

燃气电厂与超低排放燃煤电厂环境及生态效应对比

樊慧¹ 段天宇¹ 朱博骐¹ 陈双营²

1. 中国石油经济技术研究院 2. 中国石油天然气销售江苏分公司

摘要：较之于超低排放燃煤发电，燃气发电是否仍然具有环保与生态方面的比较优势，是我国未来电源结构优化决策时的重要考量因素。为此，基于我国火电行业现有的环保标准，从污染物排放水平、污染物治理产生的问题、碳排放及资源消耗等方面对比了二者的环境和生态效应。研究表明：①在实施低氮燃烧改造和加装 SCR 后，燃气电厂的常规污染物排放量明显低于超低排放燃煤发电；②燃气发电单位度电 CO₂ 排放量较超低排放燃煤发电减少约 50%，并可显著节约水资源与土地资源；③由于超低排放燃煤发电存在着 SO₃ 等可凝结颗粒物和重金属排放等问题，因而燃气发电的环保、生态效应优势更为显著。进而提出以下发展建议：①继续加大环保政策力度，鼓励燃气电厂建设；②参照北京、深圳地区对燃气轮机的 NO_x 排放标准，修订《火电厂大气污染物排放标准：GB 13223—2011》，将全国范围内燃气轮机 NO_x 的排放限值设定为 15 mg/m³，同时取消对燃气轮机烟尘、SO₂ 的排放限值；③加快构建和完善全国碳市场并设定“地板价”，通过碳价机制形成气候友好的公平竞争市场环境，引导电力企业加快向低碳电力结构转型的步伐。

关键词：燃气发电；超低排放燃煤发电；环境效应；生态效应；对比；SCR；NO_x 排放；碳市场

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2020.07.018

Comparison of environmental and ecological effects between gas-fired and ultra-low emission coal-fired power generation plants

FAN Hui¹, DUAN Tianyu¹, ZHU Boqi¹, CHEN Shuangying²

(1. CNPC Economics & Technology Research Institute, Beijing 100724, China; 2. Jiangsu Branch of PetroChina Natural Gas Marketing Company, Nanjing, Jiangsu 211100, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 40, ISSUE 7, pp.146-153, 7/25/2020. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Whether gas-fired power generation still has the comparative advantages in environmental protection and ecology compared with ultra-low emission (ULE) coal-fired power generation is an important factor to be considered in domestic power structure optimization decision in the future. Based on existing environmental protection standard of domestic fossil-fuel industry, this paper compared the environmental and ecological effects of gas-fired power generation with that of ULE coal-fired power generation from the aspects of pollutant emission level, issues caused by pollutants control, carbon emission and resource consumption. And the following research results were obtained. First, after low-nitrogen combustion modification and SCR installation are implemented in gas-fired power generation, its emission of conventional pollutants is much lower than that of ULE coal-fired power generation. Second, CO₂ emission per kilowatt hour of gas-fired power generation is about 50% lower than that of ULE coal-fired power generation. By means of gas-fired power generation, water and land resources can be saved greatly. Third, ULE coal-fired power generation suffers the emission problems of condensable particles (SO₃) and heavy metals, so gas-fired power generation is much more advantageous in terms of environmental protection and ecological effect. Finally, several development suggestions were proposed. First, intensify environmental policies continuously and encourage the construction of gas-fired power generation plants. Second, by referring to NO_x emission standard of gas turbines in Beijing and Shenzhen, revise the "Air Pollutant Emission Standard of Fossil-Fuel Power Plants (GB 13223-2011)" and set domestic NO_x emission limit of gas turbines at 15 mg/m³ and cancel dust and SO₂ emission limits of gas turbine. Third, accelerate the construction and improvement of national carbon market and set the "floor price", establish a climate-friendly market environment of fair competition by virtue of carbon price mechanism, and speed up the transformation of electric power enterprises to the low-carbon power structure.

Keywords: Gas-fired power generation; ULE coal-fired power generation; Environmental effect; Ecological effect; Comparison; SCR; NO_x emission; Carbon market

作者简介：樊慧，女，1984年生，高级经济师，博士；主要从事天然气发电及其市场方面的研究工作。地址：(100724)北京市西城区六铺炕街6号。ORCID: 0000-0003-3740-0967。E-mail: huihui8405@163.com

0 引言

当前，我国环保工作已经逐步进入精细化治理阶段。尽管大气治理工作已取得显著成效，但据生态环境部《中国生态环境状况公报》数据，2019 年我国仍有 53% 的地级及以上城市环境空气质量超标，“2 + 26”城市优良天数占比仅为 53%，2019 年京津冀及周边、汾渭平原地区空气的 PM_{2.5} 平均浓度分别为 57 μg/m³、55 μg/m³，距离环境空气质量标准 35 μg/m³ 的要求还有很大的差距，与世界卫生组织确定的环境空气质量过渡时期目标 2 (IT-2) 25 μg/m³、过渡时期目标 3 (IT3) 15 μg/m³、空气质量准则值 (AQG) 10 μg/m³ 的要求差距更大。我国大气环境治理仍任重道远。

超低排放燃煤发电是重要的煤炭清洁利用方式，目前我国超过 80% 的燃煤电厂已实施了超低排放改造。当前，超低排放燃煤发电是否已完全实现等同于燃气发电的清洁程度？燃气发电是否还具有环保与生态方面的比较优势？这是我国未来电源结构优化决策时重要的考量因素。已有的关于超低排放燃煤电厂与燃气电厂的比较研究主要集中于发电成本方面，对环境与生态效应方面的研究较少且研究结论不完全一致。有研究认为，当燃煤发电标准煤耗不大于全国平均水平时比燃气电厂更清洁^[1]；也有研究指出，中国燃煤电厂与国际能源署提出的 2030 年燃煤电厂污染物排放目标仍有较大差距，燃煤发电大气污染物控制仍面临较大挑战^[2]。为进一步厘清燃气电厂相对超低排放燃煤电厂究竟是否存在环境优势，笔者开展了二者环境与生态效应的对比分析，并从加大环保政策力度、从严火电机组污染物排放标准、完善碳市场等方面提出了相关建议。

1 我国火电行业现有环保标准现状

2011 年，我国环境保护部（现生态环境部）与国家质量监督检验检疫总局制定了《火电厂大气污染物排放标准：GB 13223—2011》，这是自 1991 年首次发布该标准以来的第三次修订，自 2012 年开始实施。标准规定了火电厂大气污染物排放浓度限值、监测和控制要求。在此基础上，随着燃煤发电超低排放专项行动的实施、燃气电厂脱硝技术的应用，煤电和气电的环保标准也都得到了进一步的提升。

1.1 超低排放燃煤发电污染物排放标准现状

根据 GB 13223—2011 及国家环保部《关于执行大气污染物特别排放限值的公告》，自 2012 年 1 月，全国新建燃煤电厂排放烟尘、SO₂、NO_x 执行标准分别为 30 mg/m³、100 mg/m³、100 mg/m³（西南地区除外，其执行标准有所宽松），自 2013 年 4 月，重点控制区新受理的燃煤机组执行大气污染物特别排放限值，烟尘、SO₂、NO_x 排放标准分别为 20 mg/m³、50 mg/m³、100 mg/m³（表 1）。“十三五”期间，重点控制区市域范围内所有火电燃煤机组均执行特别排放限值要求。

我国自 2014 年开始规模化实施煤电超低排放改造。2014 年 9 月，国家发展和改革委员会、环保部、能源局共同制定了《煤电节能减排升级与改造行动计划（2014—2020 年）》，提出东部地区新建燃煤发电机组大气污染物排放浓度基本达到燃气轮机组排放限值，即在基准氧含量 6% 的条件下，烟尘、SO₂、NO_x 排放浓度不高于 10 mg/m³、35 mg/m³、50 mg/m³，中部地区原则上接近或达到上述排放限值，鼓励西部地区接近或达到上述排放限值。2015 年 12

表 1 燃煤电厂与燃气电厂污染物排放标准对比表

指标及 实施范围	燃煤电厂			燃气电厂			
	GB 13223—2011			GB 13223— 2011	北京	天津	深圳
	排放限值	特别排放限值	超低排放限值		DB11/847—2011	DB12/810—2018	深府办规 [2018]6 号
烟尘 / (mg · m ⁻³)	30	20	5 ~ 10	5	5	—	—
SO ₂ / (mg · m ⁻³)	100	50	35	35	20	—	—
NO _x / (mg · m ⁻³)	100	100	50	50	30	35 (现有项目) 30 (新建项目)	15
Hg 及其化合物 / (mg · m ⁻³)	0.03	0.03					
实施范围	重点控制区 以外地区	重点控制区	全国	重点控制区	北京	天津	深圳

注：重点控制区指包括京津冀、长三角、珠三角等“三区十群”19个省（区、市）47个地级及以上城市的市域范围。

月 2 日召开的国务院常务会议决定, 在 2020 年之前对燃煤电厂全面实施超低排放和节能改造。地方政府也积极响应, 江苏、浙江、上海、山东、山西等地出台了政策或地方标准, 明确要求燃煤电厂烟尘、 SO_2 、 NO_x 排放浓度不高于 5 mg/m^3 、 35 mg/m^3 、 50 mg/m^3 。

1.2 燃气机组大气污染物排放标准现状

GB 13223—2011 首次增设了燃气轮机组大气污染物排放浓度限值, 但并未单独设立标准, 而是与天然气锅炉笼统归为“以气体为燃料的锅炉或燃气轮机组”, 规定烟尘、 SO_2 、 NO_x 排放限值分别为 5 mg/m^3 、 35 mg/m^3 、 50 mg/m^3 (表 1)。

此后, 北京、天津、深圳陆续以地方标准或规范性文件等方式出台了更为严格的燃气轮机组排放限值 (表 1)。地方标准主要是将 NO_x 的排放限值从国家要求的 50 mg/m^3 进一步严格为 $15 \sim 35 \text{ mg/m}^3$; 此外, 天津、深圳对燃气轮机的烟尘、 SO_2 排放标准并未予以规范, 但这并不是标准的放松, 而是基于燃气轮机组实际排放水平很低, 几乎没有上述两种污染物的考虑。

从全球范围看, 我国目前实施的燃煤电厂超低排放标准属于世界领先, 标准严于美国、欧盟等地区^[2]。燃气轮机的排放标准方面, 国外仅美国对燃机 SO_2 有排放限值要求, 其他国家均未对烟尘、 SO_2 提出排放限值要求; NO_x 排放标准方面, 欧盟执行 $10 \sim 50 \text{ mg/m}^3$ 的限值标准, 美国执行 30 mg/m^3 的限值标准, 同时要求企业采用控制技术等进一步降低 NO_x 排放以获得运营执照, 其实际 NO_x 排放限值标准介于 $5 \sim 10 \text{ mg/m}^3$ ^[3]。因此, 我国在燃机 NO_x 排放标准方面, 与美国仍有差距。

总体来看, 随着火电大气污染控制技术的发展与应用, 我国燃煤与燃气发电的大气污染物排放标准都在不断趋严。随着越来越多的地方政府出台了更加严格的燃气发电 NO_x 排放限制标准, 气电的排放标准仍然领先于超低排放煤电。

2 燃气发电与超低排放燃煤发电污染物排放对比

2.1 常规污染物排放对比

笔者采用文献调研的方式, 对超低排放燃煤电厂和燃气电厂 3 种常规污染物——烟尘、 SO_2 、 NO_x 的实际排放水平进行比较。徐静馨等^[1]对江苏、广

东、山东地区共 99 台超低排放燃煤机组以及江苏省 17 台燃机的常规污染物进行了实测 (表 2), 结果显示: 实测范围内的超低排放燃煤电厂和燃气电厂 3 种常规污染物的排放水平均符合各自的排放标准, 但同类型火电机组的排放水平存在较大差异。从污染物排放均值看, 99 台超低排放燃煤机组的烟尘、 SO_2 、 NO_x 排放水平分别为 2 mg/m^3 、 16 mg/m^3 、 33 mg/m^3 , 8 台 E 级燃机排放水平为 0.85 mg/m^3 、 2.20 mg/m^3 、 30.00 mg/m^3 , 9 台 F 级燃机排放水平为 1.11 mg/m^3 、 0.84 mg/m^3 、 42.00 mg/m^3 。按照徐静馨等的实测数据^[1], 超低排放燃煤机组的平均烟尘排放浓度是燃机的 1.8 ~ 2.4 倍, SO_2 排放浓度是燃机的 7 ~ 19 倍, NO_x 排放浓度较 E 级燃机高 3 mg/m^3 、较 F 级燃机低 9 mg/m^3 。

考虑本文文献 [1] 样本中江苏省投运的大部分燃气电厂尚未安装选择性催化还原脱硝装置 (SCR), 其燃机 NO_x 排放水平显著高于深圳、北京等已实施 SCR 改造的地区。目前, 通过新型低氮燃烧器与 SCR 改造后, 北京 F 级燃机已实现 NO_x 排放浓度低于 30 mg/m^3 , E 级燃机排放浓度低于 15 mg/m^3 , 深圳所有燃机均已实现 NO_x 排放浓度低于 15 mg/m^3 ^[3-4]。

从 3 种常规大气污染物的实际排放水平看: ①超低排放燃煤电厂烟尘、 SO_2 的实际排放水平仍显著高于燃气发电机组, 特别是 SO_2 排放浓度是燃机的 7 ~ 19 倍。②在燃气电厂不实施 SCR 改造的情况下, 超低排放燃煤电厂和燃气电厂 NO_x 实际排放水平都在 $30 \sim 50 \text{ mg/m}^3$, 燃气电厂不存在显著优势, 但是通过新型低氮燃烧器与 SCR 改造后, 燃机 NO_x 排放浓度可以稳定在 15 mg/m^3 以下, 较超低排放煤电机组 NO_x 平均排放水平仍有优势。从国外燃机 NO_x 排放水平看, 通过低氮燃烧器改造、加装 SCR、控制燃气品质等多种方式, 基本已实现燃机 NO_x 排放达到 10 mg/m^3 甚至 5 mg/m^3 的排放^[5]。因此, 我国燃气轮机进一步控制 NO_x 排放浓度的空间还较大, 且技术上可行、可实施, 在深圳、北京等地区已得到实践检验^[6]。③实施燃煤电厂超低排放改造确实显著降低了电力行业常规污染物的排放总量, 为改善我国大气环境质量做出了重要贡献, 但实现了超低排放并不意味着燃煤发电达到了燃气发电的清洁程度, 重要原因是我国现行的燃气发电污染物限值标准高于其真实的排放水平, 特别是烟尘、 SO_2 的排放标准与实际排放量差距较大, 既不能起到激励约束作用, 也在一定程度上影响了社会对气电清洁性的认识。

表 2 燃气电厂与超低排放燃煤电厂污染物实际排放对比表

电厂类型	机组台数 / 台		常规污染物	浓度范围 / ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	均值 / ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	数据来源
	总台数	地区 (台数)				
超低排放燃煤电厂	99	江苏 (43)	烟尘	1 ~ 5	2	本文文献 [1]
		广东 (27)	SO ₂	8 ~ 24	16	
		山东 (29)	NO _x	22 ~ 44	33	
E 级	17	江苏 (8)	烟尘	0.11 ~ 1.87	0.85	本文文献 [1]
			SO ₂	1.0 ~ 3.1	2.2	
			NO _x	23 ~ 40	30	
	F 级	江苏 (9)	烟尘	0.46 ~ 1.97	1.11	
			SO ₂	0.48 ~ 1.84	0.84	
			NO _x	40.0 ~ 43.3	42.0	
燃气电厂	25	北京 (4, 均已加装脱硝装置)	烟尘	< 3	—	本文文献 [3] 本文文献 [4]
			SO ₂	< 5		
			NO _x	< 15		
	F 级	北京 (21, 均已加装脱硝装置)	NO _x	< 30		
			烟尘	< 3		
			SO ₂	< 5		
E 级	57	江苏 (28, 均未加装脱硝装置)	NO _x	< 50		
			NO _x	< 50		
F 级	17	江苏 (29, 其中 6 台加装脱硝装置)	NO _x	< 50		
			NO _x	< 50		
E 级	17	深圳 (11, 其中 2 台加装脱硝装置, 其余进行燃烧器升级)	NO _x	< 15	—	本文文献 [3]
			NO _x	< 15		
F 级		深圳 (6, 均已加装脱硝装置)	NO _x	< 15		

2.2 非常规污染物排放对比

2.2.1 汞及其化合物等重金属

联合国环境规划署发布的报告指出, 燃煤电厂是全球最大的人为汞 (Hg) 污染来源^[7]。汞是环境中一种生物毒性极强的重金属污染物, 具有持续性、迁移性、沉积性和生物富集的特点, 且甲基汞能通过食物链逐层放大, 在高营养级生物中高度富集并通过人体的血脑屏障, 对人的中枢神经系统产生危害^[8-9]。目前, 《火电厂大气污染物排放标准》对燃煤电厂汞及其化合物的排放限值是 0.03 mg/m^3 , 我国典型燃煤电厂实际运行中汞排放浓度在 $0.000 2 \sim 0.004 6 \text{ mg/m}^3$ ^[1]。燃煤电厂烟气中除汞以外, 还含有砷、硒、锑、铅等其他重金属, 越来越多的学者已意识到控制重金属排放的紧迫性, 但对于燃煤电厂烟气重金属测试和控制仍有部分问题亟待解决^[10]。

2.2.2 SO₃ 等可凝结颗粒物

燃煤电厂排放的另一重要污染物是 SO₃, 其毒

性是 SO₂ 的约 10 倍, 是燃煤电厂蓝烟 / 黄烟的罪魁祸首, 极易溶于水形成硫酸雾, 是酸雨形成的主要原因。SO₃ 形成亚微米级的 H₂SO₄ 酸雾, 通过烟囱排入大气, 进而形成二次颗粒硫酸盐, 这也是大气中 PM_{2.5} 的重要来源之一, 会对人的呼吸道产生严重损害。文献调研结果显示, 燃煤电厂 SO₃ 排放浓度大致在 $0.3 \sim 22.7 \text{ mg/m}^3$ ^[1,11], 而电厂烟气中的 SO₃ 是可凝结颗粒物中最主要的组成部分^[12]。近两年, 关于燃煤电厂湿烟羽中的可凝结颗粒物是否对雾霾的产生具有影响还存在争议, 但已有专家提出可凝结颗粒物和雾霾的关联应进一步进行科学论证^[13]。鉴于我国目前还没有出台关于 SO₃ 和可凝结颗粒物的监测方法标准及排放限值, 该领域应得到更多重视。

2.3 燃气发电与超低排放燃煤发电污染物排放对比

本文文献 [1] 中引入了“污染当量评价指标”, 用以计算超低排放燃煤发电和燃气发电单位发电量的污染当量, 并进行比较。这种方法综合考虑了两种火力发电的 3 种常规污染物排放及非常规污染物

Hg 和 SO₃, 有其合理性和可行性。但由于其计算过程中选取参数时存在下述问题: ①对燃机 NO_x 实际排放浓度选用的是江苏 17 台燃机的平均排放浓度 (E 级 30 mg/m³、F 级 42 mg/m³), 并不代表中国燃机的先进水平, 实际情况是深圳燃气发电机组已实现 NO_x 排放浓度低于 15 mg/m³; ②对燃气电厂单位发电量

排放的干烟气量取值为 5.8 m³/(kW·h), 笔者按照 F 级燃机气耗 0.183 m³/(kW·h)、E 级燃机气耗 0.19 m³/(kW·h) 计算, 燃机干烟气量取值应为 5.2 m³/(kW·h)。将上述两个参数调整后, 按照“污染当量评价指标”方法重新计算两种火电污染物排放当量, 结果如表 3 所示。

表 3 基于实际运行下燃气电厂与超低排放燃煤电厂污染物排放当量对比表

项 目	标准干烟气排放量 / [m ³ ·(kW·h) ⁻¹]	常规污染物排放量 / (mg·m ⁻³)			非常规污染物排放量 / (mg·m ⁻³)		单位发电量 (1 kW·h) 污染物排放当量
		烟尘	SO ₂	NO _x	Hg	SO ₃	
超低排放燃煤电厂	2.97	2	16	33	0.001 5	5.44	0.227×10 ⁻³
燃气电厂	E 级	5.2	0.85	2.2	15	0	0.096×10 ⁻³
	F 级	5.2	1.11	0.84	15	0	0.089×10 ⁻³

注: 1) 各类污染物污染当量值取值依据为《排污费征收标准管理方法》, 烟尘取值 2.18 kg, SO₂ 取值 0.95 kg, NO_x 取值 0.95 kg, Hg 取值 0.000 1 kg, SO₃ 取值 0.6 kg。

2) Hg 和 SO₃ 的排放数据来自本文文献 [1]。

可以看到, 基于实际运行数据, 综合考虑常规污染物与非常规污染物, 超低排放燃煤电厂单位发电量污染物排放当量 (0.227×10⁻³) 是 E 级燃气轮机 (0.096×10⁻³) 的 2.4 倍, 是 F 级燃气轮机 (0.089×10⁻³) 的 2.6 倍, 燃气电厂环保优势十分突出。

2.4 污染物治理产生的后遗症问题

燃煤发电会产生大量的粉煤灰, 即煤粉在高温燃烧后, 由烟道气带出并经除尘器收集的粉尘。粉煤灰若不进行妥善处理, 会对周围生态环境造成污染。近年来我国粉煤灰的综合利用得到各方面的广泛重视, 但仍存在一系列问题。如西部地区粉煤灰大量堆积与填埋, 监管制度不完善等^[14]。据《中国电力行业年度发展报告》, 我国每年燃煤电厂粉煤灰产量超过 5×10⁸ t, 2018、2019 年综合利用率分别为 71%、72%。

另外, 我国燃煤电厂烟气脱硫方法以石灰石—石膏湿法脱硫为主^[2], 每年要消耗约 5 000×10⁴ t 石灰石, 而石灰石的开采对生态环境会产生一定的负面影响^[2,15]。此外, 烟气脱硫过程中产生的石膏雨、细颗粒物及脱硝加剧了 SO₃ 的生成及氨逃逸, 这些细颗粒物及可凝结颗粒物易吸附重金属, 不仅是形成灰霾的重要因素, 而且危害公众健康, 是实现后清洁煤电时代亟待解决的关键性难题^[16]。

此外, 由于脱硫系统排放的废水具有悬浮物高、含盐量高、腐蚀性强等特点, 不能将其直接排入电厂的废水处理系统, 必须设置独立的脱硫废水处理

系统, 以达到环保排放标准^[17]。但据了解, 目前我国燃煤电厂中实施脱硫废水处理的比率仍较低。

3 燃气发电与超低排放燃煤发电生态效应对比

3.1 碳排放对比

据《BP 世界能源统计年鉴》, 2019 年我国化石能源燃烧产生的 CO₂ 排放量约 98×10⁸ t, 超过全球总排放量的 1/4^[18], 其中, 电力行业 CO₂ 排放量约占全国总排放量的 40%^[19]。

由表 4 可以看出, 在单位度电 CO₂ 排放水平方面, 燃气电厂约为 411 g/(kW·h), 而燃煤电厂为 798 g/(kW·h), 气电较煤电减排约 50%。其中, 燃气电厂效率提升及燃料转换各自贡献约 50% 的减排水平。从这个角度看, 提升气电比例可有效降低我国火电碳排放水平。

2016 年 10 月, 国务院印发《“十三五”控制温室气体排放工作方案》, 要求到 2020 年, 大型发电集团单位度电 CO₂ 排放控制在 550 g/(kW·h)。根据《中国电力行业年度发展报告》, 2019 年全国单位度电 CO₂ 排放约为 577 g/(kW·h), 而火电厂单位度电 CO₂ 排放量约为 838 g/(kW·h), 降低火电碳排放水平是减少电力行业碳排放的重要手段。鉴于目前碳捕集和封存技术距离大规模商业化仍有距离, 进一步降低发电煤耗的空间不大^[20-21], 最有效地降

表4 燃煤发电与燃气发电 CO₂ 排放量比较表

能源类型	平均低位发热量	单位热值燃料含碳量 / [t · (10 ¹² J) ⁻¹]	碳氧化率	CO ₂ 排放系数	发电煤 / 气耗	单位度电 CO ₂ 排放量
原煤	20 908 kJ/kg	26.37	0.94	1.90	300 g/(kW · h)	798 g/(kW · h)
天然气	38 931 kJ/m ³	15.3	0.99	2.16	0.19 m ³ /(kW · h)	411 g/(kW · h)

注：1) 平均低位发热量来源于《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2008)。

2) 折标准煤系数取 0.7143。

3) 单位热值燃料含碳量和碳氧化率数据来源于《省级温室气体清单编制指南》(发改办气候[2011]1041号)。

4) 原煤 CO₂ 排放系数为 1 kg 原煤排放 1.90 kg CO₂、天然气 CO₂ 排放系数为 1 m³ 天然气排放 2.16 kg CO₂。

低发电行业碳排放强度的途径是优化电源结构，包括提升可再生能源发电比例及气电比例。目前，欧洲的国家如英国、法国、德国、荷兰等均出台了煤电退出时间表，将于 2030 年前退出全部煤电。

3.2 资源消耗对比

火电行业是典型的用水大户，水在火力发电过程中担负着传递能量、冷却及清洁的重要作用，火电用水消耗量约占全国工业用水消耗量的 20%，且有近 1/2 的火电装机建在“过度取水”地区，加剧了部分流域内水资源的供需矛盾。根据中国电力企业联合会的统计结果，全国火电厂每千瓦时发电耗水量约 1.4 kg，每千瓦时发电量废水排放量为 0.07 kg^[22]。燃气发电通过节水及废水零排放改造，可以达到每千瓦时发电耗水量约 1 kg，外排水量为 0^[23]。

此外，根据《火电工程限额设计参考造价指标(2017年)》^[24]，新建一座 9F 级 2×400 MW 等级燃气蒸汽联合循环机组的占地面积约 11 公顷(1 公顷=1×10⁴ m²)，相当于新建一座 2×660 MW 超临界燃煤机组占地面积的 1/4。特别是在我国东部沿海等电力负荷中心，土地资源较为稀缺，新建燃气电厂能够很大程度上节约项目占地、发挥国土价值。

4 结论与建议

4.1 主要结论

1) 燃气发电相对于超低排放燃煤发电具有明显的环保优势。实现超低排放的燃煤电厂其烟尘、SO₂ 排放浓度均显著高于燃气发电；通过实施低氮燃烧改造和加装 SCR 后，燃气电厂 NO_x 排放水平可稳定控制在 15 mg/m³ 以下，较超低排放燃煤电厂有环保优势。若考虑 SO₃ 等可凝结颗粒物的排放、汞等重金属排放、粉煤灰的处置与利用、烟气脱硫过程产生的二次环境问题、脱硫废水排放等问题，气电环保优势更为明显。

2) GB 13223—2011 中燃气发电的排放限值有待进一步完善：①烟尘、SO₂ 的排放限值设定(烟尘为 5 mg/m³、SO₂ 为 35 mg/m³) 远高于燃气发电机组实际排放水平，不能反映气电的实际清洁程度，加上天然气燃料本身的总含硫量与清洁程度决定了燃机排放的烟尘、SO₂ 水平非常低，对燃机的烟尘、SO₂ 设定排放限值没有实际约束意义，反而可能带来环保执法的难度；②对 NO_x 的排放限值(50 mg/m³) 设定未起到减排激励作用，我国燃气发电机组通过实施 SCR 改造可以实现 NO_x 低于 15 mg/m³ 的实际排放，发达国家部分燃机的 NO_x 排放水平甚至达到 5~10 mg/m³，因此，GB 13223—2011 中对燃机的 NO_x 排放限值应进一步降低。

3) 燃气电厂较燃煤电厂 CO₂ 减排效果显著。燃气发电的单位度电 CO₂ 排放可以较超低排放燃煤发电减少 50%，提升气电比例可有效降低我国火电行业碳排放量。燃气发电较之燃煤发电可显著节约水资源与土地资源。

4.2 相关建议

1) 继续加大环保政策力度，鼓励燃气电厂建设：①进一步扩大煤炭消费减量控制的区域范围和力度，尽可能以可再生能源发电和燃气发电满足增量电力装机需求；②取消《打赢蓝天保卫战三年行动计划》中对新建燃气热电联产的限制，应积极鼓励燃气热电联产项目的建设；③完善火电厂大气污染物排放控制体系，研究将 SO₃、部分重金属等非常规污染物纳入污染物排放控制范围。

2) 进一步严格燃气发电机组的常规污染物排放标准。NO_x 作为 PM_{2.5} 等主要污染物的前体物，进一步控制 NO_x 排放对于持续改善城市环境质量具有重要意义。建议参照北京、深圳地区对燃气轮机的 NO_x 排放标准，修订 GB 13223—2011，将全国范围内燃气轮机 NO_x 的排放限值设定为 15 mg/m³。同时，考虑燃机实际排放水平很低(几乎没有)，建议取消对燃机烟尘、SO₂ 的排放限值，一方面避免不必要的

监控和执法成本,另一方面消除超低排放达到燃机排放水平的错觉。

3) 发挥碳市场对电力行业低碳转型的作用。加快构建和完善全国碳市场,并设定“地板价”,通过碳价机制形成气候友好的公平竞争市场环境,引导电力企业加快向低碳电力结构转型的步伐。

参 考 文 献

- [1] 徐静馨,朱法华,王圣,等. 超低排放燃煤电厂和燃气电厂综合对比[J]. 中国电力, 2020, 53(2): 164-172.
XU Jingxin, ZHU Fahua, WANG Sheng, et al. Comprehensive comparison of ultra-low emission coal-fired power plants and gas-fired power plants[J]. Electric Power, 2020, 53(2): 164-172.
- [2] 酆建国,朱法华,孙雪丽. 中国火电大气污染防治现状及挑战[J]. 中国电力, 2018, 51(6): 1-10.
LI Jianguo, ZHU Fahua, SUN Xueli. Current status and challenges of atmospheric pollution prevention and control of thermal power plants in China[J]. Electric Power, 2018, 51(6): 1-10.
- [3] 刘志坦,舒喜,杨爱勇,等. 固定式燃气轮机大气污染物排放标准限值的选择[J/OL]. (2020-04-02)[2020-06-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20200402.0924.008.html>.
LIU Zhitan, SHU Xi, YANG Aiyong, et al. Selection of limit values of emission standard for air pollutants from stationary gas[J/OL]. (2020-04-02)[2020-06-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20200402.0924.008.html>.
- [4] 刘志坦,王文飞. 我国燃气发电发展现状及趋势[J]. 国际石油经济, 2018, 26(12): 43-50.
LIU Zhitan, WANG Wenfei. Current status and development trend of gas power generation in China[J]. International Petroleum Economics, 2018, 26(12): 43-50.
- [5] THIERRY L, FELIX F D L F J, FREDERIK N, et al. Best available techniques (BAT) reference document for large combustion plants: Industrial emissions directive 2010/75/EU (Integrated pollution prevention and control)[R]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017.
- [6] 刘志坦,王凯,李玉刚. 基于环保标准趋严的燃气电厂脱硝方案研究[J]. 电力科技与环保, 2017, 33(6): 18-21.
LIU Zhitan, WANG Kai, LI Yugang. Study on denitration scheme of gas power plant based on environmental protection standard[J]. Electric Power Environmental Protection, 2017, 33(6): 18-21.
- [7] UNEP Chemicals Branch. The global atmospheric mercury assessment: Sources, emissions and transport[R]. Nairobi: UNEP, 2008.
- [8] 司徒高华,王飞儿,何云峰,等. 燃煤电厂周边土壤中汞的分布和累积研究进展[J]. 土壤, 2016, 48(3): 419-428.
SITU Gaohua, WANG Fei'er, HE Yunfeng, et al. Distribution and accumulation of Hg in soils around coal-fired power plants: A review[J]. Soils, 2016, 48(3): 419-428.
- [9] 严启团,张世坚,蒋洪,等. 三甘醇脱水装置汞分布及汞污染控制措施[J]. 石油与天然气化工, 2018, 47(1): 13-19.
YAN Qituan, ZHANG Shijian, JIANG Hong, et al. Mercury distribution in the TEG dehydration unit and mercury pollution control measures[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2018, 47(1): 13-19.
- [10] 易秋,薛志钢,宋凯,等. 燃煤电厂烟气重金属排放与控制研究[J]. 环境与可持续发展, 2015, 40(5): 118-123.
YI Qiu, XUE Zhigang, SONG Kai, et al. The research of heavy metal emission and control in flue gas from coal-fired power plants[J]. Environment and Sustainable Development, 2015, 40(5): 118-123.
- [11] 刘含笑,姚宇平,酆建国,等. 燃煤电厂烟气中SO₃生成、治理及测试技术研究[J]. 中国电力, 2015, 48(9): 152-156.
LIU Hanxiao, YAO Yuping, LI Jianguo, et al. Study on SO₃ generation, control and testing technology for coal-fired power plants[J]. Electric Power, 2015, 48(9): 152-156.
- [12] 朱法华,李军状. 我国燃煤电厂SO₃和可凝结颗粒物控制存在问题与建议[J]. 环境影响评价, 2019, 41(3): 1-5.
ZHU Fahua, LI Junzhuang. Questions and suggestions on the control of SO₃ and condensable particulate matter from coal-fired power plants in China[J]. Environmental Impact Assessment, 2019, 41(3): 1-5.
- [13] 何平. 肺炎疫情下,北方地区雾霾仍然严重,缘何?[EB/OL]. (2020-02-08)[2020-06-02]. https://www.sohu.com/a/371525768_100001695.
HE Ping. Under the COVID-19, why does the haze in the northern region is still serious?[EB/OL]. (2020-02-08)[2020-06-02]. https://www.sohu.com/a/371525768_100001695.
- [14] 杨星,呼文奎,贾飞云,等. 粉煤灰的综合利用技术研究进展[J]. 能源与环境, 2018(4): 55-57.
YANG Xing, HU Wenkui, JIA Feiyun, et al. Research progress of comprehensive utilization of fly ash[J]. Energy and Environment, 2018(4): 55-57.
- [15] 贺军令. 石灰石矿山开采中生态环境问题探究[J/OL]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2016(10): 00321-00322[2020-06-02]. <http://www.cqvip.com/QK/72150X/201610/epub1000000515707.html>.
HE Junling. Study on ecological environment in limestone mining[J/OL]. Chinese Sci Tech Periodical Database (full text edition): Engineering Technology, 2016(10): 00321-00322[2020-06-02]. <http://www.cqvip.com/QK/72150X/201610/epub1000000515707.html>.
- [16] 王圣. 我国“十四五”煤电发展趋势及环保重点分析[J]. 环境保护, 2020, 48(3): 61-64.
WANG Sheng. Analysis on development trend of coal power and key points of environmental protection in China's 14th Five-Year Plan[J]. Environmental Protection, 2020, 48(3): 61-64.
- [17] 孙少鹏,朱文中,蒋文,等. 燃煤火力发电厂脱硫废水处理技术的研究[J]. 化工管理, 2015(24): 205-206.
SUN Shaopeng, ZHU Wenzhong, JIANG Wen, et al. Research on desulphurization wastewater treatment technology in coal-fired power plant[J]. Chemical Enterprise Management, 2015(24): 205-206.
- [18] BP. BP statistical review of world energy 2020[R]. London: BP,

- 2020.
- [19] 王志轩, 潘荔, 刘志强, 等. 中国煤电清洁发展现状及展望 [J]. 电力科技与环保, 2018, 34(1): 1-8.
WANG Zhixuan, PAN Li, LIU Zhiqiang, et al. Review of present situation and prospect for clean development of coal-fired power in China[J]. Electric Power Environmental Protection, 2018, 34(1): 1-8.
- [20] 王妍婷. 电力行业绿色低碳发展成就凸显: 火电供电煤耗下降空间不大小机组主要用来调峰 (2)[N]. 中国电力报, 2016-06-12.
WANG Yanting. The green and low-carbon development achievements of the power industry are prominent: coal consumption of thermal power supply has little room for decline, and small units are mainly used for peak adjustment[N]. China Electric Power News, 2016-06-12.
- [21] 李璐伶, 赵金洲, 李海涛, 等. 水合物法捕集烟气中 CO₂ 的新拟合热力学模型 [J]. 天然气工业, 2019, 39(4): 104-110.
LI Luling, ZHAO Jinzhou, LI Haitao, et al. A newly fitted thermodynamic model for the capture of CO₂ from flue gas by the hydrate method[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(4): 104-110.
- [22] 潘荔, 刘志强, 张博. 中国火电节水现状分析及措施建议 [J]. 中国电力, 2017, 50(11): 158-163.
PAN Li, LIU Zhiqiang, ZHANG Bo. Comprehensive analysis and related measures on current situation of water saving of thermal power generation in China[J]. Electric Power, 2017, 50(11): 158-163.
- [23] 张志国, 胡大龙, 王璟, 等. 燃气电厂深度节水及废水零排放方案 [J]. 中国电力, 2017, 50(7): 127-132.
ZHANG Zhiguo, HU Dalong, WANG Jing, et al. The in-depth water conservation and zero discharge technology for gas turbine power plants[J]. Electric Power, 2017, 50(7): 127-132.
- [24] 电力规划设计总院. 火电工程限额设计参考造价指标——2017 年水平 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
Electric Power Planning & Engineering Institute. Reference cost index for quota design of thermal power project (2017 level)[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2018.
- (修改回稿日期 2020-07-02 编辑 罗冬梅)

低渗透煤层煤层气增产技术瓶颈被打破

2020 年 6 月 30 日, 山西蓝焰煤层气集团有限责任公司牵头承担的山西省科技重大专项“低渗透煤层煤层气分段压裂水平井增产技术研究”项目, 完成研究计划任务, 正式通过专家组结题评审。

我国煤矿区松软低渗透煤层比例高达 82%, 该类煤层具有煤体破碎、渗透率低、含气量高等特点, 煤炭生产过程中抽掘采在时间和空间上的匹配问题非常突出。山西省的科研团队通过借鉴页岩气水平井开发的成功经验, 提出在煤层顶板钻水平井, 并对水平井进行向下定向射孔和分段压裂开发碎软煤层煤层气的新思路。经过 3 年多的技术攻关, 成功建立了松软低渗透煤层水平井水平段层位优选评价技术方法, 形成了适用于沿煤层顶板钻进的水平井定向射孔技术和松软低渗透煤层水平井分段压裂新工艺, 基本掌握了适用于该省典型地质条件下松软低渗透煤层的水平井开发技术, 有效地破解了松软低渗透煤层水平井究竟在哪个层位钻进既能成孔完井、又能压开地层保证压裂裂缝向下延伸到煤层的技术难题, 为松软低渗透煤层煤矿区水平井优化部署提供了依据; 解决了松软低渗透煤层顶板水平井与煤层如何沟通以及怎样实现的问题, 保证射孔弹穿透套管和岩层沟通煤层, 为后期的压裂改造裂缝向煤层延伸创造了条件; 解决了松软低渗透煤层水平井如何进行分段压裂施工的问题, 为松软低渗透煤层分段压裂水平井规模化推广应用提供了技术支持。上述技术突破, 实现了松软低渗透煤层煤矿区煤层气资源高效抽采、缓解煤矿煤炭生产与煤层气抽采矛盾、减少煤矿煤层气排放量, 具有资源、安全、环保等综合效益。

(天工 摘编自《山西日报》)