

提高能源利用效率是世界各国能源利用的重点和永恒主题，是中国实现“二氧化碳排放力争 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和”国家自主贡献承诺的有效手段。在保障能源安全和应对气候变化的背景下，目前世界各国普遍加快能源转型步伐，很多国家将提升能效作为能源转型的首要选择，制定了更高的能效目标，并出台更积极的能效政策<sup>[1]</sup>。电力行业是能源转换行业，是煤炭和天然气的消耗大户，2017 年世界火电行业（含热电联产机组）燃煤量占全世界煤炭消耗量的 62.1%，燃天然气量占比为 38.9%<sup>[2]</sup>。持续提高火电机组的发电热效率在推进能源转型、降低温室气体排放方面具有重要的现实意义。

### 1 世界电力发展情况

电力是工业化进程的“助推器”，着力提升全社会电气化水平是推动能源转型的重要途径。根据 BP 的统计<sup>[3]</sup>，2019 年全世界发电量达到 27 004 TW h，除 2009 年金融危机造成发电量的下降外，其他年份均实现了发电量的增长，其中近 10 年来年均增速达到 2.5%。煤电发电量占总发电量的比重长期在 40% 上下波动，近年来呈持续下降趋势，2019 年降至 36.4%；天然气发电量占比从 2000 年以前的 15% 左右缓慢增长至 2019 年的 23.3%；煤电发电量的占比逐步降低，主要被以风电、太阳能发电为主的非水可再生能源进行了增量替代，非水可再生能源发电量占比由 2005 年的 2.0% 增长至 2019 年的 10.4%。

图 1 为 2000—2019 年世界发电量及其构成，图 2 为各发电品种发电量占比变化情况。

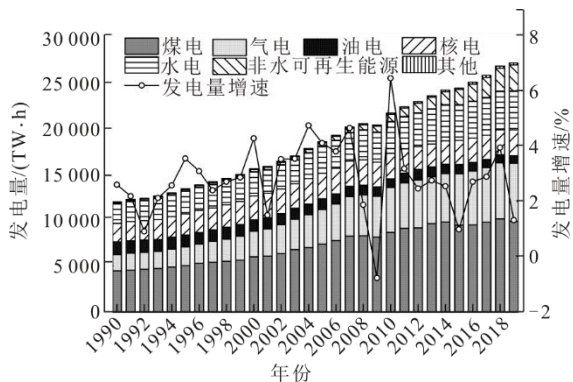


图 1 2000—2019 年世界发电量及其构成  
Fig.1 The world electricity generation and its composition in 2000—2019

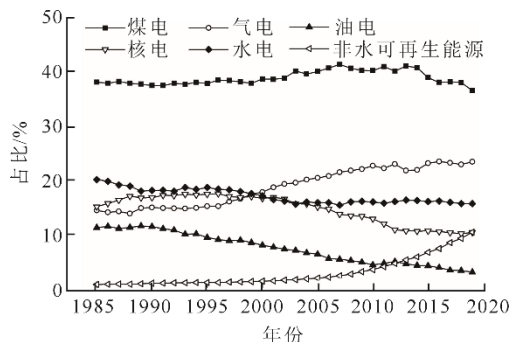


图 2 各发电品种发电量占比变化情况  
Fig.2 Changes of the power generation proportions

从世界各国看，2019 年发电量排名前 10 的国家为中国、美国、印度、俄罗斯、日本、加拿大、巴西、德国、韩国、法国，合计发电量占世界的 69.0%。其中，中国、美国、印度、俄罗斯、日本发电量分别占世界总发电量的 26.7%、16.3%、5.8%、4.1%、3.8%，其他排名前 10 国家均在 2%~3% 之间。

从世界各国发电量结构看，加拿大、巴西以水电为主，法国以核电为主，中国、美国、印度、俄罗斯、日本、韩国火电发电量占比均超过 60%，世界平均为 62.8%，经济合作与发展组织 (OECD) 国家平均为 53.7%。

2019 年世界、OECD 国家以及世界发电量前 10 国家发电量构成如图 3 所示。

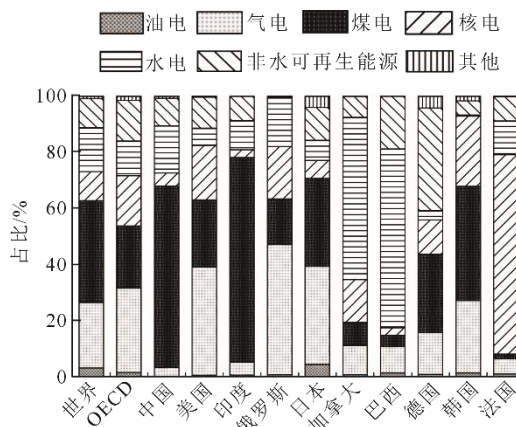


图 3 2019 年世界、OECD 以及世界发电量前 10 国家发电量构成

Fig.3 The world, OECD and the world's top 10 countries in electricity generation constitute electricity generation in 2019

本文选取中国、美国、日本、德国、韩国以及 OECD 国家均值进行火电热效率、碳排放及大气污染物排放比较，上述国家 2019 年发电量及构成如图 4 所示。

由图4中各个国家的发电量构成可知,中国主要以煤电为主,OECD国家、美国及日本气电占比较大,德国和韩国的发电量结构比较均衡。

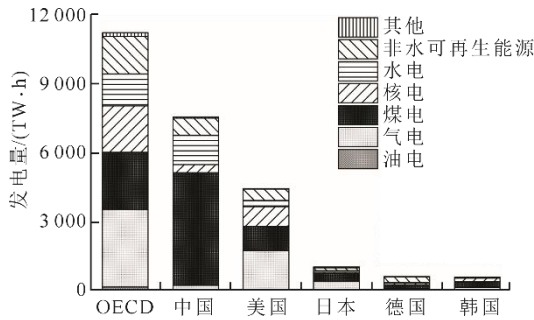


图4 2019年部分国家发电量及其构成

Fig.4 The electricity generation and its composition in some countries in 2019

## 2 热效率分析与比较

### 2.1 比较方法

本文基于国际能源署(IEA)历年发布的电力信息数据<sup>[4]</sup>,采用正平衡方式计算国外火电各类型机组发电热效率。为保证比较的一致性,本文的发电热效率是指统计期内发电量、供热量的当量热量之和与燃料总输入热量的比值,按式(1)进行计算。对于纯凝机组,我国与IEA统计方法基本相同;对于热电联产机组,我国电力行业分类统计发电用煤及供热用煤,并对应计算发电煤耗和供电煤耗,数据来自中国电力企业联合会<sup>[5]</sup>。为保证数据的可比性,我国热电联产机组热效率采用式(2)进行计算。

$$\eta = \frac{Q_{gr} + W_f}{Q_{sr}} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{Q_{gr} + W_f}{Q_{gr} \times b_r + W_f \times b_f} \quad (2)$$

式中: $\eta$ 表示热效率, $Q_{gr}$ 表示供出热量, $W_f$ 表示发电量, $Q_{sr}$ 表示燃料输入热量, $b_r$ 表示供热煤耗, $b_f$ 表示发电煤耗,式中未考虑热量、电量、标煤量的折算因数。

式(1)、式(2)可计算煤电、气电、其他发电类型以及整个火电行业的发电热效率。

### 2.2 煤电热效率

#### 2.2.1 纯凝机组

1990年,中国、OECD、美国、德国、日本的燃煤纯凝机组发电热效率分别为31.3%、36.7%、36.8%、37.2%、39.4%。2005年之前中国的燃煤发电技术水平、运行水平低于美、德、日等国家。

“十一五”以来,我国煤电技术水平迅速提高,纯凝机组平均发电热效率2007年超过美国,2008年超过OECD均值,2009年超过韩国,2010年超过德国,2017年与日本持平。煤电纯凝机组发电热效率比较如图5所示。

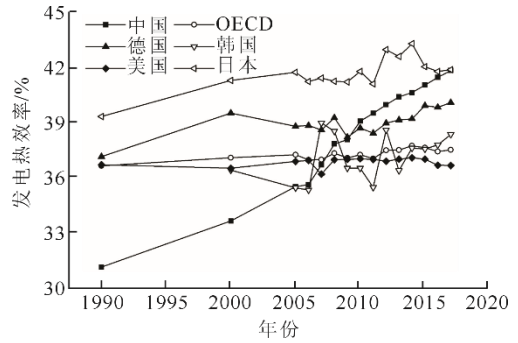


图5 煤电纯凝机组发电热效率比较

Fig.5 Comparison of thermal efficiency of coal-fired pure condensate units

中国煤电热效率快速提高的主要原因<sup>[6]</sup>包括发电技术水平的提升、先进成熟技术的大规模应用、运维管理水平的逐步提高等。即通过煤电技术的引进、消化、吸收、创新,“十一五”以来大规模的高参数、大容量机组建设,以及关停低效小煤电机组实现的煤电升级换代。2006—2018年,累计关停机组1.4亿kW,新增煤电装机占煤电总装机的73%。其他国家煤电效率变化不大的主要原因是进入21世纪年以来,尤其是2010年以来煤电发电量持续降低,新建机组较少(发达国家50%煤电机组平均服役年限在40年左右<sup>[7]</sup>),通过新建机组提高煤电热效率的支撑不足。以2005年为基准年,2017年中国、韩国、日本煤电发电量分别增长123.7%、68.0%、5.3%;美国、OECD、德国煤电发电量分别下降39.9%、26.2%、16.0%。

此外,虽然中日燃煤发电热效率基本相同,但由于中国煤电除承担日常发电、供热任务外,还承担调峰、调频等任务,年利用小时较低,日常负荷波动大。2014年以来,中国煤电年利用小时在4000~4500h之间波动。通过煤电发电量与煤电装机对年利用小时进行估算,日本、韩国明显高于其他国家,超过6000h;近年来中国、美国、德国维持在4000~5000h之间。如不考虑负荷低、调峰频繁等因素,在同等运行条件下,中国煤电实际发电热效率平均水平应高于日本。

煤电年利用小时变化情况如图6所示。



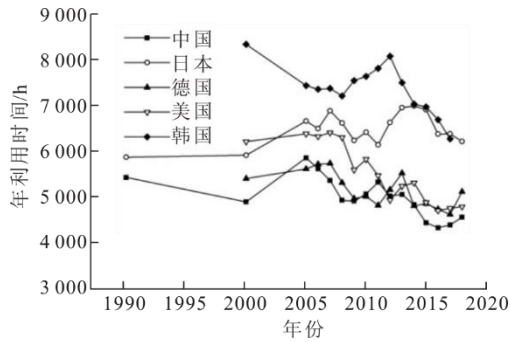


图6 煤电年利用小时变化情况

Fig.6 Changes of annual utilization hour of coal-fired power

### 2.2.2 热电联产机组

热电联产机组利用高品质的能量发电、较低品质的能量供热，可实现能量的梯级利用，提高能源利用效率<sup>[8]</sup>，供热期供电机组的煤耗明显低于同容量同压力等级纯凝机组。煤电供热机组综合热效率如图7所示。

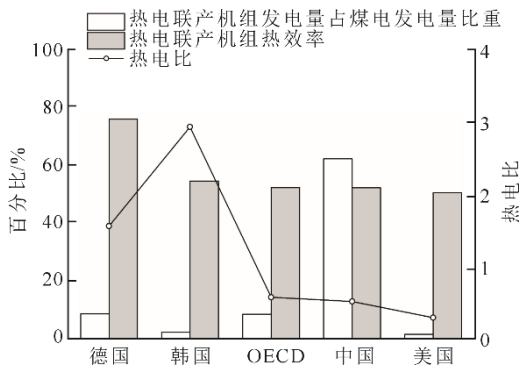


图7 煤电供热机组综合热效率

Fig.7 The comprehensive thermal efficiency of coal power heating unit

世界各国供热机组占比相差较大，美国煤电热电联产机组发电量占煤电发电量比重不到2%，德国以及OECD国家均值均不及9%，我国则超过62%。从热电比看，2017年韩国、德国、OECD、中国、美国热电联产机组全年平均热电比分别为2.92、1.56、0.58、0.53、0.30，德国、韩国的热电比较高的主要原因是工业热负荷较大。从热效率看，2017年德国、韩国、OECD、中国、美国热电联产机组热效率分别为75.7%、54.5%、52.2%、52.1%、50.5%。

### 2.2.3 煤电机组合计

从煤电机组（纯凝与热电联产机组）的整体热效率看，2017年中国、德国、韩国、OECD、美国煤电热效率分别为48.6%、44.3%、39.6%、39.0%、37.0%；其中，供热对整体煤电效率的贡献分别为

6.7百分点、4.2百分点、1.2百分点、1.4百分点、0.2百分点（IEA未统计日本供热机组情况）。受供热因素影响，德国煤电整体热效率表现上高于日本。煤电整体发电供热综合热效率比较如图8所示。

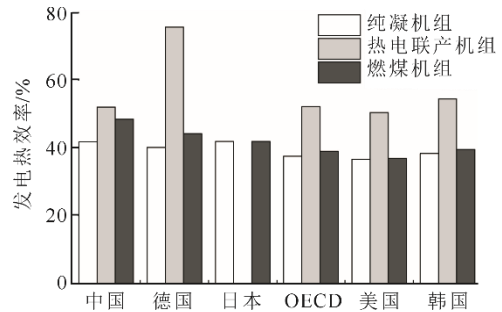


图8 部分国家煤电整体发电供热综合热效率比较

Fig.8 Comparison of the integrated thermal efficiency of coal generating and heating in some countries

### 2.3 气电热效率

气电因具有发电热效率高、启停快、利于调节、碳排放相对较低等特点<sup>[9]</sup>，近年来得到快速发展。气电机组发电热效率变化情况如图9所示。

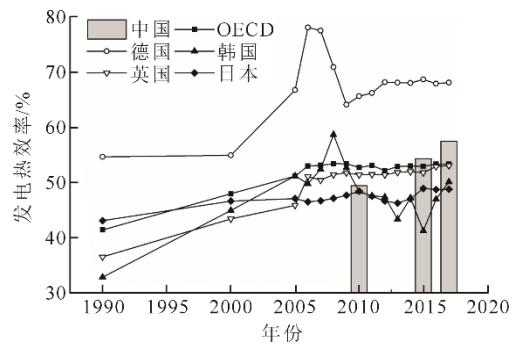


图9 气电机组发电热效率变化情况

Fig.9 Changes of thermal efficiency of gas power

考虑供热因素，美国、OECD气电效率在50%~55%之间；德国气电供热占比较大，2017年气电中的热电联产机组发电量占气电发电量的76%，所以气电发电热效率较高，近年来维持在68%左右；“十一五”以来，我国气电发电量增速加快，应用了一批世界上先进的燃气-蒸汽联合循环机组等<sup>[10]</sup>，发电热效率由2010年的50%左右增长至当前的57.6%（含供热）左右。IEA未公布日本气电供热情况，日本气电纯凝机组效率在46%~49%之间。

### 2.4 火电热效率

因气电热效率高于常规燃煤发电机组，再叠加气电供热等因素影响，火电整体发电效率较煤电提高较多。火电热效率变化情况如图10所示。

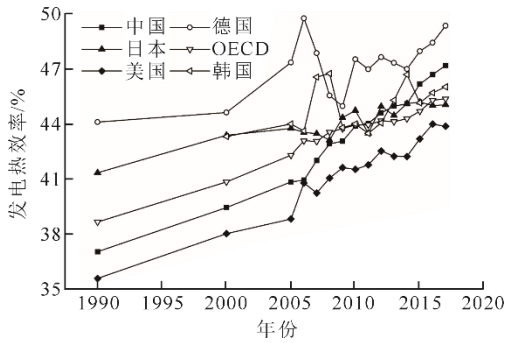


图 10 火电效率变化情况  
Fig.10 Changes of thermal efficiency of thermal power

2017 年，德国、中国、韩国、OECD、日本、美国火电效率分别为 49.3%、47.2%、46.0%、45.3%、45.0%（不含供热）、43.8%，由此可以看出，除中国、日本外，其他国家火电效率较煤电大幅提高，其主要原因是气电的贡献。

不同火电发电类型对火电整体热效率的贡献如图 11 所示。

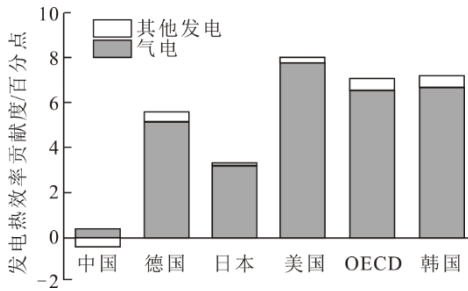


图 11 不同火电发电类型对火电整体热效率的贡献  
Fig.11 The contributions of different thermal power generation types to thermal power efficiency

如以煤电为基准，美国、韩国、OECD、德国、日本、中国气电对火电效率的贡献率分别为 7.8 百分点、6.7 百分点、6.5 百分点、5.2 百分点、3.2 百分点、0.4 百分点，凸显中国因气电占比较小，热效率贡献低的特点。生物质、垃圾等发电形式热效率低于煤电和气电<sup>[11]</sup>，但由于其有供热，总体和煤电效率基本相当，对热效率的贡献在 0.1 百分点~0.6 百分点之间，其中，由于我国生物质发电等供热数据相对缺乏，如仅考虑纯凝模式，对发电热效率的贡献为负值(-0.4 百分点)。

### 3 电力碳减排效率分析与比较

#### 3.1 比较方法

从对电力发展的约束性角度看，温室气体排放控制要求是能源电力转型的主要动力，是火电尤其是煤电的硬约束<sup>[12]</sup>。实现低碳电力发展的措施包括

调整发电结构、发展清洁火电技术、提高煤电效率等。上述 3 项措施可用单位发电量二氧化碳排放量（发电碳排放强度）、单位火电发电量二氧化碳排放量（火电碳排放强度）、单位煤电发电量二氧化碳排放量（煤电碳排放强度）等 3 个指标进行比较和分析，计算公式为

$$P_{CO_2} = \frac{T_{CO_2}}{W_f} \quad (3)$$

式中： $P_{CO_2}$  表示某发电类型的碳排放强度， $T_{CO_2}$  表示某发电类型的二氧化碳排放量， $W_f$  表示发电量。

日本发电、火电碳排放强度来自日本电气事业联合会<sup>[13]</sup>数据折算，德国发电、火电碳排放强度来自德国联邦经济与能源部<sup>[14]</sup>公布数据折算，中国数据来自中国电力企业联合会<sup>[15]</sup>，其他数据来自 IEA 官网公布统计数据折算。

#### 3.2 煤电碳排放强度

煤电碳排放强度与煤电热效率、燃煤煤质等密切相关<sup>[16]</sup>。总体而言，随着煤电热效率的逐步提高，世界各国煤电碳排放强度呈下降趋势。其中，2017 年，日本、OECD、世界、韩国、德国、美国的煤电碳排放强度分别为 912、966、990、1 006、1 007、1 017 g/(kW h)。中国未公布煤电碳排放强度，火电碳排放强度为 844 g/(kW h)。日本煤电效率较高，因此碳排放强度低于其他国家；德国由于褐煤用量较大（2017 年褐煤发电量占煤电发电量的 43%，褐煤碳排放强度高于硬煤等），供热较大（供热对发电效率有一定影响），因此碳排放强度高于世界、OECD 均值，略低于韩国、美国；我国电力行业未发布单独的煤电碳排放强度数据，考虑煤电效率和火电效率总体相当，我国煤电碳排放强度虽高于火电，但低于日本煤电碳排放强度。

煤电碳排放强度变化情况如图 12 所示。

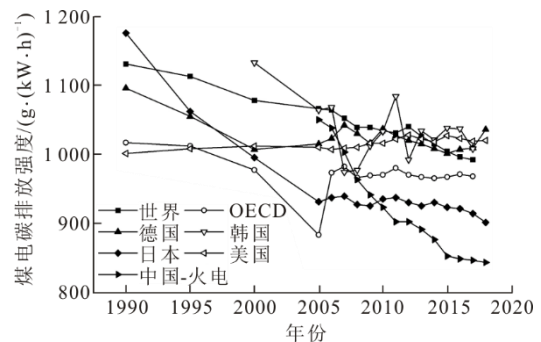


图 12 煤电碳排放强度变化情况  
Fig.12 The carbon emission intensities of coal-fired power

### 3.3 火电碳排放强度

火电碳排放强度与火电各能源品种的发电热效率、碳排放因子、发电量的构成等密切相关。由于煤电、气电的发电热效率逐步提高，尤其是气电发电量占比逐步提高，各国火电碳排放强度总体上呈不断下降趋势。火电碳排放强度变化情况如图 13 所示。

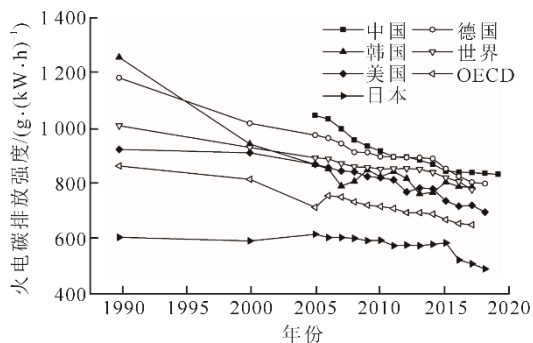


图 13 火电碳排放强度变化情况  
Fig.13 The carbon emission intensity of thermal power

2019 年，我国火电碳排放强度已由 2010 年的 920 g/(kW h) 降至 838 g/(kW h)<sup>[17]</sup>，下降了近 9%，主要原因是煤电发电效率的提升以及气电发电量占比的提高，其中，气电发电量占比由 2.3% 提高至 4.6%。2018 年，德国、美国、日本火电碳排放强度分别为 805、703、500 g/(kW h)，2017 年韩国、世界、OECD 分别为 792、783、658 g/(kW h)，基本符合气电比重越大，火电碳排放强度越低的特点，这也是世界很多国家将气电作为能源转型手段之一的主要原因。美国 2018 年气电发电量占比达到 55.1%，但火电碳排放强度较高，与该国煤电机组较老，热效率较低有较大关系。火电碳排放强度与火电发电量构成对比如图 14 所示。

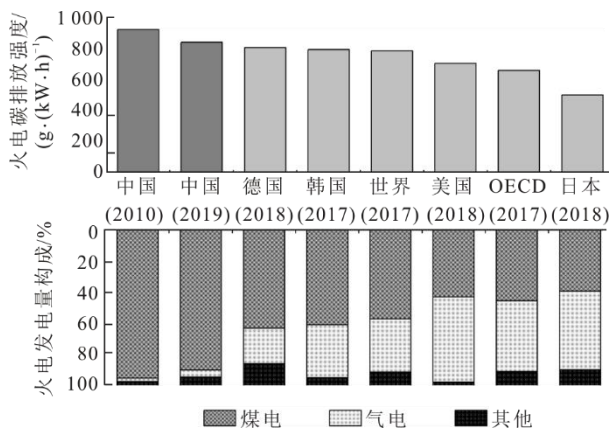


图 14 火电碳排放强度与火电发电量构成对比  
Fig.14 Comparison of thermal power carbon emission intensity and thermal power generation composition

### 3.4 发电碳排放强度

发电碳排放强度与火电效率、火电结构相关，同时与发电结构主要是非化石能源的结构相关<sup>[18]</sup>。在人类共同应对全球气候变化的大背景下，世界各国均将可再生能源发展作为能源转型的主要抓手，降低碳排放强度。尤其是近年来，随着太阳能发电、风电成本的快速下降<sup>[19]</sup>，新能源进入加速发展阶段，部分国家新能源发电量已经超过煤电甚至是火电的发电量，发电碳排放强度也相应持续下降。发电碳排放强度变化情况如图 15 所示。

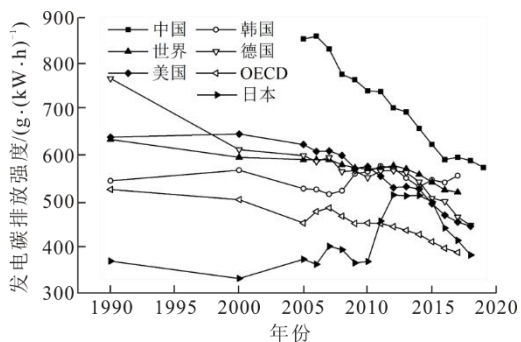


图 15 发电碳排放强度变化情况  
Fig.15 The change of carbon emission intensity of power

中国、美国、德国等发电碳排放强度下降较快，与这些国家可再生能源、气电发电量占比、煤电效率提升有关；日本因福岛核电事件核电大规模关停，发电碳排放强度在 2011 后大幅升高，近年来随着核电的重启、新能源的发展，碳排放强度才逐步下降；韩国非化石能源发电量占比近年来变化不大，因此发电碳排放强度也变化不大；世界和 OECD 国家发电碳排放强度均持续下降，体现了世界能源低碳转型的大趋势，OECD 国家发电碳排放强度下降速度要快于世界均值。

2019 年，我国发电碳排放强度由 2010 年的 744 g/(kW h) 下降至 577 g/(kW h)<sup>[17]</sup>，下降了 22.4%，其主要原因与非化石能源发电量占比提高了 12 个百分点、气电比重和煤电热效率提高有关。其他国家，如 2018 年德国、美国、日本的非化石能源发电量占比分别为 44.0%、36.2%、23.5%。如果考虑其具有低碳属性的气电，则上述 3 国的低碳电力发电量占比分别为 56.8%、71.4%、62.4%（我国 2019 年该比例为 34.3%），上述 3 国的发电碳排放强度分别为 451、449、386 g/(kW h)，远低于我国。发电碳排放强度与发电量构成对比如图 16 所示。



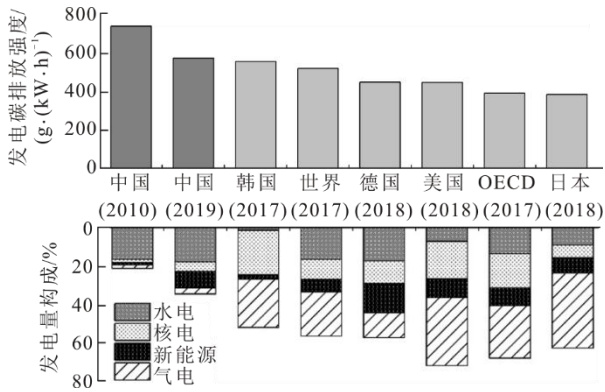


图 16 发电碳排放强度与发电量构成对比

Fig.16 Comparison of power carbon emission intensity and thermal power generation composition

## 4 电力大气污染物排放效率分析与比较

### 4.1 比较方法

化石能源尤其是煤炭燃烧排放的大气污染物是造成空气污染的主要成因<sup>[20]</sup>，作为煤炭消耗的主要行业，火电大气污染物排放控制长期以来是关注的重点。由于我国火电规模较大，曾是大气污染物排放总量最多的国家，但随着排放标准的不断趋严，火电规模和大气污染物排放量已经发生解耦。本文采用电力大气污染物排放总量、火电（煤电）大气污染物排放强度、单位国土面积火电大气污染物排放强度 3 个指标进行国家间的比较。计算公式为：

$$P_{\text{pollutant}} = \frac{T_{\text{pollutant}}}{W_f} \quad (4)$$

$$I_{\text{pollutant}} = \frac{T_{\text{pollutant}}}{M} \quad (5)$$

式中： $P_{\text{pollutant}}$  表示火电或煤电 3 项大气污染物（烟尘、二氧化硫、氮氧化物）排放强度， $T_{\text{pollutant}}$  表示火电或煤电的 3 项大气污染物合计排放量， $W_f$  表示发电量， $I_{\text{pollutant}}$  表示单位国土面积火电大气污染物排放强度， $M$  为某国家国土面积。

德国二氧化硫和氮氧化物排放数据来自德国联邦经济与能源部<sup>[14]</sup>公布数据折算，中国污染物排放数据来自中国电力企业联合会<sup>[15]</sup>，美国二氧化硫和氮氧化物排放数据来自美国能源信息署 EIA<sup>[21]</sup>，其他国家污染物排放数据来自 OECD<sup>[22]</sup>。

### 4.2 污染物排放总量

各国电力污染物排放量变化情况如图 17 所示。

在 21 世纪之前，电力大气污染物排放量最多的国家是美国，1990 年美国电力烟尘、二氧化硫、氮氧化物排放总量是 2369 万 t，估算我国同期排放总量在

950 万 t 左右。“十五”时期，我国电力污染物排放量超越美国。2006 年，我国电力污染物排放量达到最高值 2555 万 t；随着大规模的脱硫、脱硝、除尘改造以及达标改造<sup>[23]</sup>，2015 年已经降至 420 万 t，较峰值下降 83.5%，同期火电发电量增长 78.2%；2016 年以来，我国火电开展超低排放改造，2019 年电力污染物降至 200 万 t 左右，较 2015 年下降 52.4%。2015 年美国电力大气污染物排放量为 458 万 t，再次高于中国排放量，但此时中国火电发电量已是美国的 1.5 倍。日本、德国等基本上在 2000 年前已完成电力大气污染物的治理，排放量变化不大。

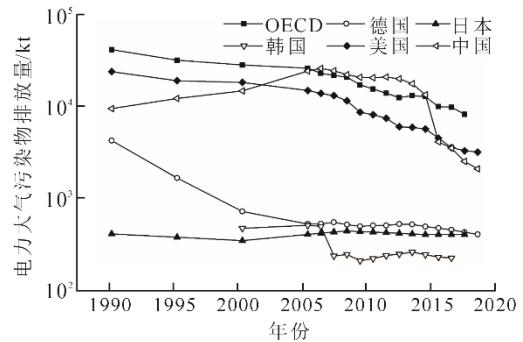


图 17 电力污染物排放量变化情况

Fig.17 Changes of power pollutants emission

### 4.3 污染物排放强度

与污染物总量下降趋势相同，世界各国电力污染物排放强度也呈逐步下降趋势（图 18）。

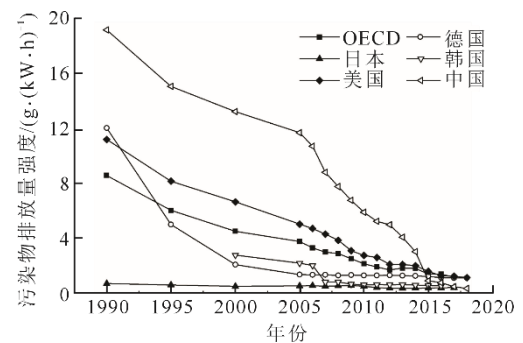


图 18 火电污染物排放强度变化情况

Fig.18 Changes of emission intensity of thermal power pollutants

日本 1990 年以来火电污染物排放强度变化不大，近年来维持在 0.45~0.50 g/(kW h)之间。

德国电力污染物排放强度由 1990 年的 12.10 g/(kW h)降至 2000 年的 2.17 g/(kW h)，该期间的下降主要归因于污染治理要求的提高；2005 年以来，污染物排放强度由 2.17 g/(kW h)缓慢降至当前的 1.20 g/(kW h)，主要归因于气电发电量

占比的提高。韩国 2000—2005 年火电污染物排放强度在 2.1~2.9 g/(kW h)，此后随着气电发电量的持续提高，火电污染物排放强度降至近年来的 0.6 g/(kW h)左右。

美国电力污染物排放强度的下降与煤电环保设施占比增大和气电发电量占比的提升密切相关，煤电烟气脱硫装机由 2000 年的 28.5% 提高至 2005 年的 32.4%、2010 年的 63.5%、2015 年的 80.1%，2018 年的 88.1%，2018 年火电烟气脱硝的比重为 48.5%。同期，气电比重也快速提升，火电污染物排放强度由 1990 年的 11.30 g/(kW h) 降至 2018 年的 1.23 g/(kW h)，同期煤电污染物强度由 13.60 g/(kW h) 降至 1.90 g/(kW h)

我国曾是电力污染物排放强度最大的国家，1990 年电力污染物排放强度为 19.20 g/(kW h)，是当年日本的 24.2 倍、美国的 1.7 倍、德国的 1.5 倍。进入“十一五”后，我国电力污染物排放强度迅速下降，2005—2014 年期间，排放强度以每年 1 g/(kW h) 以上的速度降低，2015 年我国火电全面实现《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011)，污染物排放强度已降至 0.99 g/(kW h)，较 2005 年下降 91.6%；随着超低改造的实施，2018 年我国火电污染物强度降至 0.44 g/(kW h)，略低于日本，仅为德国、美国的 1/3。

#### 4.4 单位国土面积电力污染物排放强度

由于国土面积不同、火电规模不同、扩散条件（包括地形、气象等因素）<sup>[24]</sup> 差异较大，各国排放的大气污染物对环境的影响也有所不同。如不考虑各国的环境本底、扩散条件、产业结构等造成的大气污染物排放影响差异，可用单位国土面积电力污染物排放强度（即每平方千米年电力大气污染物排放量）与年均人口加权  $PM_{2.5}$  质量浓度的对应关系进行表观性的评价。

根据薛涛等<sup>[25]</sup>的研究结论，我国人口加权  $PM_{2.5}$  年均质量浓度从 2013 年的 67.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  下降至 2017 年的 45.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，下降了 32.5%，同期单位国土面积电力污染物排放强度由 2013 年的 1.83  $\text{t}/\text{km}^2$  降至 0.27  $\text{t}/\text{km}^2$ ，下降了 85.2%。从国际上看，2018 年韩国、德国、日本、美国人口加权  $PM_{2.5}$  年均质量浓度<sup>[26]</sup> 分别为 24、13、12、9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，是我国同期（41  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）的 58.5%、31.7%、29.3%、22.0%；韩国、德国、日本、美国单位国土面积电力污染物排放强度分别为 2.4、1.2、1.14、0.34，分别是我国的 8.9、4.5、4.2、1.3 倍。

单位国土面积电力污染物排放强度与年均人口加权  $PM_{2.5}$  质量浓度情况如图 19 所示。

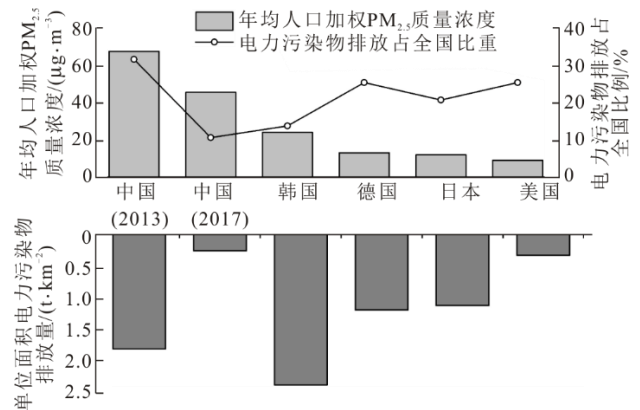


图 19 单位国土面积电力污染物排放强度与年均人口加权  $PM_{2.5}$  质量浓度情况

Fig.19 The emission intensity of power pollutants per unit land area and the weighted  $PM_{2.5}$  concentration of the average annual population

从表观上看，如不考虑电力外其他产业结构的环境影响，假设电力大气污染物排放对环境空气质量的影响水平相同，我国较低的单位国土面积电力污染物排放强度和当前较高的年均人口加权  $PM_{2.5}$  质量浓度不匹配。从对比可以看出，我国电力大气污染物排放对环境空气质量的影响已经很低，空气环境质量受电力外的其他行业影响更大，应以其他行业或其他排放方式为控制重点，改善环境空气质量<sup>[27]</sup>。

## 5 结 论

1) 由于世界各国能源禀赋、消费模式不同，火电的装机、发电量结构相差较大，运行条件（如负荷率、年利用小时、燃料差异等）不尽相同，直接用表观性的火电热效率无法反映各国火电实际技术水平。

2) 对于燃煤发电机组，我国经过多年的持续努力，包括上大压小的持续实施、先进成熟技术的大规模应用和改造、运维管理水平的提高等，煤电平均装备技术水平明显高于其他国家，煤电总体热效率运行水平在“十一五”期间超越美国、德国、韩国以及 OECD 均值，与日本基本相当。如考虑同等运行条件，中国煤电热效率将高于其他国家。

3) 供热能够显著提升发电热效率水平，但我国热电联产机组热效率不及德国、韩国，主要为供热方式、供热对象的差异性。从提高全社会用能效率角度看，在无其他清洁供热方式前，加大煤电供热改造比重和提高供热量，替代其他散煤或小锅炉供



热方式是提升煤电热效率、煤炭清洁效率、全社会能源利用效率的有效方式。

4) 气电对火电热效率贡献较大,如美国、韩国、德国气电提升火电热效率5个百分点以上,我国气电比重低,贡献度低。我国以技术引进为主的气电技术水平差于其他国家,但随着“十一五”以来的规模引进,且以世界最新技术为主,中国气电整体运行效率略高于其他国家,低于德国的主要因为德国气电供热比重较大。

5) 发电技术水平、供热、气电已经成为影响火电热效率的主要因素。我国应通过持续加大现有火电节能改造力度、扩大火电供热广度和深度、提高气电比重,不断提升火电热效率水平。在我国煤电年利用小时不断下滑、负荷率降低、高参数机组低参数调峰、高温材料受限的背景下,在现有技术参数下进行优化是最佳选择。

6) 碳排放是火电发展的硬约束。中国是电力排放量最大的国家,虽然火电碳排放强度持续下降,但强度下降速度低于火电发电量增速,重点发展低碳发电技术与新能源发电技术是应对碳约束的主要手段。

7) 我国煤电碳排放强度低于日本、德国等发达国家。由于我国气电比重较低,煤电比重高,导致火电碳排放强度高于日本、德国、美国、韩国以及OECD、世界均值。虽然近年来我国新能源发电快速增长,发电碳排放强度迅速下降,但仍高于日本、德国、美国等。

8) 中国和美国是火电污染物排放最多的国家,随着电力的发展和污染治理水平的提高,2个国家污染物排放总量世界排名互有更替,当前中国已远低于美国。日本、德国等进入21世纪前已完成(基本完成)电力污染的治理,污染物排放总量多年来下降缓慢。由于中国火电已全面进入超低排放时代,在经历“十一五”以来的火电污染物排放总量快速下降后,“十四五”期间排放总量下降将变缓甚至进入平台期。

9) 我国火电大气污染物控制要求和管控力度高于其他国家,火电污染物排放强度低、环保设施效率高、监管要求严。尤其是我国排放标准未对环保设施故障期污染物排放提出赦免要求,对环保设施可靠性要求高于其他国家。以上因素使我国火电大气污染物强度低于日本,是德国、美国的1/3。

10) 韩国、德国、日本、美国单位国土面积电

力污染物排放强度是我国的8.9、4.5、4.2、1.3倍,但环境空气质量优于我国,年均人口加权PM<sub>2.5</sub>质量浓度低于我国。在不考虑扩散因素等基础条件下,电力大气污染物排放与PM<sub>2.5</sub>的关系已经解耦,以解决空气环境质量、再持续提高火电污染治理要求的基础已经不存在。下一阶段应重点关注非电行业的大气污染物排放和治理。

#### [参考文献]

- [1] 张勇. 落实节能优先促进绿色发展[J]. 中国经贸导刊(理论版), 2017(26): 4-5.  
ZHANG Yong. Implementing energy saving and promoting green development[J]. China Economic and Trade Guide (Theoretical Edition), 2017(26): 4-5.
- [2] IEA. Key world energy statistics 2019[R]. International Energy Agency, 2019: 32.
- [3] BP. Statistical review of world energy 2020[R]. British Petroleum, 2020: 18.
- [4] IEA. Electricity information 2019[R]. International Energy Agency, 2019: 25.
- [5] 中国电力企业联合会. 2018 电力工业统计资料提要[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019: 33.  
China Electricity Council. Electric power industry statistics digest of date[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2019: 33.
- [6] 中国电力企业联合会. 中国煤电清洁发展报告[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017: 23.  
China Electricity Council. Clean development of coal-fired power in China[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2017: 23.
- [7] 王双童, 杨希刚, 常金旺. 国内外煤电机组服役年限现状研究[J]. 热力发电, 2020, 49(9): 11-16.  
WANG Shuangtong, YANG Xigang, CHANG Jinwang. Research on status of service life of coal-fired units at home and abroad[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(9): 11-16.
- [8] 李沛峰, 杨勇平, 戈志华, 等. 300 MW 热电联产供热系统分析与能耗计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(23): 15-20.  
LI Peifeng, YANG Yongping, GE Zhihua, et al. Analysis and calculation on energy consumption of 300 MW CHP heating systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(23): 15-20.
- [9] 周保中, 何晓红. 高效天然气发电厂能效提升路径研究[J]. 电站系统工程, 2017, 33(3): 71-74.  
ZHOU Baozhong, HE Xiaohong. Research on energy efficiency improvement in high-performance natural gas power plant[J]. Power System Engineering, 2017, 33(3): 71-74.
- [10] 杨倩鹏, 林伟杰, 王月明, 等. 火力发电产业发展与前沿技术路线[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3787-3794.  
YANG Qianpeng, LIN Weijie, WANG Yueming, et al. Industry development and frontier technology roadmap of thermal power generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3787-3794.
- [11] 鞠付栋, 孙永斌, 聂会建, 等. 垃圾焚烧发电工程提高热效率的措施[J]. 电力科技与环保, 2020, 36(3): 53-56.  
JU Fudong, SUN Yongbin, NIE Huijian, et al. Method to improve waste incineration power plant efficiency[J].

- Electric Power Technology and Environmental Protection, 2020, 36(3): 53-56.
- [12] 王志轩, 张建宇, 潘荔, 等. 中国低碳电力发展指标体系研究[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2020: 34.  
WANG Zhixuan, ZHANG Jianyu, PAN Li. Study on the low-carbon development indicator system for China's power sector[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2020: 34.
- [13] FEPC Infobase 2019[R]. The Federation of Electric Power Companies of Japan, 2020: 41.
- [14] Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. Energy date[R/OL]. (2020-06-22) [2020-07-08]. <https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Artikel/Energy/energy-data.html>.
- [15] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告 2019[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2019: 43.  
China Electricity Council. Annual development report of China's power industry 2019[M]. Beijing: China Building Materials Press, 2019: 43.
- [16] 孙友源, 郑张, 秦亚琦, 等. 火电机组碳排放特性研究及管理建议[J]. 中国电力, 2018, 51(3): 144-149.  
SUN Youyuan, ZHENG Zhang, QIN Yaqi, et al. Study on carbon emission characteristics and suggestions on carbon emission management of coal-fired power plant[J]. Electric Power, 2018, 51(3): 144-149.
- [17] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告 2020[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2020: 838.  
China Electricity Council. Annual development report of China's power industry 2020[M]. Beijing: China Building Materials Press, 2020: 838.
- [18] 何迎, 邢园通, 汲奕君, 等. 我国电力行业碳排放影响因素及区域差异研究[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(6): 2343-2350.  
HE Ying, XING Yuantong, JI Yijun, et al. On influential factors and regional difference in carbon emissions from power industry at home in China[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(6): 2343-2350.
- [19] 张运洲, 刘俊, 张晋芳, 等. 中国新能源“后补贴时期”发展分析[J]. 中国电力, 2019, 52(4): 1-7.  
ZHANG Yunzhou, LIU Jun, ZHANG Jinfang, et al. Study on the development of renewable energy during “post-subsidy period” in China[J]. Electric Power, 2019, 52(4): 1-7.
- [20] 陈潇君, 金玲, 雷宇, 等. 大气环境约束下的中国煤炭消费总量控制研究[J]. 中国环境管理, 2015, 7(5): 42-49.  
CHEN Xiaojun, JIN Ling, LEI Yu, et al. Study on China coal consumption control under air quality constraints[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2015, 7(5): 42-49.
- [21] Energy Information Administration. Electric power industry estimated emissions by state[R/OL]. (2019-10-22) [2020-08-15]. <https://www.eia.gov/electricity/data.php>.
- [22] OECD. Emission of air pollutants[R/OL].(2019-09-01) [2020-08-07]. <https://stats.oecd.org>.
- [23] 王志轩, 刘志强. 我国煤电大气污染物控制现状及展望[J]. 中国工程科学, 2015, 17(9): 56-62.  
WANG Zhixuan, LIU Zhiqiang. Current situation and prospect of control on air pollutants from coal-fired power in China[J]. Strategic study of CAE, 2015, 17(9): 56-62.
- [24] 李小飞, 张明军, 王圣杰, 等. 中国空气污染指数变化特征及影响因素分析[J]. 环境科学, 2012,33(6): 1936-1943.  
LI Xiaofei, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. Variation characteristics and influencing factors of air pollution index in China[J]. Environmental Science, 2012, 33(6): 1936-1943.
- [25] 薛涛, 刘俊, 张强, 等. 2013~2017年中国PM<sub>2.5</sub>污染的快速改善及其健康效益[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(4): 441-452.  
XUE Tao, LIU Jun, ZHANG Qiang, et al. Rapid improvement of PM<sub>2.5</sub> pollution and associated health benefits in China during 2013-2017[J]. Science China: Earth Sciences, 2020, 50(4): 441-452.
- [26] IQAir. 2018 World air quality report[R/OL]. (2019-01-03) [2020-08-15]. <http://www.indiaenvironmentportal.org.in/content/461648/2018-world-air-quality-report/>.
- [27] 李博, 王卫良, 姚宣, 等. 煤电减排对中国大气污染物排放控制的影响研究[J]. 中国电力, 2019, 52(1): 110-117.  
LI Bo, WANG Weiliang, YAO Xuan, et al. Study on the effects of emission reduction in coal-fired power industry on China's air pollutant emission control[J]. Electric Power, 2019, 52(1): 110-117.

(责任编辑 刘永强)