王 圣,周 斌,屈加豹,等.双碳情景下山东省火电行业大气污染影响 [J]. 中国环境科学, 2024,44(11):5990-5998.
Wang S, Zhou B, Qu J B, et al. Air pollution impact of thermal power industry in Shandong Province under carbon peak and carbon neutrality scenario. [J]. China Environmental Science, 2024,44(11):5990-5998.

双碳情景下山东省火电行业大气污染影响

王 圣[1],周 斌[2],屈加豹[3],李建晖[4],余历钊[4],吴 鑫[5],杨 迎[4*],徐 鑫[4*],伯 鑫[4] (1.国家能源集团科学技术研究院有限公司,低碳智能燃煤发电与超净排放全国重点实验室,江苏 南京 210023；2.北京低碳清洁能源研究院,人工智能应用技术研究中心,北京 102211；3.生态环境部,国家环境保护环境影响评价数值模拟重点实验室,北京 100012；4.北京化工大学环境科学与工程系,北京 100029；5.临沂市人民医院,山东 临沂 276000)

摘要：本研究以火力发电大省山东省为例,计算了碳达峰、碳中和情景下火电行业大气污染物排放量,采用 CALPUFF 模式模拟了不同情景下山东省火电行业 SO_2、NO_x、PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 污染贡献情况.结果显示,在碳达峰情景下,山东省火电行业 SO_2、NO_x、PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 排放量与 2018 年基准情景相比,分别减少了 2483.42,23448.71,364.31,341.01t,火电行业排放的 SO_2、NO_x、PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 对各城市贡献浓度较 2018 年基准情景浓度分别降低了 0.22%~26.61%、0.66%~51.21%、0.63%~23.82%和 4.36%~24.38%.在碳中和情景下,山东省火电行业 SO_2、NO_x、PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 排放量与 2018 年基准情景相比,分别减少了 10947.71,44358.58,1606.00,1503.29t,火电行业排放的 SO_2、NO_x、PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 对各城市贡献浓度较 2018 年基准情景浓度分别降低了 22.66%~44.14%、7.10%~54.37%、23.08%~42.02%和 27.20%~42.44%.在碳达峰、碳中和情景下,火力发电仍是山东省能源安全和稳定供应的“压舱石”,减污降碳协同控制对山东火电行业至关重要.

关键词：火力发电；碳达峰；碳中和；CALPUFF；污染贡献
中图分类号：X51 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2024)11-5990-09
DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2024.0229

Air pollution impact of thermal power industry in Shandong Province under carbon peak and carbon neutrality scenario.

WANG Sheng[1], ZHOU Bin[2], QU Jia-Bao[3], LI Jian-Hui[4], YU Li-Zhao[4], WU Xin[5], YANG Ying[4*], XU Xin[4**], BO Xin[4] (1.State Key Laboratory of Low-carbon Smart Coal-fired Power Generation and Ultra-clean Emission, China Energy Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210023, China；2. Artificial Intelligence applied Technology Research Center, National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Beijing 102211, China；3.State Environmental Protection Key Laboratory of Numerical Modeling for Environment Impact Assessment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China；4.Department of Environmental Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China；5. Linyi People's Hospital, Linyi 276000, China). *China Environmental Science*, 2024,44(11)：5990~5998

Abstract：This study took Shandong Province, a major province of thermal power generation, as an example, calculated the emissions of atmospheric pollutants from thermal power under the scenario of carbon peaking and carbon neutrality, and adopted the CALPUFF model to simulate the contribution of SO_2, NO_x, PM_{10}, and $PM_{2.5}$ pollution from the thermal power industry in Shandong under different scenarios. The results show that under the carbon peak scenario, the emissions of SO_2, NO_x, PM_{10}, and $PM_{2.5}$ in the Shandong thermal power industry decreased by 2483.42, 23448.71, 364.31, and 341.01t, respectively, compared with the baseline scenario in 2018. The contribution concentration of thermal power to SO_2, NO_x, PM_{10}, and $PM_{2.5}$ in each city decreased by 0.22%~26.61%, 0.66%~51.21%, 0.63%~23.82%, and 4.36%~24.38%, respectively, compared with the baseline scenario concentration in 2018. Under the carbon neutral scenario, SO_2, NO_x, PM_{10}, and $PM_{2.5}$ in the thermal power industry in Shandong Province SO_2, NO_x, PM_{10}, and $PM_{2.5}$ emissions decreased by 10947.71, 44358.58, 1606.00, 1503.29t, respectively, compared with the 2018 base scenario. The contribution concentration of thermal power to SO_2, NO_x, PM_{10}, and $PM_{2.5}$ in each city decreased by 22.66%~44.14%, 7.10%~54.37%, 23.08%~42.02%, and 27.20%~42.44%, respectively, compared with the baseline scenario concentration in 2018. Under the scenario of carbon peak and carbon neutrality, thermal power generation is still the "ballast stone" for energy security and stable supply in Shandong Province, and the collaborative control of pollution reduction and carbon reduction is crucial for Shandong thermal power industry.

Key words：thermal power generation；carbon peak；carbon neutrality；CALPUFF；pollution contribution
收稿日期：2024-04-11
基金项目：低碳智能燃煤发电与超净排放全国重点实验室开放课题(D2022FK075);中央高校基本科研业务费资助项目(buctrc202133)

* 责任作者, 硕士, 2022210140@buct.edu.cn; 博士, xuxin04210202@163.com

中国知网 https://www.cnki.net

研究表明,火电行业贡献了我国约 43%的碳排放[1].目前,针对碳达峰和碳中和背景下火电行业的发展路径,不同学者所持观点分歧较大.一方面,随着欧美国家相继提出和实施淘汰燃煤发电的法案,中国部分省区也出台了不再新增煤电并且加速退出的政策,有些学者因此主张加快燃煤电厂退出,实现煤电清零[2].另一方面,部分学者提出煤炭开发应进行绿色转型.然而,新能源发电具有明显的局限性,储能问题仍未得到解决,导致电力系统的供需平衡面临挑战.电力负荷峰谷差逐年加大, “尖峰负荷”更加显著,新能源尚无法完全填补能源需求的空白[3].

现有火电行业大气污染物排放研究主要集中在污染物排放清单编制和大气污染物排放影响等方面.在污染物排放清单编制方面,许多学者采用“自下而上”、“自上而下”或二者结合的方式,建立了火电行业不同层面和不同时间跨度的大气污染物排放清单[4-7].在大气污染物排放影响方面,研究者[8-14]在排放清单的基础上分别从城市和区域层面研究了火电行业大气污染物对空气质量的影响;朱文波等[15]运用 CAMx 模型分析 2012 年广东省火电排放对大气环境质量的影响;吴宁[16]则运用 CALPUFF 模型模拟了陕西省 2018 年火电行业污染物排放对环境空气质量的影响.此外,熊天琦[17]和 Lin 等[18]采用不同的定量分析方法评估燃煤电厂排放的污染物对大气环境质量的影响.在情景模拟分析方面,Wang 等[19-20]利用 CMAQ 模型分别模拟了 2020 年的未来情景以及拆除北京地区所有火电厂的情景下火电行业大气污染物的排放对空气质量的影响.现有研究表明,火电行业对环境空气质量影响的研究仍以排放清单和模型模拟为主,针对“双碳”背景下火电行业大气环境影响的研究较少,同时也缺乏“双碳”背景下火电行业是否需要全面退出的研究.

本研究以火力发电大省山东省为例,建立了山东省火电行业 2018 年基准情景、碳达峰情景、碳中和情景下排放清单,采用 CALPUFF 模式模拟了不同情景下的大气污染贡献情况,为火电行业“双碳”背景下发展路径提供参考.

1　材料与方法

1.1　研究区域

本研究区域为山东省(总面积 15.80 万 km^2),包括济南市、德州市、聊城市、滨州市、烟台市、潍坊市、威海市、菏泽市、青岛市、淄博市、日照市、临沂市、枣庄市、泰安市、东营市、济宁市 16 个设区的市[21](图 1).

根据国家统计年鉴,2018 年山东省发电量 5882.1 亿 kW·h,约占全国总发电量的 8.13%,是我国发电第一大省[22].山东省电源结构长期以火力发电占据主导,2018 年火力发电量约为 5488.2 亿 kW·h,占全省总发电量的 93.30%[23].

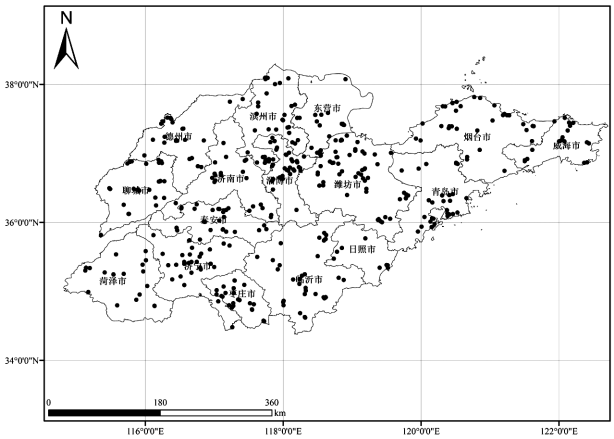


图 1　2018 年山东省火电行业大气排口位置分布

Fig.1　The location map of thermal power discharge ports in Shandong Province in 2018

1.2　清单情况

表 1　山东省各城市火电企业数量统计及污染物排放情况(t/a)

Table 1　Quantity statistics and pollutant emission of thermal power enterprises in Shandong Province (t/a)

名称	SO_2	NO_x	PM_{10}	$PM_{2.5}$	企业数量(个)
滨州市	4293	11179	638	612	40
德州市	1559	3908	253	239	23
东营市	1135	3446	159	140	21
菏泽市	1546	4560	200	185	23
济南市	2381	6513	302	270	22
济宁市	3129	10248	383	362	36
聊城市	2659	7929	346	328	28
临沂市	2197	6374	317	301	36
青岛市	753	2957	166	156	30
日照市	478	1684	105	100	10
泰安市	1236	4886	228	215	30
威海市	810	2946	137	129	18
潍坊市	2200	8364	348	328	55
烟台市	2740	7155	317	294	33
枣庄市	1440	4181	258	243	25
淄博市	2096	6703	339	309	34
总计	30652	93033	4496	4211	464

中国知网　https://www.cnki.net

山东省火电行业排放清单数据来自本研究团队 2018 年中国高分辨率火电行业大气污染源排放清单(HPEC)[4].2018 年山东省火电企业 464 家(表 1),SO_2、NO_x、PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 的排放量分别为 30652, 93033,4496,4211t/a,各污染物排放量的最大值均出现在滨州市,分别为 4293,11179,638,612t/a.

1.3 用电量预测

已有研究证明,通过分析国内生产总值(GDP),可有效预测未来年份全社会用电量[24-25].因此,本研究对 2014~2023 年山东省的年份与 GDP 进行线性回归模型建模,研究结果呈现良好的线性关系(R^2=0.98),预测得到 2030 年山东省 GDP 为 122328.07 亿元.

此外,本研究对 2014~2023 年山东省的全社会用电量与 GDP 进行线性回归模型建模,研究结果同样呈现良好的线性关系(R^2=0.94),预测得到 2030 年山东省全社会用电量可达 10583.58 亿 kW·h.

1.4 预测模型及参数

CALPUFF 是中国生态环境部推荐的大气环境影响评价法规模型之一[26-27].中尺度数据大气模式 WRF 为本研究提供了模拟三维气象场数据,区域地形数据精度为 90m,土地利用类型数据精度为 30m,来自于本团队之前的研究成果[28].将各个火电厂作为点源处理,还考虑了地理坐标、烟囱高度、温度、出口流速、排放量等信息,网格分辨率为 8km,东西向 96 个格点,南北向 65 个格点.模型参数的选取已在多个研究项目中得到了应用,取得了很好的模拟效果[29-30].

1.5 情景设计

1.5.1 基准情景 基准情景(情景Ⅰ)为 2018 年山东省火电行业大气污染物排放的现状情景.

1.5.2 碳达峰情景 碳达峰情景(情景Ⅱ)为 2030 年山东省火电行业碳达峰情景.本情景的预测依据与方法主要参考《山东省碳达峰实施方案》(简称《实施方案》)及相关参考文献[31−35].综合考虑了 3 个方面的影响因素.

一是电源结构的改变.《实施方案》明确, ①大力发展新能源,实现电力消费增量由清洁电力供应.到 2030 年,光伏发电、风电、核电、生物质发电装机分别达到 9500,4500,1000,500 万 kW.年发电量是相应年份的发电装机容量与年利用小时数的乘积(公式(1))[34],年利用小时数按照 2023 年山东省的发电设备年利用小时数计算(表 2).②全面推进“外电入鲁”.接纳省外电量达到 2000 亿 kW·h,再结合山东省用电量预测部分,可推出到 2030 年山东省火力发电量 5324.25 亿 kW·h(表 2),与基准情景(情景Ⅰ)相比,碳达峰情景(情景Ⅱ)下火力发电量仍处于较高水平,非化石能源发电占比增加.

二是加快煤电机组节能降碳改造.按照《实施方案》要求,为加强煤炭清洁高效利用,到 2025 年,煤电机组正常工况下平均供电煤耗降至 295g 标准煤/(kW·h)左右.假设到 2030 年,平均供电煤耗降至 290g 标准煤/(kW·h).

三是污染物排放标准.山东省 2018 年火电行业烟气 PM 和 SO_2 的排放浓度已经远低于超低排放限制要求,而 NO_x 的排放还没有达到.因此在此情景假设中,PM 和 SO_2 的排放浓度维持现状,NO_x 执行按照 35mg/m^3 排放标准考虑[36].具体计算公式如下:

$$G = I \cdot H \tag{1}$$

$$\mathrm{AC} = G \cdot \mathrm{CC} \tag{2}$$

$$\mathrm{EF} = C \cdot V \tag{3}$$

$$E = \mathrm{AC} \cdot \mathrm{EF} \tag{4}$$

式中:G 为碳达峰不同发电类型的发电量,亿 kW·h;I 为碳达峰不同发电类型的装机容量(表 2),万 kW; H 为碳达峰不同发电设备的年利用小时数,h; CC 为煤耗, g 标准煤/(kW·h); EF 为排放因子,g/kg;C 为排放浓度,mg/m;V 为理论烟气量,m^3/kg 燃料或 m^3/m^3 燃料;E 为污染物年排放量,t/a;AC 为燃料年消耗量,kg/a 或 m^3/a[6].

表 2 山东省基准情景、碳达峰情景下电源结构的比较

Table 2 Comparison of power supply structure under reference scenario and carbon peak scenario in Shandong Province

发电类型	基准情景		碳达峰情景			
	发电量(亿 kW·h)	发电量占比(%)	装机容量(万 kW)	年利用小时数(h)	发电量(亿 kW·h)	发电量占比(%)
火电	5488.2	93.3			5324.3	62.0
风电	393.9	6.7	9500	1392	1948.7	22.7
光伏			4500			
核能			1000	7279	727.9	8.5
其他			2122.5	2745.5	582.7	6.8
总计	5882.1	100.0			8583.6	100.0

1.5.3 碳中和情景 碳中和情景(情景Ⅲ)的预测依

中国知网 https://www.cnki.net

据主要是《中国电力行业碳达峰、碳中和的发展路径研究》[35].2018 年,山东省火电装机容量为 1.0367 亿 kW,约占全国总火电装机容量的 9.06%[22].基于这一比例,本情景确定了“碳中和”时山东省火电机组装机容量至少要保留 0.725 亿 kW.综上,碳中和时山东省火力发电量预计可达 2175.52 亿 kW·h.与基准情景(情景Ⅰ)相比,碳中和情景(情景Ⅲ)下火力发电量大幅度降低.

2　结果与讨论

2.1　现状情景下火电行业污染物排放贡献影响

根据《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》[36],2018 年全面推进火电等重点行业进行超低排放改造,山东省火电行业大气污染物排放均值已达到超低排放改造要求(SO_2:35mg/m^3,烟尘:10mg/m^3,NO_x:50mg/m^3).

由图 2、表 3 可见,现状情景下火电行业大气污染物排放年均贡献浓度高值区主要集中在济南市、淄博市、济宁市及周边地区.其中,SO_2、PM_{10}、$PM_{2.5}$ 最大年均浓度均出现在济南市,分别为 3.09,0.58,0.54μg/m^3.主要与远距离传输和地形有关.火电企业的污染排放为高架源排放,存在远距离传输的影响,其他城市的高架源可能对济南市产生影响,这一现象与伯鑫等[12]研究相一致.山东省中部山地突起,西北、西南低洼平坦,东部丘陵起伏,中部山地阻碍污染物扩散,使得 SO_2、PM_{10}、$PM_{2.5}$ 最大年均浓度出现在济南市.NO_x 最大年均浓度出现在淄博市,为 5.18μg/m^3,这与淄博市火电企业数量较高有关.

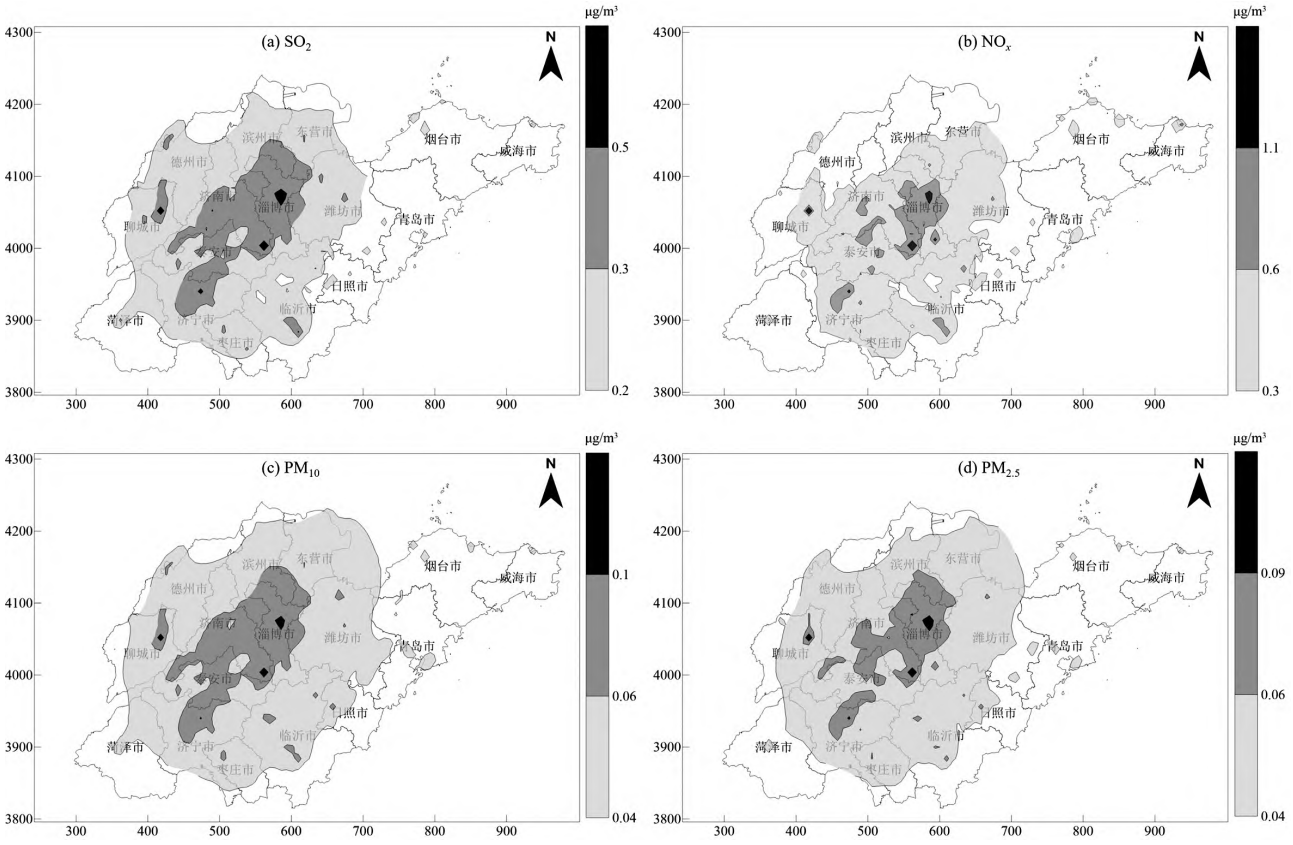


图 2　现状情景下山东省火电行业 SO_2、NO_x、PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 年均浓度分布

Fig.2　Average annual concentration distribution of SO_2, NO_x, PM_{10} and $PM_{2.5}$ in thermal power industry in Shandong Province

坐标单位:km,下同

2.2　现状监测值贡献对比

表 3 表明,火电行业对城市污染物年均贡献值远低于监测数据.火电行业对各个城市 SO_2、NO_x、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 年均浓度贡献占背景浓度的比例分别为 1.16%~2.41%、0.13%~2.34%、0.03%~0.08%及 0.21%~1.06%.山东省火电行业 SO_2、NO_x、PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 年均浓度贡献占背景监测值浓度较小,仅为 0.03%~2.41%,这与其他研究成果结论相一致[3].

中国知网　https://www.cnki.net

表 3 山东省各市火电行业污染物年均预测浓度与监测浓度对比

Table 3 Comparison of annual predicted and monitored concentrations of pollutants in thermal power industry in Shandong Province

城市	SO_2 年均浓度(μg/m³)			NO_x 年均浓度(μg/m³)			PM_{10} 年均浓度(μg/m³)			$PM_{2.5}$ 年均浓度(μg/m³)		
	预测浓度	监测浓度	比例(%)	预测浓度	监测浓度	比例(%)	预测浓度	监测浓度	比例(%)	预测浓度	监测浓度	比例(%)
济南市	3.09	16	2.41	5.10	44	1.45	0.58	107	0.07	0.54	51	1.06
青岛市	1.53	10	1.70	3.06	31	1.10	0.37	72	0.06	0.35	34	1.03
淄博市	2.54	24	1.77	5.18	43	2.01	0.49	106	0.08	0.46	55	0.84
枣庄市	1.18	19	1.24	1.97	36	1.10	0.24	115	0.04	0.23	59	0.39
烟台市	0.86	10	1.43	1.83	27	0.13	0.19	66	0.05	0.18	29	0.62
潍坊市	1.52	17	1.79	2.89	36	1.60	0.29	104	0.06	0.27	53	0.51
济宁市	1.26	20	2.10	2.53	36	2.34	0.22	92	0.08	0.20	52	0.38
泰安市	0.92	18	1.71	1.62	36	1.50	0.20	102	0.06	0.19	51	0.37
日照市	0.42	12	1.16	0.72	35	0.68	0.10	79	0.04	0.10	42	0.24
东营市	0.96	18	1.34	1.32	36	0.91	0.21	94	0.06	0.20	49	0.41
威海市	0.43	7	2.04	1.06	17	2.08	0.09	50	0.06	0.09	25	0.36
莱芜市	1.03	23	1.49	2.00	41	163	0.20	110	0.06	0.19	58	0.33
临沂市	1.18	18	1.63	2.34	42	1.39	0.22	106	0.05	0.21	54	0.39
德州市	1.01	17	1.98	1.48	37	1.33	0.19	109	0.06	0.18	56	0.32
聊城市	0.86	14	2.05	1.20	39	1.02	0.17	120	0.05	0.16	60	0.27
滨州市	0.95	22	1.44	1.28	39	1.09	0.19	98	0.06	0.18	54	0.33
菏泽市	0.64	14	1.52	0.86	39	0.73	0.12	119	0.03	0.12	58	0.21

2.3 碳达峰情景下的火电行业排放贡献影响

碳达峰情景(情景Ⅱ)下,山东省火电行业 SO_2、NO_x、PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 排放量分别为 28167.6,69584.18,4132.10,3867.86t/a,与 2018 年污染物排放相比,NO_x 是降幅最大的污染物,降幅达到 25.2%.

由图 3 可见,碳达峰情景(情景Ⅱ)下火电行业大气污染物年均浓度贡献与 2018 年现状情景分布(图 2)较为一致.碳达峰情景(情景Ⅱ)相较于 2018 年现状情景,火电行业对各市 SO_2、NO_x、PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 最大年均浓度贡献均减少(表 4),SO_2、NO_x、PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 年均贡献浓度降幅分别为 15.94%、36.97%、14.80%和 15.75%.此外,SO_2、NO_x、PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 最大年均浓度均出现在济南市,分别为 2.56、3.37、0.49 和 0.46μg/m³,较现状情景分别降低了 17.06%、33.95%、15.84%、15.18%.火电对各城市贡献浓度 SO_2、NO_x、PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 较于 2018 年基准情景浓度分别降低了 0.22%~26.61%、0.66%~51.21%、0.63%~23.82%和 4.36%~24.38%.

表 4 碳达峰情景下山东省各市火电行业污染物年均浓度贡献与 2018 年现状对比

Table 4 Comparison of the annual concentration contribution of pollutants in thermal power industry in Shandong Province under the carbon peak scenario and the status quo in 2018

城市	SO_2 年均浓度(μg/m³)			NO_x 年均浓度(μg/m³)			PM_{10} 年均浓度(μg/m³)			$PM_{2.5}$ 年均浓度(μg/m³)		
	碳达峰	2018 现状	下降比例(%)	碳达峰	2018 现状	下降比例(%)	碳达峰	2018 现状	下降比例(%)	碳达峰	2018 现状	下降比例(%)
济南市	2.56	3.09	17.06	3.37	5.10	33.95	0.49	0.58	15.84	0.46	0.54	15.18
青岛市	1.28	1.53	16.56	1.83	3.06	40.14	0.31	0.37	15.31	0.30	0.35	15.35
淄博市	2.22	2.54	12.69	3.31	5.18	36.15	0.43	0.49	12.48	0.40	0.46	12.86
枣庄市	1.03	1.18	12.33	1.31	1.97	33.72	0.21	0.24	10.98	0.20	0.23	12.52
烟台市	0.71	0.86	17.15	0.97	1.83	46.91	0.16	0.19	13.90	0.15	0.18	14.02
潍坊市	1.19	1.52	21.75	1.62	2.89	44.08	0.24	0.29	17.96	0.22	0.27	17.18
济宁市	0.92	1.26	26.61	1.27	2.53	49.68	0.17	0.22	23.41	0.16	0.20	20.47
泰安市	0.88	0.92	4.37	1.27	1.62	21.86	0.18	0.20	11.02	0.17	0.19	11.90
日照市	0.417	0.418	0.22	0.72	0.72	0.66	0.10	0.10	0.63	0.10	0.10	4.36
东营市	0.91	0.96	5.25	0.89	1.32	32.42	0.19	0.21	7.36	0.18	0.20	9.00
威海市	0.32	0.43	24.91	0.52	1.06	51.21	0.07	0.09	18.71	0.07	0.09	23.08

中国知网 https://www.cnki.net

续表 4

城市	SO_2 年均浓度(μg/m^3)			NO_x 年均浓度(μg/m^3)			PM_{10} 年均浓度(μg/m^3)			$PM_{2.5}$ 年均浓度(μg/m^3)		
	碳达峰	2018 现状	下降比例(%)	碳达峰	2018 现状	下降比例(%)	碳达峰	2018 现状	下降比例(%)	碳达峰	2018 现状	下降比例(%)
莱芜市	0.91	1.03	11.25	1.37	2.00	31.55	0.17	0.20	12.82	0.16	0.19	13.99
临沂市	0.94	1.18	20.69	1.30	2.34	44.53	0.18	0.22	19.47	0.17	0.21	20.12
德州市	0.74	1.01	26.33	0.80	1.48	45.76	0.14	0.19	23.82	0.14	0.18	24.38
聊城市	0.74	0.86	14.37	0.77	1.20	35.96	0.14	0.17	14.88	0.14	0.16	14.73
滨州市	0.81	0.95	14.85	0.84	1.28	34.54	0.16	0.19	14.07	0.15	0.18	14.77
菏泽市	0.48	0.64	24.64	0.47	0.86	45.41	0.10	0.12	18.86	0.09	0.12	23.90

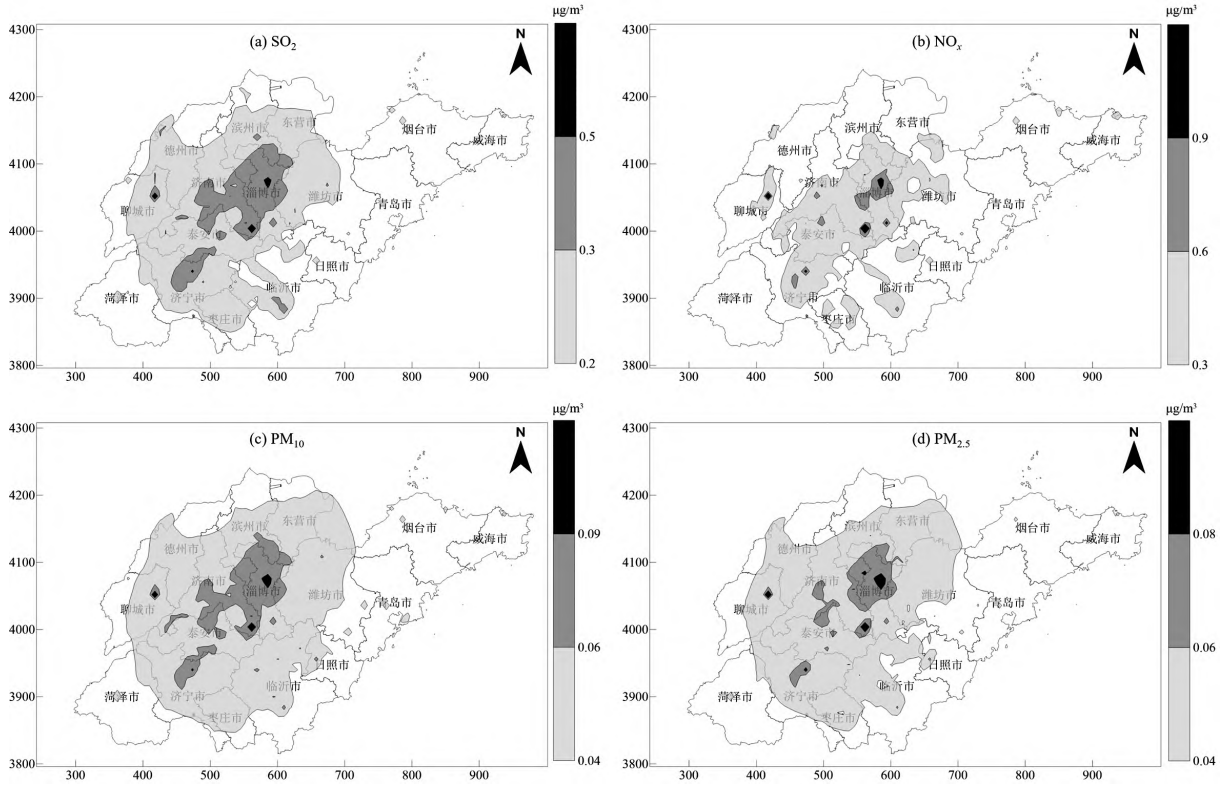


图 3　碳达峰情景下山东省火电行业 SO_2、NO_x、PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 年均浓度分布

Fig.3　Average annual concentration distribution of SO_2, NO_x, PM_{10} and $PM_{2.5}$ in thermal power industry in Shandong Province under the carbon peak scenario

2.4　碳中和情景下的火电行业排放贡献影响

碳中和情景(情景Ⅲ)下,山东省现有火电行业 SO_2、NO_x、PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 排放量分别为 19703.31, 48674.31,2890.41,2705.58t/a,与 2018 年排放现状相比，分别减少了 10947.71,44358.58,1606.00, 1503.29t/a.

表 5　碳中和情景下山东省各市火电行业污染物年均浓度贡献与 2018 年现状对比

Table 5　Comparison of the annual concentration contribution of pollutants in thermal power industry in Shandong Province under carbon neutral scenario and the status quo in 2018

城市	SO_2 年均浓度(μg/m^3)			NO_x 年均浓度(μg/m^3)			PM_{10} 年均浓度(μg/m^3)			$PM_{2.5}$ 年均浓度(μg/m^3)		
	碳中和	2018 现状	下降比例(%)	碳中和	2018 现状	下降比例(%)	碳中和	2018 现状	下降比例(%)	碳中和	2018 现状	下降比例(%)
济南市	1.95	3.09	36.87	3.15	5.10	38.23	0.37	0.58	35.94	0.35	0.54	35.44
青岛市	0.97	1.53	36.49	1.71	3.06	44.02	0.24	0.37	35.54	0.23	0.35	35.57
淄博市	1.69	2.54	33.54	3.09	5.18	40.29	0.33	0.49	33.39	0.31	0.46	33.67

中国知网　https://www.cnki.net

续表 5

城市	SO_2 年均浓度(μg/m³)			NO_x 年均浓度(μg/m³)			PM_{10} 年均浓度(μg/m³)			$PM_{2.5}$ 年均浓度(μg/m³)		
	碳中和	2018 现状	下降比例(%)	碳中和	2018 现状	下降比例(%)	碳中和	2018 现状	下降比例(%)	碳中和	2018 现状	下降比例(%)
枣庄市	0.79	1.18	33.27	1.22	1.97	38.02	0.16	0.24	32.24	0.15	0.23	33.41
烟台市	0.54	0.86	36.94	0.91	1.83	50.36	0.12	0.19	34.46	0.12	0.18	34.55
潍坊市	0.91	1.52	40.44	1.51	2.89	47.70	0.18	0.29	37.56	0.17	0.27	36.96
济宁市	0.70	1.26	44.14	1.19	2.53	52.94	0.13	0.22	41.71	0.12	0.20	39.47
泰安市	0.67	0.92	27.21	1.18	1.62	26.92	0.14	0.20	32.27	0.13	0.19	32.94
日照市	0.32	0.42	22.66	0.67	0.72	7.10	0.08	0.10	23.08	0.07	0.10	27.20
东营市	0.69	0.96	27.88	0.83	1.32	36.80	0.15	0.21	29.49	0.14	0.20	30.73
威海市	0.25	0.43	42.84	0.48	1.06	54.37	0.06	0.09	38.13	0.05	0.09	41.45
莱芜市	0.70	1.03	32.45	1.28	2.00	35.99	0.13	0.20	33.64	0.12	0.19	34.53
临沂市	0.71	1.18	39.63	1.21	2.34	48.12	0.13	0.22	38.71	0.13	0.21	39.20
德州市	0.57	1.01	43.93	0.75	1.48	49.28	0.11	0.19	42.02	0.10	0.18	42.44
聊城市	0.56	0.86	34.82	0.72	1.20	40.11	0.11	0.17	35.21	0.10	0.16	35.09
滨州市	0.62	0.95	35.19	0.78	1.28	38.78	0.12	0.19	34.60	0.12	0.18	35.13
菏泽市	0.37	0.64	42.64	0.44	0.86	48.95	0.07	0.12	38.24	0.07	0.12	42.08

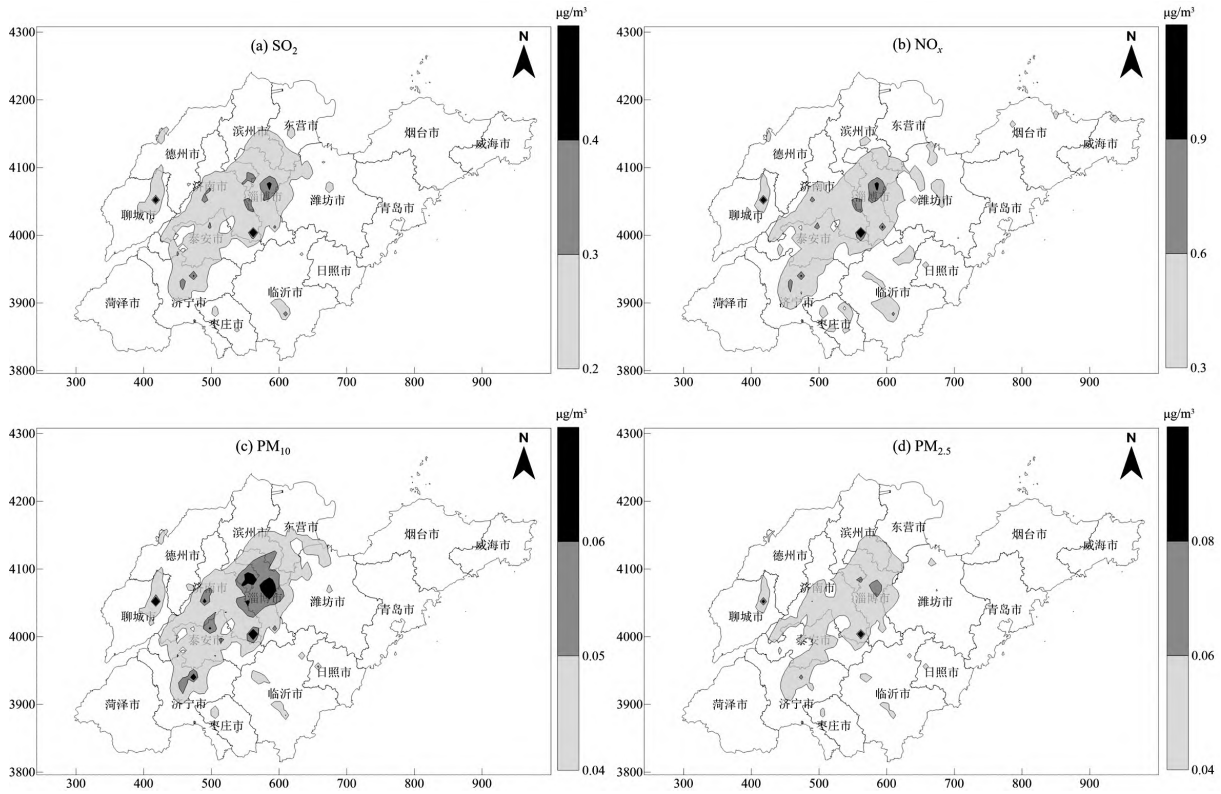


图 4 碳中和情景下山东省火电行业 SO_2、NO_x、PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 年均浓度分布

Fig.4 Average annual concentration distribution of SO_2, NO_x, PM_{10} and $PM_{2.5}$ in thermal power industry in Shandong Province under carbon neutral scenario

由图 4 可见,火电行业对各市 SO_2、NO_x、PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 最大年均浓度贡献均减少,SO_2、NO_x、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 最大年均浓度均出现在济南市(表 5),分别为 1.95,3.15,0.37,0.35μg/m³, 其降低了 36.87%、38.23%、35.94%、35.44%.碳中和情景各城市较于 2018 年现状,SO_2、NO_x、PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 贡献浓度分别降低了 22.66%~44.14%、7.10%~54.37%、23.08%~42.02%和 27.20%~42.44%.

中国知网 https://www.cnki.net

3　结论

3.1　基准情景(情景Ⅰ)下,2018 年山东省火电行业 SO_2、NO_x、PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 的排放量分别为 30651,93033,4496,4209t,污染物浓度高值区主要集中在济南市、淄博市、济宁市及周边地区.火电行业对城市污染物年均贡献值远低于监测数据,火电行业对各城市 SO_2、NO_x、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 年均浓度贡献占背景浓度的比例分别为 1.16%~2.41%、0.13%~2.34%、0.03%~0.08%及 0.21%~1.06%,表明基准情景下火电行业对山东省环境空气质量影响较小.

3.2　碳达峰情景(情景Ⅱ)下,与 2018 年基准情景相比,山东省火电行业 SO_2、NO_x、PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 排放量分别减少了 2483.42,23448.71,364.31,341.01t,山东省火电行业 SO_2、NO_x、PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 对各城市贡献浓度分别降低了 0.22%~26.61%、0.66%~51.21%、0.63%~23.82%和 4.36%~24.38%.表明在碳达峰情景,尽管山东省火力发电量仍处于较高水平,但火电行业的大气污染物排放量和污染贡献均呈下降趋势.

3.3　碳中和情景(情景Ⅲ)下,与 2018 年基准情景相比,山东省火电行业 SO_2、NO_x、PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 排放量分别减少了 10947.71,44358.58,1606.00,1503.29t,山东省火电行业 SO_2、NO_x、PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 对各城市贡献浓度分别降低了 22.66%~44.14%、7.10%~54.37%、23.08%~42.02%和 27.20%~42.44%.因此,与基准情景相比,碳中和情景下山东省火电行业大气污染物排放量和污染贡献呈现明显下降趋势.这表明山东火电行业在碳中和情景下仍是山东省能源安全和稳定供应的“压舱石”,同时也突显了火电行业在减污降碳协同控制中的重要作用.

参考文献：

[1] 朱法华,徐静馨,潘　超,等.煤电在碳中和目标实现中的机遇与挑战 [J]. 电力科技与环保, 2022,38(2):79-86.
Zhu F H, Xu J X, Pan C, et al. Opportunities and challenges of coal power industry in the achievement of carbon neutrality goal [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2022,38(2):79-86.

[2] 崔宜筠,Nathan Hultman,姜克隽,等.加快中国燃煤电厂退出:通过逐厂评估探索可行的退役路径 [R]. 马里兰:马里兰大学全球可持续发展中心, 2020.
Cui Y J, Nathan Hultman, Jiang K J, et al. A high ambition coal phaseout in China: Feasible strategies through a comprehensive plant-by-plant assessment [R]. Maryland: Center for Global Sustainability: College Park, Maryland, 2020.

[3] 吴　琦,金　洋,韩　旭.“双碳”目标下的能源发展路径 [J]. 有色冶金节能, 2021,37(6):6-9.
Wu Q, Jin Y, Han X. Eneray development path under the "2-stage carbon reduction" goal [J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 2021,37(6):6-9.

[4] 屈加豹,王　鹏,伯　鑫,等.超低改造下中国火电排放清单及分布特征 [J]. 环境科学, 2020,41(9):3969-3975.
Qu J B, Wang P, Bo X, et al. Inventory and distribution characteristics of China's thermal power emissions under ultra-low reconstruction [J]. Environmental Science, 2020,41(9):3969-3975.

[5] 屈加豹.全国火电行业大气污染物排放及减排特征研究 [D]. 石家庄:河北科技大学, 2019.
Qu J B. Study on air pollutants emission of power plants in china and characteristics of its reduction [D]. Shijaizhuang: Hebei University of Science and Technology, 2019.

[6] 崔建升,屈加豹,伯　鑫,等.基于在线监测的 2015 年中国火电排放清单 [J]. 中国环境科学, 2018,38(6):2062-2074.
Cui J S, Qu J B, Bo X, et al. High resolution power emission inventory for China based on CEMS in 2015 [J]. China Environmental Science, 2018,38(6):2062-2074.

[7] Tang L, Qu J B, Mi Z F, et al. Substantial emission reductions from Chinese power plants after the introduction of ultra-low emissions standards [J]. Nature Energy, 2019,4(11):929-938.

[8] Tang L, Xue X D, Qu J B, et al. Air pollution emissions from Chinese power plants based on the continuous emission monitoring systems network [J]. Scientific Data, 2020,7(1):1-10.

[9] 雷团团.沧州市大气污染源排放清单及环境影响研究 [D]. 石家庄:河北科技大学, 2019.
Lei T T. Emission inventory and environmental impact of air pollution sources in Cangzhou [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2019.

[10] 阚　慧,伯　鑫,屈加豹,等.2015 年海南省火电行业大气环境影响研究 [J]. 中国环境科学, 2019,39(1):428-439.
Kan H, Bo X, Qu J B, et al. Air quality impacts of power plant emissions in Hainan Province, 2015. [J]. China Environmental Science, 2019,39(1):428-439.

[11] 崔建升,雷团团,伯　鑫,等.海南省大气污染源排放清单及环境影响研究 [J]. 环境污染与防治, 2020,42(6):651-659,665.
Cui J S, Lei T T, Bo X, et al. Study on air pollutant emission inventory and environmental impact in Hainan Province [J]. Environmental Pollution & Control, 2020,42(6):651-659,665.

[12] 伯　鑫,王　刚,温　柔,等.京津冀地区火电企业的大气污染影响 [J]. 中国环境科学, 2015,35(2):364-373.
Bo X, Wang G, Wen R, et al. Air pollution effect of the thermal power plants in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. China Environmental Science, 2015,35(2):364-373.

[13] Cheng L, Wang T, Bo X, et al. Thermal power industry emissions and their contribution to air quality on the Fen-Wei plain [J]. Atmosphere, 2022,13(5):652.

[14] 伯　鑫,屈加豹,雷勋杰,等.唐山市重点行业的大气污染影响 [C]//中国环境科学学会. 2018 中国环境科学学会科学技术年会论文集(第二卷), 2018:110-119.
Bo X, Qu J B,Lei X J, et al. Air pollution impact of key industries in Tangshan [C]//Chinese Society of Environmental Sciences. Proceedings of the 2018 Annual Conference of the Chinese Society of

中国知网　https://www.cnki.net

Environmental Sciences on Science and Technology (Volume 2), 2018:110-119.

[15] 朱文波,李 楠,黄志炯,等.广东省火电污染物排放特征及其对大气环境的影响 [J]. 环境科学研究, 2016,29(6):810-818.
Zhu W B, Li N, Huang Z J, et al. Emission characteristics of thermal power in Guangdong Province and influence on atmospheric environment [J]. Research of Environmental Sciences, 2016,29(6): 810-818.

[16] 吴 宁.陕西省火电行业的环境空气质量贡献及减缓策略研究 [D]. 西安:西北大学, 2021.
Wu N. Research on the contribution and mitigation strategies of Shaanxi thermal power industry's environmental air quality [D]. Xi'an: Northwest University, 2021.

[17] 熊天琦.山东省燃煤电厂大气污染现状与减排潜力研究 [D]. 济南:济南大学, 2016.
Xiong T Q. Current status and mitigation potential analysis of atmospheric emissions from coal-fired plants in Shandong province [D]. Jinan: University of Jinan, 2016.

[18] Lin Y C, Cheng F Y, Lee Y J, et al. Assessments of the emission contributions from an ultra-supercritical coal-fired power plant to ambient $PM_{2.5}$ in Taiwan [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2023,23(12):230059.

[19] Wang Z, Pan L, Li Y, et al. Assessment of air quality benefits from the national pollution control policy of thermal power plants in China: A numerical simulation [J]. Atmospheric Environment, 2015,106288-304.

[20] Wang L Q,Li P F,Yu S C, et al. Predicted impact of thermal power generation emission control measures in the Beijing-Tianjin-Hebei region on air pollution over Beijing, China [J]. Scientific reports, 2018,8(1):934.

[21] 山东省人民政府.山东省行政区划 [EB/OL]. [2022-12]. http://www.shandong.gov.cn/col/col97866/index.html.
People's Government of Shandong Province. Administrative division of Shandong Province [EB/OL]. [2022-12]. http://www.shandong.gov.cn/col/col97866/index.html.

[22] 国家统计局:中国统计年鉴 [M]. 北京:中国统计出版社, 2019:53-877.
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2019:53-877.

[23] 山东省统计局:山东统计年鉴 [M]. 北京:中国统计出版社, 2019:53-629.
Shandong Provincial Bureau of Statistics. China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2019:53-629.

[24] 王 海,吉增宝,颜 炯,等.湖北省电力消费与经济增长关系研究及发展预测 [J]. 价值工程, 2023,42(11):33-36.
Wang H, Ji Z B, Yan J, et al. Research and Forecast on the Relationship between Electricity Consumption and Economic Growth in Hubei Province [J]. Value Engineering, 2023,42(11):33-36.

[25] 王可蕙.“双碳”背景下电力需求预测方法研究 [D]. 北京:华北电力大学(北京), 2024.
Wang K H. Power demand forecasting method under the background of "Double Carbon"[D]. Beijing: North China Electric Power University (BeiJing), 2024.

[26] 伯 鑫,丁 峰,徐 鹤,等.大气扩散 CALPUFF 模型技术综述 [J]. 环境监测管理与技术, 2009,21(3):9-13,47.
Bo X, Ding F, Xu H, et al. Review of atmospheric diffusion spersion model CALPUFF technology [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2009,21(3):9-13,47.

[27] HJ 2.2-2018 环境影响评价技术导则 大气环境 [S].
HJ 2.2-2018 Technical guidelines for environmental impact assessment-Atmospheric environment [S].

[28] 伯 鑫,王 刚,田 军,等.AERMOD 模型地表参数标准化集成系统研究 [J]. 中国环境科学, 2015,35(9):2570-2575.
Bo X, Wang G, Tian J, et al. Standard systems of surface parameters in AERMOD [J]. China Environmental Science, 2015,35(9):2570-2575.

[29] 田 飞,伯 鑫,薛晓达,等.基于复杂地形-气象场的二噁英污染物沉降研究 [J]. 中国环境科学, 2019,39(4):1678-1686.
Tian F, Bo X, Xue X D, et al. Study on settlement of dioxin pollutants under complex terrain-weather conditions [J]. China Environmental Science, 2019,39(4):1678-1686.

[30] 汤 铃,郭 静,郭朋恒,等.山东省垃圾焚烧电厂 PCDD/Fs 排放清单及其环境影响 [J]. 中国环境科学, 2023,43(2):735-747.
Tang L, Guo J, Guo P H, et al. PCDD/Fs emission inventory and environmental impact of municipal solid waste incineration plants in Shandong Province [J]. China Environmental Science, 2023,43(2): 735-747.

[31] 山东省人民政府.山东省人民政府关于印发山东省碳达峰实施方案的通知 [EB/OL]. [2022-12-18]. http://www.shandong.gov.cn/art/2022/12/28/art_107851_123025.html.
People's Government of Shandong Province. Notice of the People's Government of Shandong Province on issuing the implementation plan of carbon peak in Shandong Province [EB/OL]. [2022-12-18]. http://www.shandong.gov.cn/art/2022/12/28/art_107851_123025.html.

[32] 山东省人民政府.山东省能源发展“十四五”规划 [EB/OL]. [2022-11-05]. http://www.shandong.gov.cn/art/2021/8/19/art_107851_113859.html.
People's Government of Shandong Province. The 14th Five-Year Plan for energy development of Shandong Province [EB/OL]. [2022- 11- 05]. http://www.shandong.gov.cn/art/2021/8/19/art_107851_113859.html.

[33] 朱法华,徐静馨,潘 超.电力行业减污降碳发展状况及目标展望 [J]. 环境保护, 2022,50(10):15-20.
Zhu F H, Xu J X, Pan C. Development situation and target prospect on the reduction of pollutant and carbon emissions in power industry [J]. Environmental Protection, 2022,50(10):15-20.

[34] 朱法华,王玉山,徐 振,等.碳达峰、碳中和目标下中国能源低碳发展研究 [J]. 环境影响评价, 2021,43(5):1-8.
Zhu F H, Wang Y S, X Z, et al. Research on China's energy low carbon development under the targets of emission peak and carbon neutrality [J]. Environmental Impact Assessment, 2021,43(5):1-8.

[35] 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 F H, Wang Y S, Xu Z, et al. Research on the development path of carbon peak and carbon neutrality in China's Power Industry [J]. 2021,37(3):9-16.

[36] 中华人民共和国生态环境部. 全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案 [EB/OL]. [2015-12-11]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201512/t20151215_319170.htm.
Ministry of Ecology and Environment, People's Republic of China. Full implementation of coal-fired power plant ultra-low emissions and energy saving modification scheme [EB/OL]. [2015-12-11]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201512/t20151215_319170.htm.

作者简介: 王 圣(1973-),江苏省盐城人,研究员级高工,主要研究方向:大气污染防治.发表论文 321 篇.wangsheng9999@126.com.

中国知网 https://www.cnki.net