

碳达峰碳中和背景下火力发电厂碳排放分析与建议

刘高军

(国网冀北电力有限公司电力科学研究院 华北电力科学研究院有限责任公司,北京 100045)

摘要:介绍了目前主流碳排放计算和核查方法,对典型的 660 MW 燃煤机组、365 MW 燃气机组和 660 MW 燃油机组进行碳排放计算。在给定条件下 3 种火电厂 CO₂ 排放总量分别为 2 303 751、573 945、1 988 626 t/a,单位发电量 CO₂ 排放数值分别为 0.827 9、0.373 0 和 0.714 7 t/MWh。燃气机组单位发电量碳排放最低,仅为燃煤机组的 45%。相应地,燃油机组碳排放为燃煤机组的 86%。从火电厂碳排放组成来看,化石燃料燃烧产生的碳排放占电厂碳排放总量的 99% 以上。脱硫过程产生的碳排放占比与煤中含硫量有关。企业净购入使用电力产生的碳排放占比最小。为有效规范和降低碳排放,建议顺应燃煤机组小火电关停,代之以大机组(称为“上大压小”)的政策、高参数大容量发展趋势,积极配置光伏、风电、核能和水电等低碳、零碳能源。推广技术固碳和生态固碳等碳汇手段,开发绿色金融产品,规范碳排放交易市场。

关键词:燃煤机组;燃气机组;燃油机组;碳排放;绿色金融;节能

中图分类号:TQ53;TK114 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2023)06-0189-07

Analysis and suggestion of carbon emission in thermal power plants under the background of carbon peak and carbon neutrality

LIU Gaojun

(Jibe Electric Power Research Institute, State Grid Jibe Electric Power Co. Ltd., North China Electric Power Research Institute Co. Ltd., Beijing 100045, China)

Abstract: The mainstream methods of calculation and verification for carbon emission was introduced, and calculation of carbon emission for a typical 660 MW coal-fired unit, 365 MW gas-fired unit and 660 MW oil-fired unit was introduced. Under given conditions, the total carbon emissions of the three types of thermal power plants are 2 303 751 t, 573 945 t and 1 988 626 t/a respectively, and the ratios of carbon emissions to electricity generation are 0.827 9, 0.373 0 and 0.714 7 t/a respectively. Gas units emit the lowest carbon emissions per unit of electricity generation, only 45 percent of that of coal-fired units. Accordingly, oil-fired units emit 86% of the carbon emissions of coal-fired units. The burning of fossil fuels commonly accounts for more than 99% of the total carbon emissions from coal-fired power plants. The proportion of carbon emission from desulfurization process is related to the sulfur content in coal. The smallest proportion of carbon emissions is generated by net electricity purchases. In order to effectively regulate and reduce carbon emissions, it is suggested to comply with the development trend of high parameter and large capacity of coal-fired units, and actively deploy low-carbon and zero-carbon energy such as photovoltaic, wind power, nuclear power and hydropower. It is necessary to promote carbon sequestration methods such as technological and ecological carbon sequestration, develop green financial products, and standardize carbon emission trading markets.

Key words: Coal-fired unit; gas-fired unit; oil-fired unit; carbon emission; green finance; energy conservation

0 引言

我国富煤贫油少气的能源结构决定了煤炭在一次能源中占比过半^[1]。中电联《2021 年 1—6 月份电力工业运行简况》显示:全国发电装机容量 22.6

亿 kW,其中,燃煤发电 10.9 亿 kW,同比增长 2.5%,占比 48.23%。未来很长一段时间,燃煤发电仍将占据重要地位。燃煤发电同时排放大量 CO₂,引起全球变暖^[2]。我国作为世界上最大的碳排放国家^[3],占世界能源碳排放总量比重的 28.8%,对全球碳达

收稿日期:2021-08-12;责任编辑:常明然 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.21081205

作者简介:刘高军(1988—),男,山西晋中人,高级工程师,硕士。E-mail:liu.gao.jun@163.com

引用格式:刘高军.碳达峰碳中和背景下火力发电厂碳排放分析与建议[J].洁净煤技术,2023,29(6):189-195.

LIU Gaojun. Analysis and suggestion of carbon emission in thermal power plants under the background of carbon peak and carbon neutrality[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(6): 189-195.



移动阅读

峰和碳中和具有至关重要的作用^[4]。2015年《强化应对气候变化行动—中国国家自主贡献》公开承诺了中国CO₂排放在2030年左右达到峰值^[3]。2020年9月22日,习近平总书记在第75届联合国大会一般性辩论中指出,CO₂排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和^[4-6]。

一些学者^[7-11]已经对具体燃煤机组碳排放进行相关研究。盖志杰等^[7]以2×300 MW燃煤发电机组为背景,计算发现2011—2014年全厂年均CO₂排放总量在300~312 t。刘睿等^[8]研究了630 MW燃煤机组和135 MW燃煤机组的碳排放,结果表明前者单位CO₂排放量显著低于后者。高建强等^[9]研究了58%、74%、89%负荷下330 MW燃煤机组的碳排放,发现燃煤供电碳排放强度与机组负荷之间呈负相关,对燃煤供电碳排放强度影响较大的系统依次为汽轮机系统、厂用电系统和锅炉系统。蔡宇等^[10]研究表明煤耗不决定机组供电碳排放序位,不同品种、产地和批次煤质差异的影响不容忽视,特别是煤化程度较低的煤中氢含量的影响。张小丽等^[11]研究表明对于1993年以来中国新增煤电装机,2018年后剩余的锁定CO₂排放量约102.3 Gt。文献主要围绕燃煤机组的碳排放,较少涉及燃气机组和燃油机组。作为火力发电厂的一部分,有必要综合研究比较燃煤机组、燃气机组、燃油机组三者碳排放特点,为我国后期实施碳达峰、碳中和提供技术指导。为此,笔者归纳总结了目前主流的碳排放计算和核查方法,针对典型的660 MW燃煤机组、365 MW燃气机组和660 MW燃油机组进行碳排放计算和分析,结合火力发电厂碳排放的特点,提出碳减排、碳汇、碳金融等相关建议。

1 火电厂碳排放核查方法

根据GB/T 32151.1—2015《温室气体排放核算与报告要求 第1部分:发电企业》中要求,火电厂碳排放具体范围包括:化石燃料燃烧产生的碳排放 E_{rs} ;脱硫过程的碳排放 E_{ul} ;企业净购入使用电力产生的碳排放 E_d 。可知发电厂碳排放总量 E 满足式(1),碳排放单位为t(以CO₂计)。

$$E = E_{rs} + E_{ul} + E_d, \quad (1)$$

$$E_{rs} = \sum_{i=1}^n D_i F_i, \quad (2)$$

$$D_i = N_i G_i, \quad (3)$$

$$F_i = C_i O_i \frac{44}{12}. \quad (4)$$

其中, D_i 为年度第 i 种化石燃料的活动数据,

G_i ; F_i 为第 i 种化石燃料的CO₂排放因子,t/GJ; i 为化石燃料类型代号; N_i 为第 i 种化石燃料的低位发热量,对于固体和液体化石燃料,GJ/t,对于气体化石燃料, 10^{-4} GJ/m³; G_i 为第 i 种化石燃料的消耗量,对于固体和液体化石燃料,t;对于气体化石燃料, 10^4 m³; C_i 为第 i 种化石燃料的单位热值含碳量,t/GJ; O_i 为第 i 种化石燃料的碳氧化率,%。发电企业碳排放核算边界如图1所示,化石燃料相关参数见表1。

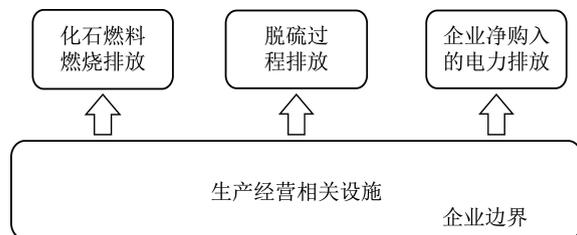


图1 发电企业碳排放核算边界

Fig.1 Accounting boundary of carbon emission for power plant

表1 化石燃料相关参数推荐

Table 1 Recommended parameters of fossil fuels

能源	N/GJ	$C/(t \cdot GJ^{-1})$	$O/\%$
原油	41.816	20.1×10^{-3}	98
燃料油	41.816	21.1×10^{-3}	98
天然气	389.31	15.3×10^{-3}	99

脱硫过程的碳排放 E_{ul} :

$$E_{ul} = \sum_k A_k F_k, \quad (5)$$

$$A_k = \sum_m B_{k,m} I_k, \quad (6)$$

$$F_k = F_{k,1} R. \quad (7)$$

其中, A_k 为第 k 种脱硫剂中碳酸盐消耗量,t; F_k 为第 k 种脱硫剂中碳酸盐的排放因子,t/t; $F_{k,1}$ 为完全转化时第 k 种脱硫剂脱硫过程的排放因子,t/t; $B_{k,m}$ 为脱硫剂的消耗量,t; I_k 为脱硫剂中碳酸盐的含量,%; R 为转化率,参考GB/T 32151.1—2015《温室气体排放核算与报告要求》中第5.2.3.3节要求,脱硫过程转化率宜取100%(表2)。

表2 碳酸盐排放因子推荐

Table 2 Recommended emission factors of carbonate

碳酸盐	排放因子/($t \cdot t^{-1}$)
CaCO ₃	0.440
MgCO ₃	0.522
Na ₂ CO ₃	0.415

企业净购入使用电力产生的碳排放 E_d :

$$E_d = A_d F_d, \quad (8)$$

式中, A_d 为核算期内购入电量,MWh; F_d 为区域电网年平均供电排放因子,t/MWh。

2 火电厂碳排放典型计算与分析

本节对典型的燃煤机组、燃气机组和燃油机组进行碳排放计算,为使结果更具比较性,计算前进行以下初步假设:

1)初步选择计算年利用小时数为4 216 h。参考中电传媒能源情报研究中心出版的《中国能源大数据报告(2021)》,2020年火电设备平均利用小时数为4 216 h。

2)外购电力排放因子选择0.604 t/MWh。参考DB11/T 1781—2020《二氧化碳排放核算和报告要求 电力生产业》。综合考虑机组容量和运行方式^[7-9],燃煤机组、燃气机组和燃油机组外购电量分

别为1 000、500和1 000 MWh。

3)燃煤机组、燃气机组和燃油机组厂用电率分别选取6%、2%、4%。参考文献[12-13],燃煤机组、燃气联合循环机组厂用电率在4%~9%、1.0%~2.5%。燃油机组厂用电率在燃煤机组和燃气机组的之间。

2.1 燃煤机组碳排放计算

以国家能源集团某660 MW燃煤机组为例,该锅炉为一次中间再热、超超临界压力变压运行、单炉膛、平衡通风、紧身封闭、固态排渣、全钢架、全悬吊结构、切圆燃烧方式的高效超超临界锅炉。煤质参数见表3,脱硫系统参数见表4。石灰石成分中CaO、MgO质量分数分别为50.68%和3.65%,烧失量为42.74%。

表3 工业分析和元素分析

Table 3 Proximate analysis and ultimate analysis

工业分析/%			元素分析/%					$Q_{\text{net,ar}}/$
M_{ad}	A_{ar}	V_{daf}	C_{ar}	H_{ar}	N_{ar}	O_{ar}	S_{t}	(MJ·kg ⁻¹)
6.50	15.54	36.66	59.46	3.64	0.85	9.19	0.22	22.27

表4 脱硫系统主要参数

Table 4 Main parameters of FGD

项目	数值
处理烟量(湿态)/(m ³ ·h ⁻¹)	2 216 733
FGD 脱硫效率/%	99
液气比/(L·m ⁻³)	11.68
钙硫物质的量比 Ca/S/(mol·mol ⁻¹)	1.03
石灰石耗量/(t·h ⁻¹)	3.70
石膏产量/(t·h ⁻¹)	6.10
耗水量/(t·h ⁻¹)	75.00

该机组燃煤干燥无灰基挥发分>25%,参照GB/T 32151.1—2015《温室气体排放核算与报告要求 第1部分:发电企业》,燃用烟煤锅炉固体不完全燃烧热损失为1.5%,相应估算其碳氧化率取98.5%。

燃煤机组碳排放计算包括煤炭燃烧产生的碳排放、脱硫过程的碳排放、企业净购入使用电力产生的碳排放。由于该电厂采用等离子点火,不涉及燃料油燃烧碳排放。燃煤机组碳排放计算结果见表7。在假定条件下,660 MW燃煤机组碳排放为2 303 751 t/a。

2.2 燃气机组碳排放计算

以北京某燃气热电厂3号机组为例^[14],该机组为燃气蒸汽联合循环供热机组,设计采用“一拖一”结构形式,机组包含1台燃气轮机、1台燃气轮发电机、1台余热锅炉(HRSG)、1台蒸汽轮机、1台蒸汽轮发电机和有关的辅助系统和设备。余热锅炉为三压加再热、无补燃、卧式自然循环锅炉,型号为

UG-SGT4000F-R。在背压工况下,“一拖一”联合循环机组总发电功率为365 MW(表5、6)。

表5 燃气机组运行参数

Table 5 Operating parameters of gas unit

项目	100%负荷	75%负荷	50%负荷
锅炉进烟压力/kPa	3.0	2.1	1.6
锅炉进烟温度/°C	582.8	578.4	576.4
锅炉排烟压力/kPa	0.2	0	-0.1
锅炉排烟温度/°C	90.7	87.3	84.4
烟囱烟气含氧量/%	14.7	14.3	14.7
燃气消耗量/(m ³ ·h ⁻¹)	71 550	58 860	47 960

表6 燃气成分参数

Table 6 Parameters of the gas components

燃气成分	数值
甲烷体积分数/%	95.949 4
乙烷体积分数/%	0.907 5
丙烷体积分数/%	0.136 7
二氧化碳体积分数/%	3.000 0
水体积分数/%	0.006 2
硫化氢体积分数/%	0.000 2
低位发热量(参比温度20 °C)/(MJ·m ⁻³)	34.24

燃气机组碳排放计算包括天然气燃烧产生的碳排放、企业净购入使用电力产生的碳排放。由于燃气机组无脱硫系统,不涉及脱硫过程碳排放。燃气机组碳排放计算结果见表7。在假定条件下,365 MW燃气蒸汽联合循环机组CO₂排放573 945 t/a。

表7 火电厂碳排放计算
Table 7 Calculation of carbon emission in thermal power plants

项目	燃煤	燃气	燃油
化石燃料的低位发热量	22.27 GJ/t	342.40 GJ/(10 ⁴ m ³)	41.82 GJ/t
年利用小时数/h	4 216	4 216	4 216
额定负荷机组化石燃料时均消耗量	253.7 t/h	7.2×10 ⁴ m ³ /h	142.0 t/h
化石燃料消耗量	1 069 599 t	30 165×10 ⁴ m ³	598 672 t
化石燃料活动数据/GJ	23 819 974	10 328 660	25 034 068
化石燃料单位热值含碳量/(t·GJ ⁻¹)	0.026 7	0.015 3	0.022 1
化石燃料碳氧化率/%	98.5	99.0	98.0
化石燃料 CO ₂ 排放因子/(t·GJ ⁻¹)	0.096 4	0.055 5	0.079 4
化石燃料燃烧产生的 CO ₂ 排放/t	2 296 961	573 643	1 988 022
脱硫剂消耗量/t	15 599	0	0
脱硫剂中碳酸盐含量/%	90.5	—	—
脱硫剂中碳酸盐消耗量/t	14 117	—	—
脱硫剂中碳酸盐排放因子/(t·t ⁻¹)	0.438 2	—	—
脱硫过程 CO ₂ 排放量/t	6 186	0	0
核算期内购入电量/MWh	1 000	500	1 000
区域电网年平均供电排放因子/(t·MWh ⁻¹)	0.604	0.604	0.604
企业净购入使用电力产生的 CO ₂ 排放量/t	604	302	604
火电厂 CO ₂ 排放量/t	2 303 751	573 945	1 988 626
发电量/MWh	2 782 560	1 538 840	2 782 560
厂用电率/%	6	2	4
供电量/MWh	2 615 606	1 508 063	2 671 258
单位发电量碳排放量/(t·MWh ⁻¹)	0.827 9	0.373 0	0.714 7
单位供电量碳排放量/(t·MWh ⁻¹)	0.880 8	0.380 6	0.744 5
燃烧碳排放体积分数/%	99.70	99.95	99.97
脱硫碳排放体积分数/%	0.27	0	0
外购电力碳排放体积分数/%	0.03	0.05	0.03

2.3 燃油机组碳排放计算

目前大型燃油机组主要分布在原油产地,比如沙特拉比格 2×660 MW 亚临界燃油机组、沙特延布 5×660 MW 亚临界燃油机组等^[15-16]。以沙特某 660 MW 亚临界燃油机组为例,锅炉为亚临界参数、自然循环、前后墙对冲燃烧方式、一次中间再热、单炉膛平衡通风、全钢结构架的汽包炉。汽轮机为东方汽轮机厂生产的亚临界、一次中间再热、冲动式、单轴、双背压、三缸四排汽凝汽式(型号:N660-16.67/538/538)。发电机为东方电机股份有限公司生产的水氢氢冷却、自并励静止励磁方式汽轮发电机。

燃油机组满负荷燃油总量 142 t/h^[15],燃料油低位发热量参考表 1。由于采用海水脱硫,不添加脱硫剂,即无脱硫过程的碳排放^[17-19]。综合考虑机组容量和运行方式^[7-9],燃油机组外购电量取 1 000 MWh。燃煤机组碳排放计算结果见表 7。在假定条件下,660 MW 燃油机组 CO₂ 排放为

1 988 626 t/a。

2.4 火电厂碳排放分析

典型的燃煤机组、燃气机组和燃油机组碳排放计算结果见表 7。3 种火力发电厂单位发电量 CO₂ 排放量分别为 0.827 9、0.373 0 和 0.714 7 t/MWh。燃气机组单位发电量碳排放最低,仅为燃煤机组的 45%。相应地,燃油机组碳排放为燃煤机组的 86%。燃煤机组、燃气机组和燃油机组的厂用电率分别为 6%、2%和 4%情况下,3 种类型的火力发电厂单位供电量 CO₂ 排放数值分别为 0.880 8、0.380 6 和 0.744 5 t/MWh。从降低碳排放的角度,在同等条件下优先配置燃气蒸汽联合循环发电是在保证用电安全前提下降低碳排放强度的有效措施。

从火电厂碳排放的来源,燃煤机组、燃气机组和燃油机组的化石燃料燃烧所产生的碳排放占电厂碳排放总量的 99%以上,所以火电厂降低碳排放的主要技术路线还是提高能源利用效率、降低单位发电

量的碳排放量。在条件容许情况下,优先使用单位供电量碳排放较低的能源,如天然气、氢能、燃气掺氢等;对于燃煤机组,优先发展高参数大容量、热电联产、热量冷三联产等机组。

脱硫过程的碳排放主要影响因素有燃煤量、煤质含硫量、脱硫剂中碳酸盐含量、转化率等。其中,燃煤量和煤质含硫量对脱硫过程产生的碳排放影响最大。煤中硫含量在0.2%~4.0%,高硫煤对应的脱硫碳排放总量和排放占比相应增加。本文燃煤机组煤中含硫量为0.22%,对应的脱硫过程CO₂排放总量6 186 t/a,排放占比0.27%。假设燃煤含硫量4%作为单一变量,相应的脱硫过程碳排放总量和排放占比将变为原先的18倍左右,约112 472 t/a和4.91%。

企业净购入使用电力产生的碳排放受机组检修周期、基建情况、调度启停等因素影响,不同火电厂外购电量不同,应根据实际情况确定。根据调研文献[7-9]统计,一般火电厂年均外购电量统计区间在400~2 500 MWh,外购电力的排放因子不同地区略有差异,应具体查询当地权力责任部门确定。

3 火电厂碳排放相关建议

3.1 碳排放计算和核算建议

1)目前我国火电厂碳排放计算方法主要通过燃料碳核算方法,建议建立相关标准,规范CEMS核算方法^[20]。

2)核算脱硫过程的碳排放,要特别注意脱硫类型及脱硫剂的使用情况。对于海水脱硫,不涉及石灰石等脱硫剂添加,即不考虑脱硫过程的碳排放。

3)统计分析碳排放应该从总量和强度两方面进行。不同机组不能单纯比较数值,应根据运行时间、燃料类型、是否供热、机组效率等角度研究综合分析。

3.2 碳减排建议

1)减少化石能源使用,提高能源使用效率。对于燃煤机组,随着机组容量增大和参数提升,度电碳排放逐渐降低。据此,为降低单位发电量碳排放,可采取“上大压小”措施,关停300 MW以下燃煤机组,大力发展高参数大容量机组^[3-5]。

2)增加清洁能源使用,提高清洁能源在发电装机容量占比。积极配置光伏、风电、核能和水电等低碳、零碳能源。如风电场调度运行控制优化、减少弃风弃光现象、季节性抽水蓄能电站、调峰调频抽水蓄能电站、远海大型风电系统建设等。

3.3 碳汇建议

1)积极采用技术手段进行碳捕集、碳利用、碳封存^[21-22],即CCUS技术。开展碳捕集技术研究和应用,包括且不限于点源CCUS技术、生物质能碳捕集与封存技术(Biomass Energy Carbon Capture and Storage, BECCS)、直接空气碳捕获与储存技术(Direct Air Carbon Dioxide Capture and Storage, DACCS)等。BECCS技术是利用生物质能的光合作用捕集并在后期分离、储存CO₂的技术。DACCS技术是一种利用DAC溶液系统或固态系统从空气中捕集二氧化碳并转化为产品封存起来的技术。

开展碳利用技术研究和应用,包括且不限于矿化碳利用、化学碳利用、生物碳利用(CO₂促进植物生长)等。开展碳封存技术研究和应用,包括且不限于利用含水层封存CO₂、强化采油技术(Enhanced Oil Recovery, EOR)等。

2)积极开展生态固碳,充分利用森林、草原、湖泊、绿地、湿地等生态环境对CO₂吸收,降低大气中碳含量。

3.4 碳金融建议

1)开发、推广、跟踪绿色金融产品,涉及绿碳产品的“募投管退”的各个阶段,确保绿色债券、绿色基金、绿色信贷、绿色保险等金融产品有序、可控、安全、合法推进实施。

2)有序推进碳排放总量核算,积极参与碳排放交易。2021年7月16日9点30分全国碳排放权交易在上海环境能源交易所正式启动,首笔碳交易价格52.78元/t,总量16万t。碳交易系统的正式上线运行,标志着我国碳金融市场进入一个新的阶段。

4 结 论

1)本文介绍了目前主流的碳排放计算和核查方法,对典型660 MW燃煤机组、365 MW燃气机组和660 MW燃油机组进行碳排放计算。在给定条件下3种类型的火力发电厂碳排放总量分别为2 303 751、573 945、1 988 626 t/a,单位发电量碳排放数值分别为0.827 9、0.373 0和0.714 7 t/MWh。燃气机组单位发电量碳排放最低,仅为燃煤机组的45%。相应地,燃油机组碳排放为燃煤机组的86%。

2)从火电厂碳排放的来源来看,化石燃料燃烧产生的碳排放占电厂碳排放总量在99%以上。脱硫过程产生的碳排放占比与煤中含硫量有关。企业净购入使用电力产生的碳排放受机组检修周期、基建情况、调度启停、区域排放因子等因素影响,不同电厂略有差异,占比最小。

3)为有效规范和降低碳排放,建议提高化石能源使用效率,增加清洁能源占比。顺应燃煤机组“上大压小”、高参数大容量发展趋势,积极配置光伏、风电、核能和水电等低碳、零碳能源。推广技术固碳和生态固碳等碳汇手段,开发绿色金融产品,规范碳排放交易市场。

参考文献(References):

- [1] 杨英明,孙建东,李全生.我国能源结构优化研究现状及展望[J].煤炭工程,2019,51(2):149-153.
YANG Yingming, SUN Jiandong, LI Quansheng. Status and prospect of research on China's energy structure optimization[J]. Coal Engineering, 2019, 51(2):149-153.
- [2] 李庆,姜龙,郭玥,等.燃煤电厂超低排放应用现状及关键问题[J].高电压技术,2017,43(8):2630-2637.
LI Qing, JIANG Long, GUO Yue, et al. Current applications and key problems of ultra-low emission for coal-fired power plant [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(8): 2630-2637.
- [3] 张立,谢紫璇,曹丽斌,等.中国城市碳达峰评估方法初探[J].环境工程,2020,38(11):1-4.
ZHANG Li, XIE Zixuan, CAO Libin, et al. Discussion on evaluation method on carbon dioxide emissions peaking for Chinese cities[J]. Environmental Engineering, 2020, 38(11): 1-4.
- [4] 胡鞍钢.中国实现2030年前碳达峰目标及主要途径[J].北京工业大学学报(社会科学版),2021,21(3):1-15.
HU Angang. China's goal of achieving carbon peak by 2030 and its main approaches [J]. Journal of Beijing University of Technology(Social Sciences Edition), 2021, 21(3):1-15.
- [5] 朱法华,王玉山,徐振,等.中国电力行业碳达峰、碳中和的发展路径研究[J].电力科技与环保,2021,37(3):9-16.
ZHU Fahua, WANG Yushan, XU Zhen, et al. Research on the development path of carbon peak and carbon neutrality in China's power industry [J]. Electric Power Environmental Protection, 2021, 37(3):9-16.
- [6] 喻小宝,郑丹丹,杨康,等.“双碳”目标下能源电力行业的机遇与挑战[J].华电技术,2021,43(6):21-32.
YU Xiaobao, ZHENG Dandan, YANG Kang, et al. Opportunities and challenges faced by energy and power industry with the goal of carbon neutrality and carbon peak [J]. Huadian Technology, 2021, 43(6):21-32.
- [7] 盖志杰,王鹏辉.燃煤电厂碳排放典型计算及分析[J].中国电力,2017,50(5):178-184.
GAI Zhijie, WANG Penghui. A typical calculation and analysis of carbon emissions from coal-fired power plants [J]. Electric Power, 2017, 50(5):178-184.
- [8] 刘睿,翟相彬.中国燃煤电厂碳排放量计算及分析[J].生态环境学报,2014,23(7):1164-1169.
LIU Rui, ZHAI Xiangbin. Calculation of carbon emissions from China coal plants and the reduction suggestion [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(7):1164-1169.
- [9] 高建强,宋铜铜,杨东江.燃煤发电机组碳排放折算方法研究与应用[J].热力发电,2020,49(2):92-96.
GAO Jianqiang, SONG Tongtong, YANG Dongjiang. Research and application of carbon emission conversion method for coal-fired generating units [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(2):92-96.
- [10] 蔡宇,李保卫,胡泽春,等.燃煤机组碳排放指标计算及影响因素分析[J].电网技术,2013,37(5):1185-1189.
CAI Yu, LI Baowei, HU Zechun, et al. Calculation of carbon emission index of coal-fired generating unit and analysis on influencing factors [J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1185-1189.
- [11] 张小丽,崔学勤,王克,等.中国煤电锁定碳排放及其对减排目标的影响[J].中国人口·资源与环境,2020,30(8):31-41.
ZHANG Xiaoli, CUI Xueqin, WANG Ke, et al. Committed CO₂ emissions of China's coal-fired power plants and their implications for mitigation targets [J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(8):31-41.
- [12] 聂君,刘钢.估算厂用电率的负荷率法[J].中国电力,2013,46(9):44-46.
NIE Jun, LIU Gang. Estimation of auxiliary power consumption rate with load ratio method [J]. Electric Power, 2013, 46(9): 44-46.
- [13] 俞彩孟,汪忠德,施静波,等.F级燃气—蒸汽联合循环机组降低厂用电率措施[J].华东电力,2014,42(4):165-168.
YU Caimeng, WANG Zhongde, SHI Jingbo, et al. Measures of reducing auxiliary power ratio by F gas-steam combined cycle units [J]. East China Electric Power, 2014, 42(4):165-168.
- [14] 吉建新,董晓鹏.燃气蒸汽联合循环机组供热经济性分析[J].应用能源技术,2017,233(5):13-16.
JI Jianxin, DONG Xiaopeng. Economic analysis of heat supply for gas steam combined cycle unit [J]. 应用能源技术, 2017, 233(5):13-16.
- [15] 孔繁林.660MW燃油锅炉的燃油系统优化及应用[J].城市建设理论研究,2015,5(19):5639-5641.
KONG Fanlin. The fuel system optimization and application of 660MW oil-fired power plant [J]. Urban Construction Theory Research, 2015, 5(19):5639-5641.
- [16] 高飞.沙特延布火电站EPC工程项目风险管理研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.
- [17] 郑晓盼,高翔,郑成航,等.基于燃煤电厂“超低排放”的海水脱硫系统性能评估与建议[J].环境影响评价,2015,37(4):9-13.
ZHENG Xiaopan, GAO Xiang, ZHENG Chenghang, et al. Performance assessment and suggestion of seawater desulfurization system on "ultra-low emission" coal-fired power plants [J]. Environmental Impact Assessment, 2015, 37(4):9-13.
- [18] 关毅鹏,李晓明,张召才,等.海水脱硫应用现状与研究进展[J].中国电力,2012,45(2):40-44.
GUAN Yipeng, LI Xiaoming, ZHANG Zhaocai, et al. Application and research progress of seawater desulfurization technology [J]. Electric Power, 2012, 45(2):40-44.
- [19] 张晓波,潘卫国,郭瑞堂,等.海水脱硫技术应用及比较[J].

- 上海电力学院学报, 2011, 27(1):37-41.
- ZHANG Xiaobo, PAN Weiguo, GUO Ruitang, et al. Comparison and Application of seawater desulfurization technology [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2011, 27(1): 37-41.
- [20] 王通, 吴家杰. 燃煤电厂二氧化碳排放计量方法探讨[J]. 锅炉制造, 2016(6):32-34.
- WANG Tong, WU Jiajie. Discussion on the measurement method of CO₂ emissions on coal-fired power plant[J]. Boiler Manufacturing, 2016(6):32-34.
- [21] 米剑锋, 马晓芳. 中国 CCUS 技术发展趋势分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9):2537-2544.
- MI Jianfeng, MA Xiaofang. Development trend analysis of carbon capture, utilization and storage technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9):2537-2544.
- [22] 叶云云, 廖海燕, 王鹏, 等. 我国燃煤发电 CCS/CCUS 技术发展方向及发展路线图研究[J]. 中国工程科学, 2018, 20(3): 80-89.
- YE Yunyun, LIAO Haiyan, WANG Peng, et al. Research on technology directions and roadmap of CCS/CCUS for coal-fired power generation in China[J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(3):80-89.