文章编号:1673-2677(2026)01-0107-07 DOI:10.12388/j.issn.1673-2677.2026.01.012
引用:李运龙,刘燚,顾佳卫,等.以气电为支撑的新疆沙戈荒新能源大基地技术经济性分析[J].新疆石油天然气,2026,22(1):107-113.
Cite:LI Yunlong,LIU Yi,GU Jiawei,et al. Techno-economic analysis of desert-gobi-wasteland large scale new energy base in Xinjiang with gas-fired power support [J]. Xinjiang Oil & Gas,2026,22(1):107-113.

以气电为支撑的新疆沙戈荒新能源大基地技术经济性分析

李运龙[1],刘燚[1],顾佳卫[1],马明伟[2],程龙[1]
(1.中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司,陕西西安 710065;2.中国石油新疆油田分公司采油工艺研究院,新疆克拉玛依 834000)

摘 要:在"双碳"战略目标背景下,气电凭借其高效、灵活和清洁的特性成为构建新型电力系统的重要支撑电源。通过聚焦新疆沙戈荒地区新能源大基地建设需求,基于新疆天然气资源禀赋,从技术经济维度系统剖析了气电相较于煤电的灵活调节特性。设计典型沙戈荒新能源大基地运行场景,测算了不同电源组合下绿电占比与碳排放强度;量化了气电的经济性指标及环境效益;论证了气电作为沙戈荒新能源大基地较优支撑电源的可行性。研究结果表明,在基地中配置气电相较于煤电能显著提升绿电占比约14%,碳排放强度下降约75%。研究证实了气电在提升基地新能源消纳能力、保障系统安全运行、提高外送清洁电量占比等方面具有显著优势。研究成果可为沙戈荒清洁能源基地建设提供兼具经济性与生态价值的参考方案。

关键词:气电;沙戈荒地区;新能源大基地;"双碳"目标;清洁能源
中图分类号:TE09 **文献标识码**:A

Techno-Economic Analysis of Desert-Gobi-Wasteland Large Scale New Energy Base in Xinjiang with Gas-Fired Power Support

LI Yunlong[1],LIU Yi[1],GU Jiawei[1],MA Mingwei[2],CHENG Long[1]
(1.Northwest Engineering Co.,Ltd.,PowerChina,Xi′an 710065,Shaanxi,China;2.Production Technology Research Institute,PetroChina Xinjiang Oilfield Company,Karamay 834000,Xinjiang,China)

Abstract: Under the "dual carbon" goals, gas-fired power, with its high efficiency, flexibility and cleanness, has become a crucial backbone power source for building a new-type power system. Focusing on the construction needs of large scale new energy bases in desert-gobi-wasteland regions of Xinjiang, this research considers the natural gas abundance of Xinjiang and systematically analyzes the regulation flexibility of gas-fired power, compared to coal-fired power, from a techno-economic perspective. Typical operational scenarios for desert-gobi-wasteland large scale new energy bases are designed, and shares of green electricity and carbon emission intensity are calculated in cases of different power source configurations. Moreover, this research quantifies the economic indicators and environmental benefits of gas-fired power and demonstrates the feasibility of gas-fired power as a superior backbone power source for such bases. The results show that introducing gas power into the base can significantly increase shares of green electricity by approxi-

基金项目:国家自然科学基金资助项目"流域水风光多能互补长-短期调度的互馈机制及跨尺度协同研究"(52379023)。
第一作者:李运龙(1993-),2018年毕业于武汉大学水文水资源专业,硕士,工程师,目前从事水电和新能源发电设计工作。(E-mail)liyunlong624@163.com
通讯作者:刘燚(2000-),2024年毕业于华中科技大学水利水电工程专业,硕士,工程师,目前从事水电和新能源发电设计工作。(E-mail)1136782819@qq.com

mately 14% and reduce carbon emission intensity by about 75%, compared to the case of coal power. It is confirmed that gas-fired power offers notable advantages in enhancing new energy integration of the base, ensuring system security, and increasing proportions of clean electricity for transmission. The findings of this research provide a reference case balancing economic viability with ecological value for solutions to constructing clean energy bases in desert-gobi-wasteland regions.

Key words: gas-fired power; desert-gobi-wasteland region; large scale new energy base; "dual carbon" goals; clean energy

在全球气候治理框架下实现“碳达峰、碳中和”已成为各国能源结构调整的核心目标[1-3]。作为全球最大碳排放国家，中国明确提出“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，2060年前实现碳中和”的战略目标。在此背景下，能源系统亟需从以传统化石能源为主导转向以新能源为主体[4-6]。从资源禀赋和开发潜力来看，我国西北地区因风光资源富集且未利用土地（沙漠、戈壁、荒漠等）资源条件优越成为新能源规模化开发的首选区域[7-10]。新疆作为国家“十四五”规划中明确的大型清洁能源基地，承担着“西电东送”与“绿电外送”的战略任务[11]。

气电具备分钟级启停速度与宽负荷调节能力，0%~100%负荷响应时间小于30 min，是平抑新能源波动性、提升电网灵活性的关键支撑技术[12-14]；同时，气电的低碳属性与生态协同效应也契合沙戈荒基地“生态修复+能源开发”的双赢目标[15]。新疆作为我国陆上天然气资源最富集区域，依托新疆油田、塔里木油田、吐哈油田等主力气田开发，已形成“气电+新能源”融合发展的产业基础[16]。2023年2月，国家能源局发布的《加快油气勘探开发与新能源融合发展行动方案（2023—2025年）》（国能发油气〔2023〕21号）进一步明确，需在油气资源区构建“多能互补”体系，推动气电与风光储协同开发。这为沙戈荒基地探索“生态修复-能源开发-绿电外送”一体化模式提供了政策依据。

近年来，气电在多元电源协同运行中的关键作用逐渐成为学界的研究热点。梁严等[17]从调峰方式、经济性方面对比分析了以气电为主的综合能源基地和传统行业用气的特性差异，发现综合能源基地对储气与调峰的能力要求更高。周淑慧等[18]研究分析了天然气在中国新型能源体系中的地位和作用，结合新型电力系统、工业燃料、城市燃气、交通、化工等领域阐述了天然气服务于民生、经济发展、国家战略等方面的重要功能。陈彬等[19]以柴达木沙漠区域高比例新能源基地为例，分析了不同气电装机规模对基地送电量和电价变化的影响，验证了“风光气储一体化”模式在沙漠戈壁地区的经济可行性。上述研究表明，气电正从单一调峰电源向多能互补系统的核心枢纽转型，其技术经济特性与新型电力系统源荷互动需求形成深度适配。

现有研究多聚焦于气电调峰或储能技术对新能源消纳的作用，鲜有研究分析气电在沙戈荒新能源大基地中的支撑作用。在天然气富集地区构建以气电为支撑的新能源大基地，既可缓解当地煤源紧缺导致的调峰能力不足问题，又能通过低碳转型路径实现从“高碳”到“零碳”的平稳过渡，有助于提升新型电力系统的安全性与经济性，还可为同类地区提供可复制的实践经验。为此，本文以新疆沙戈荒基地为研究对象，基于气电运行特性与资源适配性分析，以某沙戈荒新能源大基地为典型案例，研究气电在新能源大基地中的支撑作用，量化气电在调峰补偿、经济性及环境效益等方面的综合价值。研究成果可为我国沙戈荒基地规划与新型电力系统构建提供理论支撑，同时为全球类似地区能源转型提供中国方案。

1 新疆天然气资源优势

1.1 天然气资源概况

新疆天然气资源储量丰富，品种多样，主要包括煤层气、页岩气、常规天然气等。这些资源分布广泛、储量大、品质优良，为新疆天然气产业的发展提供了坚实的基础[20]。截至2024年，区域天然气预测资源量超过10×10^{12} m^3，累计探明天然气地质储量2.81×10^{12} m^3，占全国陆上资源量的34%，天然气资源主要分布在塔里木、准噶尔、吐哈等盆地。塔里木盆地作为国家西气东输主气源地，其中的塔里木油田探明天然气地质储量已超2×10^{12} m^3，并形成库车-塔北、巴楚-塔西南等多个富集区[21]；位于准噶尔盆地的新疆油田探明天然气地质储量$1\ 935\times10^{8}$ m^3，占全区6.8%；位于吐哈盆地的吐哈油田探明天然气地质储量$1\ 176\times10^{8}$ m^3，占全区4.2%。新疆主要油田天然气资源探明情况详见表1。2024年，新疆地区生产天然气374.2×10^{8} m^3。

表1 新疆主要油田天然气资源探明情况

Tab. 1 Proven natural gas resources of main oil fields in Xinjiang

油田	探明地质储量/10^8 m^3	探明率/%
塔里木油田	25 000	42.2
吐哈油田	1 176	39.1
新疆油田	1 935	16.1
合计	28 111	37.9

1.2 天然气储运设施现状

新疆作为国家陆上能源通道核心枢纽,已构建横跨东西、覆盖全域的油气管网系统,形成了“国家级干线+区域环网”的立体拓扑结构。国家级干线以西气东输工程为主体,涵盖一线(输气能力170×10^8 m^3/a)、二线(输气能力300×10^8 m^3/a)、三线西段(输气能力300×10^8 m^3/a)及四线吐鲁番-中卫段(输气能力150×10^8 m^3/a,远期扩容至300×10^8 m^3/a)四大管道,总里程达5 496 km,采用Φ1 219/1 016 mm管径与12/10 MPa高压输气技术,实现与中东部市场的直接联通。

新疆地区天然气区域管网已覆盖塔里木、准噶尔、吐哈三大盆地及南北疆12个地州市,输配气管线总长7 698 km,输配能力624×10^8 m^3/a,支撑“气化全疆”战略落地。2023年投运的“气化南疆”管道(510 km)进一步填补了南疆五地州管网空白,将燃气电厂供气稳定性提升至99.6%,并预留10%掺氢改造空间,为气电与绿氢协同奠定基础。全疆天然气骨干管网总里程突破1.2×10^4 km,年输气能力超800×10^8 m^3,形成了资源开发、电力调峰与生态修复协同推进的硬件保障体系。新疆地区天然气区域管网情况见表2。

表2 新疆地区天然气区域管网情况

Tab. 2 Regional natural gas pipeline networks in Xinjiang

区域管网	管线长度/km	天然气输配能力/(10^8 m^3·a^{-1})	2024年天然气输配气量/10^8 m^3
塔里木盆地	4 539	434	308
吐哈盆地	1 092	10	3
准噶尔盆地	2 067	180	91
合计	7 698	624	402

2 气电运行特性及技术优势

2.1 气电运行特性

气电,凭借其独特的运行特性与环保优势,已在新型电力系统中展现出多维价值。从系统稳定性来看,气电机组具备0%~100%的宽负荷调节能力,冷态启动至满负荷仅需不足0.5 h,负荷调节速率高达50 MW/min,能够实现分钟级响应电网波动。从环保性来看,基于全寿命周期评价,煤电机组的度电碳排放量高达838 g/(kW·h),而气电的度电碳排放量约为345 g/(kW·h),比煤电低约60%,且气电颗粒物排放浓度小于5 mg/m^3无需配套脱硫脱硝设施[22]。

气电出力不受天气、光照等自然条件限制,兼具基础负荷电源的可靠性与调峰电源的灵活性。其既能为电力系统提供持续电力保障,又能在负荷高峰时段快速提升出力。此外,在电力系统故障或紧急情况下,气电可以作为备用电源为电力系统提供紧急电力供应,显著增强电网韧性。综上所述,气电是构建“稳定基荷-灵活调峰-应急备用”多维功能体系的核心支撑电源。

2.2 气电与煤电特性对比

在沙戈荒新能源大基地的支撑电源选择中,煤电和气电是两种主要选项。对同等规模气电与煤电的技术特性指标进行对比分析,具体对比结果见表3。同等装机容量100×10^4 kW条件下,气电的碳排放104×10^4 t/a,较煤电低276×10^4 t/a;单位千瓦投资较煤电低12.5%。此外,气电的调峰深度为10%~100%;调节速率方面,从零负荷到满负荷仅需不足0.5 h;且耗水量仅为煤电的8.8%。可以看出,在调峰性能方面气电具有显著优势。

表3 气电、煤电技术指标对比

Tab. 3 Technical indicators: gas-fired power vs. coal-fired power

项目	气电	煤电
装机容量/10^4 kW	100	100
单位千瓦投资/(元·kW^{-1})	3 500	4 000
年发电量/(10^8 kW·h)	25	46
碳排放/(10^4 t·a^{-1})	104	380
调峰深度/%	0~100	70(一般情况)
调节速率对比情况	快,从零负荷到满负荷0.5 h内	慢,从零负荷到满负荷2 h左右
耗水量/10^4 m^3	11	125

相较于同等规模的煤电,气电在碳排放、调峰深度、调节速率及耗水量等方面均表现出更强的竞争力。同时,结合国家在油气勘探开发与新能源融合发展方面的政策导向,在新疆天然气资源丰富的地区,可以充分利用当地气田的资源优势规划建设以气电作为支撑电源的沙戈荒新能源大基地,具有重要的现

实意义和发展潜力。

2.3 燃气发电模型

气电机组耗气量计算方法见公式(1)。

$$F_{i,t}=\frac{3\,600E_{i,t}}{\eta_{i,t}q} \tag{1}$$

式中：$F_{i,t}$为t时段第i台发电机的天然气耗量，m^3/h；$E_{i,t}$为t时段第i台发电机的电能量，kW·h；$\eta_{i,t}$为t时段第i台发电机的效率，无量纲；q为天然气热值，kJ/m^3。

气电机组电能量计算方法见公式(2)。

$$E_{i,t}=P_{i,t}\Delta t \tag{2}$$

式中：$P_{i,t}$为t时段第i台发电机机组发电功率，kW；Δt为发电时长，h。

气电机组效率计算方法见公式(3)。

$$\eta_{i,t}=a_i+b_iP'_{i,t}+c_i(P'_{i,t})^2+d_i(P'_{i,t})^3 \tag{3}$$

式中：a_i、b_i、c_i、d_i为效率系数，无量纲；$P'_{i,t}$为t时段第i台发电机机组功率标幺值，无量纲。

3 案例分析

3.1 沙戈荒新能源大基地电源配置情况

以新疆某沙戈荒新能源大基地为典型案例，通过新建一回±800 kV、800×10⁴ kW容量的特高压柔性直流输电通道，将电力输送至供需不平衡的负荷地区。根据各电源出力特性数据，利用8 760 h电力生产模拟进行电源配置方案模拟优化，得到代表方案电源配置结果。基地电源配置方案见表4。

基于电力生产模拟优化结果，基地配套建设电源规模包括：风光1 650×10⁴ kW、气电300×10⁴ kW、其他储能电源(抽水蓄能、光热和化学储能)310×10⁴ kW，电源总装机规模2 260×10⁴ kW。模拟结果表明，该基地年送电量为363.09×10⁸ kW·h，通道利用小时数4 539 h，其中新能源装机占比73.9%，绿电占比82.4%，新能源利用率达90.05%。

表4 基地电源配置方案

Tab. 4 Power supply configuration of the base

分类	项目	指标
电源规模	风光/10⁴ kW	1 650
	气电一回/10⁴ kW	300
	其他储能电源(抽水蓄能、光热、化学储能)/10⁴ kW	310
指标	弃电率/%	9.95
	绿电占比/%	82.4
通道	通道送电量/(10⁸ kW·h)	363.09
	通道利用小时数/h	4 539

3.2 气电典型运行特性分析

基于电源配置方案，研究选取气电规模300×10⁴ kW，燃气机组采用SGT5-4000F(4+)燃气蒸汽联合循环机组，共配置7台联合循环机组，单台出力437 MW级。以±800 kV、800×10⁴ kW特高压直流通道电源方案为例，分别选取新能源连续大发、中发和小发时段的典型日，分析气电在基地各类电源运行中的作用。

3.2.1 新能源大发时段

以8月31日新能源大发典型日为例，分析气电运行情况，新能源大发典型日电源出力曲线如图1所示。该日新能源发电量较高，抽水蓄能可储能量充足。午间11:00至18:00时段主要由光伏提供出力，夜间和凌晨主要由风电提供出力，新能源出力不足时主要由抽水蓄能发电满足负荷需求。以晚间20:00为例，系统负荷为480×10⁴ kW，其中风电出力60×10⁴ kW，光伏出力85.42×10⁴ kW，光热出力4×10⁴ kW，电化学储能发电出力3.63×10⁴ kW，抽水蓄能发电出力240×10⁴ kW，气电出力86.95×10⁴ kW，气电仅承担1 h调峰任务，出力较小。

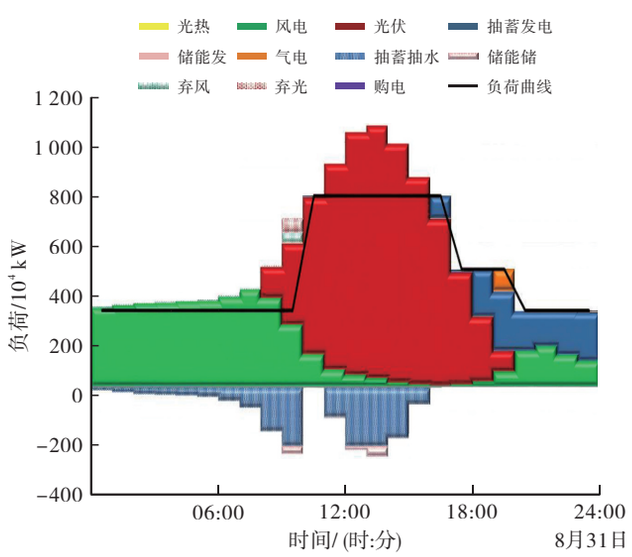


图1 新能源大发典型日电源出力曲线

Fig. 1 Typical daily power output curve for high new energy generation

3.2.2 新能源中发时段

以5月5日新能源中发典型日为例，分析气电运行情况，新能源中发典型日电源出力曲线如图2所示。午间光伏出力较大，抽水蓄能在12:00至18:00时段利用弃电储能，但由于抽水蓄能功率有限，超出其最大储能能力的电力将被舍弃。在晚间和凌晨新能源出力不足时，气电承担调峰任务，根据负荷需求动态调整出力。以晚高峰时段20:00为例，系统负荷为450×10⁴ kW，其中光伏出力136.04×10⁴ kW，光热出力4×10⁴ kW，电化学储能发电出力9.75×10⁴ kW，抽水

蓄能发电出力240×10⁴ kW,气电出力60.21×10⁴ kW。此时电力缺口由抽水蓄能和气电共同调节满足,气电主要承担调峰运行任务。

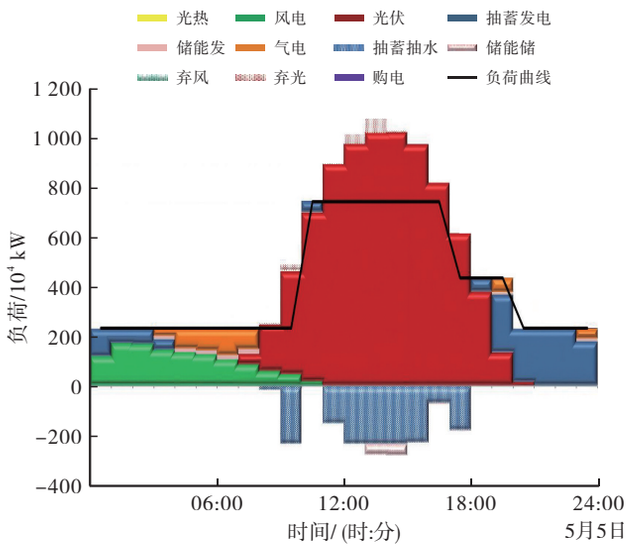


图2　新能源中发典型日电源出力曲线

Fig. 2 Typical daily power output curve for medium new energy generation

3.2.3　新能源小发时段

以1月17日新能源小发典型日为例,分析气电运行情况,新能源小发典型日电源出力曲线如图3所示。该日新能源出力较低,午间可供抽水蓄能储存的能量较少。在凌晨和晚间新能源出力不足时,气电作为主要支撑电源满足通道外送电力需求。在某些极端情况下,抽水蓄能全时段无可储存能量,此时在确保通道安全稳定运行和电源侧装机规模的前提下,通过降低送电曲线的方式满足外送需求。以凌晨5:00为例,

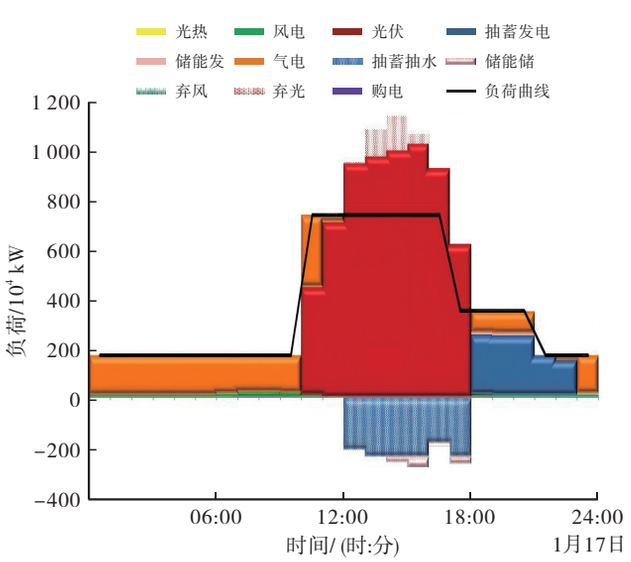


图3　新能源小发典型日电源出力曲线

Fig. 3 Typical daily power output curve for low new energy generation

系统负荷为170×10⁴ kW,其中风电出力8×10⁴ kW,光热出力4×10⁴ kW,电化学储能发电出力1.12×10⁴ kW,气电出力156.88×10⁴ kW。此时负荷需求主要由气电满足,气电的主要作用是顶峰保供。

综上所述,在新能源大基地中,气电作为主要支撑电源能够根据系统实际波动实时调整出力。在负荷高峰时段,气电与其他电源协同支撑顶峰需求;在负荷低谷时段,气电随负荷降低减少出力;在新能源出力不足时段,气电提供必要电力支撑,确保系统稳定运行。

3.3　经济效益及环境效益对比

为进一步评估气电在新能源大基地中的经济性,拟定基地配套煤电264×10⁴ kW作为支撑电源,与气电方案进行对比分析。在保持配套其他储能电源310×10⁴ kW不变的基础上,以满足通道利用小时数与新能源利用率基本一致为前提,配置相应的新能源规模,开展电力生产模拟及经济性分析。

考虑到新能源大基地的绿电属性和未来碳排放限制,计算了各方案的碳排放量,并基于120元/t的碳排放费用计算落地电价。同时,综合考虑基地建设全生命周期,在相同收益条件下对各方案的投入成本进行比较,计算了各方案的费用现值。电源配置方案比较结果见表5。

研究结果表明,气电方案的绿电占比超过煤电方案14.05%,且碳排放量显著低于煤电方案,后者碳排放量是前者的3.98倍。考虑碳排放费用后,气电方案的落地电价较低,煤电方案相较于气电高约1.12%。此外,气电方案的费用现值低于煤电方案。从碳排放和经济性综合评估来看,气电方案在环境效益和经济效益方面均明显优于煤电方案。

4　结论

在“双碳”战略目标背景下,气电凭借其启停迅速、宽负荷调节能力强及低碳排放等优势在新疆沙戈荒新能源大基地中承担了调峰、电力支撑及协同运行等多重功能。本文以新疆某新能源大基地为典型案例,分析了不同新能源典型日下气电的功能作用及其与其他电源的协同运行模型,并从经济性和环境效益角度与煤电方案进行了对比,系统研究了气电在沙戈荒新能源大基地中的作用。研究成果为沙戈荒新能源大基地的规划开发提供了理论支撑,同时拓展了油气勘探开发与新能源融合发展的新路径。

1)新疆地区风光资源富集,天然气储量充足。在沙戈荒新能源大基地中配置一定规模气电作为支撑

表5 气电与煤电电源配置方案比较

Tab. 5 Power supply configuration options: gas-fired power vs. coal-fired power

分类	项目	气电方案	煤电方案
电源规模	风光/10^4 kW	1 650	1 300
	气电或煤电/10^4 kW	300	264
	其他储能(抽蓄、光热、化学储能)/10^4 kW	310	310
指标	弃电率/%	9.95	10.48
	绿电占比/%	82.4	68.35
通道	通道送电量/10^8 kW·h	363.09	361.35
	通道利用小时数/h	4 539	4 517
经济性	通道碳排放量/10^4 t	270	1 074
	碳排放费用/[元·(kW·h)$^{-1}$]	0.009 0	0.035 6
	落地电价/[元·(kW·h)$^{-1}$]	0.438 4	0.443 3
	费用现值/10^8元	1367	1467

和调峰电源,不仅能够保障高比例新能源外送通道稳定运行,还为油气资源的高效利用提供了绿色转型路径。

2)在沙戈荒新能源大基地中,气电是调峰保障的重要支撑者。其能够根据负荷需求变化实时调整出力,与风电、光伏、储能等其他电源协同运行,为外送通道提供稳定的电力支撑。同时,气电的深度调峰能力显著提高了新能源利用率,有效缓解了新能源波动性对系统稳定性的影响。

3)与煤电方案相比,气电在沙戈荒新能源大基地中显著提升了绿电占比,并大幅降低了碳排放。考虑碳排放成本后,气电方案的落地电价及费用现值均低于煤电方案,在经济性方面具备显著竞争力。因此,气电不仅是实现低碳转型的重要推动者,也是沙戈荒新能源大基地经济性优化的关键选择。

参考文献

[1]李俊彪."双碳"目标下建设新型能源体系的思考与建议[J].煤炭经济研究,2023,43(9):54-61.
LI Junbiao. Relevant thoughts and suggestions on building a new energy system under the goal of "carbon peak and carbon neutrality"[J]. Coal Economic Research,2023,43(9):54-61.

[2]侯梅芳.碳中和目标下中国能源转型和能源安全的现状、挑战与对策[J].西南石油大学学报(自然科学版),2023,45(2):1-10.
HOU Meifang. Current situation, challenges and countermeasures of China's energy transformation and energy security under the goal of carbon neutrality[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition),2023,45(2):1-10.

[3]肖建忠,魏思宇.天然气在中国能源转型中的桥接作用——基于UCRCD模型的研究[J].煤炭经济研究,2024,44(1):122-128.
XIAO Jianzhong, WEI Siyu. The bridging role of natural gas in China's energy transition: a study based on UCRCD model[J]. Coal Economic Research,2024,44(1):122-128.

[4]柴麒敏,刘伯翰,马玉洁,等.能源转型与技术创新的全球盘点:进展与评估[J].气候变化研究进展,2024,20(6):747-756.
CHAI Qimin, LIU Bohan, MA Yujie, et al. Global stocktake of energy transition and technological innovation: progress and assessment [J]. Climate Change Research, 2024, 20 (6): 747-756.

[5]刘燕华,王文涛.全球气候治理新形势与我国绿色发展战略[J].可持续发展经济导刊,2019,(S1):16-21.
LIU Yanhua, WANG Wentao. The new situation of global climate governance and China's green development strategy[J]. China Sustainability Tribune,2019,(S1):16-21.

[6]付兆辉,苗苑,李敏.新型能源体系建设背景下能源安全保障与转型发展研究[J].煤炭经济研究,2025,45(2):116-121.
FU Zhaohui, MIAO Yuan, LI Min. Research on energy security guarantee and transitional development under the background of building a new energy system[J]. Coal Economic Research,2025,45(2):116-121.

[7]孙景博,王阳,杨晓帆,等.中国风光资源气候风险时空变化特征分析[J].中国电力,2023,56(5):1-10.
SUN Jingbo, WANG Yang, YANG Xiaofan, et al. Analysis of spatial and temporal variation character of climate risks of wind and solar resources in China[J]. Electric Power, 2023, 56(5):1-10.

[8]潘荔,梁志宏,刘志强,等. 我国西北地区风电、光伏发电发展形势分析[J]. 中国能源,2022,44(10):56-62.
PAN Li, LIANG Zhihong, LIU Zhiqiang, et al. Analysis of wind and solar PV power development situation in northwest China[J]. Energy of China,2022,44(10):56-62.

[9]刘斌,张玉琼,麻林巍,等. 西北地区源端基地综合能源系统的技术方案设计及优化研究[J]. 中国电机工程学报,2021,41(2):568-581.
LIU Bin,ZHANG Yuqiong,MA Linwei,et al. Design and optimization of technical schemes of supply-side base integrated energy systems in Northwest China [J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(2):568-581.

[10]孙沛,汪莹,李雨田,等. 西北电网风光波动量最小最佳配比研究[J]. 太阳能学报,2025,46(2):235-244.
SUN Pei, WANG Ying, LI Yutian, et al. Research on minimum optimal ratio of wind and photovoltaic fluctuations in Northwest Power Grid [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025,46(2):235-244.

[11]邓铭江,明波,李研,等. "双碳"目标下新疆能源系统绿色转型路径[J]. 自然资源学报,2022,37(5):1107-1122.
DENG Mingjiang, MING Bo, LI Yan, et al. Pathways towards a cleaner energy system for Xinjiang under carbon peak and carbon neutrality goals [J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(5):1107-1122.

[12]武艺. 新型能源体系目标下中国气电发展趋势及应对策略[J]. 油气储运,2025,44(2):135-144.
WU Yi. Development trends and countermeasures for China's gas-fired power sector in the context of building new energy systems [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2025,44(2):135-144.

[13]王永亮,曹满胜,高雅婕. "双碳"背景下中国天然气调峰措施及建议[J]. 国际石油经济,2022,30(5):53-59.
WANG Yongliang, CAO Mansheng, GAO Yajie. Measures and suggestions for natural gas peak regulation in China under the "dual carbon" target[J]. International Petroleum Economics,2022,30(5):53-59.

[14]黄龑,赵文轸. 推进中国天然气与可再生能源融合发展的思考[J]. 世界石油工业,2021,28(4):38-43.
HUANG Yan, ZHAO Wenzhen. Thoughts on promoting the integrated development of natural gas and renewable energy in China[J]. World Petroleum Industry,2021,28(4):38-43.

[15]邱禹桐. 我国城市天然气供应中常用调峰方式的比较分析[J]. 中国资源综合利用,2020,38(5):52-54.
QIU Yutong. Comparative analysis of common peak shaving methods in China's urban natural gas supply[J]. China Resources Comprehensive Utilization,2020,38(5):52-54.

[16]冶鹏. 新疆地区煤制天然气项目发展前景分析与研究[J]. 中国石油和化工标准与质量,2019,39(15):105-106.
YE Peng. Analysis and research on the development prospects of coal to natural gas projects in Xinjiang region [J] China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2019, 39(15):105-106.

[17]梁严,杨义,周淑慧,等. 以气电为支撑的综合能源基地储气与调峰方式[J]. 油气与新能源,2024,36(3):79-85.
LIANG Yan, YANG Yi, ZHOU Shuhui, et al. Exploration on gas storage and peak shaving mode of new energy base supported by gas and electricity[J]. Petroleum and New Energy, 2024,36(3):79-85.

[18]周淑慧,郝迎鹏,沈鑫,等. 对天然气在新型能源体系中地位和作用的认识[J]. 国际石油经济,2024,32(1):2-16.
ZHOU Shuhui, HAO Yingpeng, SHEN Xin, et al. The position and role of natural gas in the new energy system[J]. International Petroleum Economics,2024,32(1):2-16.

[19]陈彬,闫启明,徐昕歆,等. 气电在高比例新能源基地中的支撑作用研究[J]. 风能,2024,(10):82-88.
CHEN Bin, YAN Qiming, XU Xinxin, et al. Research on the supporting role of gas and electricity in high proportion new energy bases[J]. Wind Energy,2024,(10):82-88.

[20]蒋贝贝,张国强,王栋,等. 超深高压砂岩气藏临界出砂压差预测[J]. 新疆石油天然气,2024,20(2):11-20.
JIANG Beibei, ZHANG Guoqiang, WANG Dong, et al. Prediction of critical drawdown pressure of sand production in ultra-deep high pressure sandstone gas reservoirs[J]. Xinjiang Oil & Gas,2024,20(2):11-20.

[21]吴晓智,柳庄小雪,王建,等. 我国油气资源潜力、分布及重点勘探领域[J]. 地学前缘,2022,29(6):146-155.
WU Xiaozhi, LIUZHUANG Xiaoxue, WANG Jian, et al. Petroleum resource potential, distribution and key exploration fields in China [J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(6): 146-155.

[22]李志学,唐茂源. 天然气发电与火力发电成本效益对比分析[J]. 绿色财会,2023,(3):36-42.
LI Zhixue, TANG Maoyuan. Comparative analysis of cost-effectiveness between natural gas power generation and thermal power generation [J]. Green Finance and Accounting, 2023,(03):36-42.

(修改回稿日期:2025-12-20　编辑:何园)