



我国压缩空气储能电站适建性分区研究

甘雨¹, 姜玥¹, 周辉², 高阳², 胡明明², 梅松华³, 肖峰³, 李静¹
(¹苏州科技大学土木工程学院, 江苏 苏州 215000; ²中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; ³中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014)

摘要: 随着我国能源结构转型和“双碳”目标的推进, 压缩空气储能技术 (compressed air energy storage, CAES) 在储能领域逐渐获得更多的关注和青睐。本研究针对压缩空气储能电站适建性评价方法的空白, 首先, 系统梳理“能源保障”“电网支撑”“能源转型”“经济效益”“地区政策”等维度的定量评价指标和计算方法, 基于我国各地区公开发布的用电数据、标准规范及已建项目情况, 对各指标开展量化分析和统计; 其次, 基于专家调研, 采用层次分析法建立不同指标的权重体系, 形成适建性综合评估方法, 并对我国各省份的压缩空气储能电站适建性进行分区计算。结果表明: 我国大规模CAES电站的强适建区主要分布在东部 (如山东、江苏、广东等地), 主要表现在政策支持力度强劲、用电需求旺盛且建设经济性较好; 东北地区因政策支持较弱、用电负荷偏低, 属弱适建区域; 综合统计显示, 强、较强适建性地区占比约35.5%, 我国压缩空气储能发展前景广阔。

关键词: 压缩空气储能; 适建性; 评估方法; 评价指标; 地区政策

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1147

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 06-2305-11

Suitability assessment and zoning for the construction of compressed air energy storage plants in China

GAN Yu¹, JIANG Yue¹, ZHOU Hui², GAO Yang², HU Mingming², MEI Songhua³, XIAO Feng³,
LI Jing¹

(¹School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215000, Jiangsu, China;

²Institute of Rock And Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China; ³Power China Zhong nan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, Hunan, China)

Abstract: With the transformation of China's energy structure and the advancement of its dual carbon goals, compressed air energy storage (CAES) technology has garnered increasing attention and recognition within the global energy storage sector. This study aims to address existing research gaps in the evaluation methodology for the construction suitability of CAES power plants. First, we systematically collated quantitative evaluation indicators and corresponding calculation methods across five core dimensions, namely, energy security, power grid support, energy transition, economic benefits, and regional policy. Based on publicly released electricity consumption data, prevailing standards and

收稿日期: 2025-12-22; 修改稿日期: 2026-02-04。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U23B20147), 2025年江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (SJCX25_1900)。

第一作者: 甘雨 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为压缩空气储能电站建设运营评价体系, E-mail: 13468151116@163.com; 通信作者: 周辉, 研究员, 主要从事岩石力学试验、理论、数值分析与工程安全性分析方面的研究工作, E-mail: hzhou@whrsm.ac.cn。

引用本文: 甘雨, 姜玥, 周辉, 等. 我国压缩空气储能电站适建性分区研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(6): 2305-2315.

Citation: GAN Yu, JIANG Yue, ZHOU Hui, et al. Suitability assessment and zoning for the construction of compressed air energy storage plants in China[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(6): 2305-2315.

specifications, and operational data of completed CAES projects across various regions in China, we performed quantitative analysis and statistical processing for each indicator. Subsequently, based on expert surveys, we established a weighting system for the aforementioned indicators using an analytic hierarchy process, developed a comprehensive construction suitability evaluation methodology, and completed a zonal calculation of the construction suitability of CAES power plants for each province in China. The results demonstrate that high-suitability zones for large-scale CAES power plants in China are mainly distributed in the eastern region (including Shandong, Jiangsu, and Guangdong provinces), which are characterized by strong policy support, robust electricity demand, and favorable economic viability for project construction. Meanwhile, the northeastern region is classified as a low-suitability zone, attributable to limited policy support and relatively low electricity load. Comprehensive statistical results indicate that regions with relatively high-suitability account for approximately 35.5% of China's total territorial area, highlighting the broad development prospects of CAES technology in the country.

Keywords: compressed air energy storage; construction suitability; evaluation method; evaluation index; regional policy

近年来,我国积极推动能源革命,根据“十四五”规划,2030年非化石能源消费占比将达25%左右^[1]。但可再生能源的随机性和间歇性导致发/用电失衡概率增加、电力系统可调容量下降、应对失衡能力弱化等问题日益凸显,直接并网会影响电网系统稳定性。压缩空气储能(compressed air energy storage, CAES)作为长时大规模储能技术的典型代表,具有装机容量大、成本可控、清洁环保、安全可靠等优势,是解决可再生能源大规模接入、提高常规电力系统和区域能源系统效率、安全性和经济性的前沿技术。2022年以来,我国CAES技术实现单机容量从100 MW到300 MW的跨越,江苏金坛、山东肥城等多个大规模示范项目建成投运。然而与项目快速落地形成鲜明对比的是适配压缩空气储能电站适建性评价方法仍处于空白。

对于项目决策者而言,准确高效的适建性评估方法至关重要,然而,好的压缩空气储能电站适建性评估方法不仅需要对行业发展现状有全面的把握,还需要合理评估工程建设的经济成本,以及系统完善的功能需求和社会影响分析。目前,在行业现状方面,刘笑驰等^[2]系统梳理并阐述国内外压缩空气储能工程的项目发展现状,从装机规模、系统效率、应用场景、建设成本等维度,分析并展望该技术的行业发展趋势。辛传奇等^[3]系统梳理了压缩空气储能技术的发展背景、应用需求、演进历程与

建设现状,剖析了其工作原理、技术分类及储气方式,综述了该技术在电源侧、电网侧、用户侧的多场景应用,并探讨了其当前面临的技术挑战与发展瓶颈。在经济成本方面,候心宇等^[4]、何青等^[5]、Zhang等^[6]分别针对先进绝热压缩空气储能、深冷液化空气储能、燃煤电站回热耦合新型压缩空气储能等先进技术构建动态仿真模型,分析了其运行效率及经济性;Zakeri等^[7]分析了包括压缩空气储能在内的多种储能形式的全寿命周期成本和平准化成本;Kapila等^[8]开发了数据密集型的技术经济模型,以评估压缩空气储能的经济可行性;在功能需求和社会影响方面,赵方亮等^[9]构建了AA-CAES参与电网事故响应的调度模型,揭示了CAES电站对电网系统供电可靠性的大幅提升作用;葛士宇等^[10]对比分析了耦合光伏、光热,与独立压缩空气储能对系统调峰能力的影响;耿晓倩等^[11]对10 MW压缩空气储能系统的全生命周期能耗、能效及二氧化碳排放进行了分析。

整体来看,现有研究多集中于压缩空气储能功能性、经济性等单一指标的分析评价,尚未形成覆盖多维度指标、适配不同场景的压缩空气储能电站系统化适建性评价方法^[12-13]。本研究聚焦长时大规模压缩空气储能电站建设需求,构建涵盖功能性、经济性、社会性多因素的压缩空气储能电站适建性评估指标和方法体系,旨在为大规模压缩空气储能

电站项目建设的决策者提供全方位的评估视角，同时为项目经济性评估与全生命周期管理提供数据支撑，进一步推动我国新型储能技术的规范化发展和技术进步。

1 压缩空气储能电站适建性评估指标

压缩空气储能电站适建性需要综合考虑其功能性、经济性和社会性等因素。功能性，主要体现在能源保障、电网支撑和能源转型三个方面。其中，能源保障聚焦长时大规模储能技术的备用容量价值，保障电网向用户不间断稳定供电的支撑作用；电网支撑表现为储能技术平抑负荷峰谷差以缓解用电时空供需失衡，并为电网提供调频调相等辅助服务的综合性功能；能源转型主要指对可再生能源的消纳作用，可以从可再生能源渗透率（相对角度）和装机量（绝对角度）两方面进行分析评估。经济性，主要体现在长时储能技术长期场景下对优化能源系统成本的作用，需要从其投资成本和盈利模式开展综合效益评估。社会性，主要表征区域政策对储能技术推广的积极作用，涵盖地区政策数量和政策支持力度两方面，由于国家积极推进储能建设，地区政策的支持程度成为压缩空气储能电站适建性评估不可或缺的核心要素。

本部分围绕压缩空气储能电站适建性的分析指标具体如图1所示。

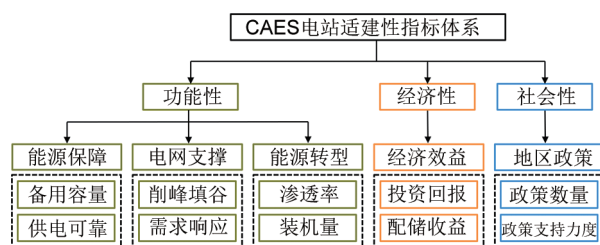


图1 压缩空气储能电站适建性指标体系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the suitability index system

1.1 能源保障

1.1.1 备用容量

备用容量是电力系统为避免因负荷波动、设备故障、电源出力不稳定（如风电、光伏）等突发情况导致供电中断，而特意预留的“冗余能力”。对于压缩空气储能电站适建性，可以采用备用容量缺口率进行评估，具体计算公式为：

$$\Delta P_{\text{gap}} = \frac{\Delta P_{\text{理论备用}} - \Delta P_{\text{实际备用}}}{\Delta P_{\text{理论备用}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中， ΔP_{gap} 为地区备用容量的缺口率； $\Delta P_{\text{理论备用}}$ 为地区理论备用容量（MW）； $\Delta P_{\text{实际备用}}$ 为地区实际备用容量（MW）。

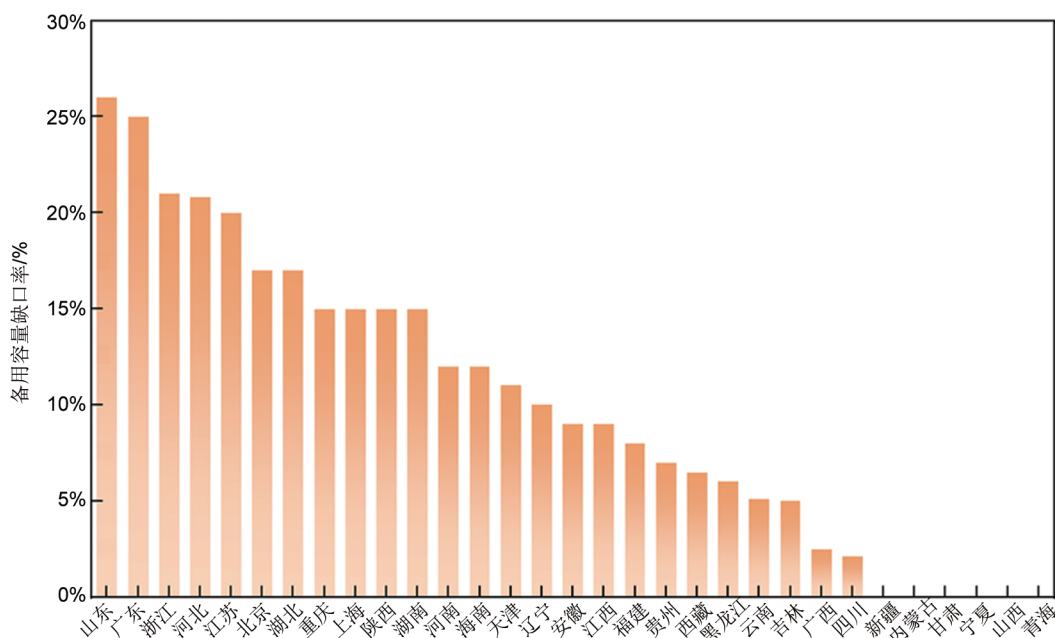


图2 我国各省份备用容量缺口率分布（数据来源：北极星储能网、国家能源局）

Fig. 2 The reserve capacity deviation distribution of each province in China

图2和表1为我国各省份备用容量缺口率分布情况,可以看出,我国备用容量缺口率主要集中于东部沿海及华北地区:山东(26%)、广东(25%)、浙江(21%)、河北(20.8%)等。其相对较高的场景主要表现在:①高负荷密度地区(山东、广东、浙江等);②能源转型迫切地区(河北、陕西、湖北等);③供热期长且负荷大的地区(东北地区)。为便于分级评估,将其按以下标准进行分级:I($\Delta P_{\text{gap}} \geq 20\%$)、II($15\% \leq \Delta P_{\text{gap}} < 20\%$)、III($10\% \leq \Delta P_{\text{gap}} < 15\%$)、IV($5\% \leq \Delta P_{\text{gap}} < 10\%$)、V($0 \leq \Delta P_{\text{gap}} < 5\%$)。

表1 我国各省份备用容量缺口率分布及区间

Table 1 The distribution and interval of reserve capacity gap rate in each province of China

地区	省份	分级区间	省份	分级区间	省份	分级区间
华东地区	山东	I	江苏	I	上海	II
	浙江	II	安徽	IV	福建	IV
	江西	IV	台湾	—		
华北地区	北京	II	天津	III	河北	I
	山西	V	内蒙古	V		
华中地区	河南	III	湖北	II	湖南	II
华南地区	广东	I	广西	V	海南	III
	港澳	V	—			
东北地区	黑龙江	IV	吉林	IV	辽宁	III
西北地区	陕西	II	甘肃	V	青海	V
	宁夏	V	新疆	V		
西南地区	重庆	II	四川	V	贵州	IV
	云南	IV	西藏	IV		

1.1.2 供电可靠

供电可靠性是指电力系统不间断、稳定地向用户供应符合质量要求电能的能力。地区供电可靠性与配储之间存在密切的正向关联,配储通过优化电力供需平衡、增强电网灵活性与稳定性,成为提升供电可靠性的关键技术手段。供电可靠率计算公式为^[14]:

$$ASAI = \left(1 - \frac{T_{eq}}{T_{tot}}\right) \times 100\%$$

(2)

其中,

$$T_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i \times T_i)}{N_{tot}}$$

(3)

式中,ASAI为平均供电可靠率; T_{eq} 为等效停电时间; T_{tot} 为统计时长(h); n 为停电事件数量

(次); N_i 为第*i*次停电容量(MW); N_{tot} 为系统供电总容量(MW); T_i 为第*i*次停电的时间(h)。将其按以下标准进行分级:I($ASAI \geq 99.97\%$)、II($99.927\% \leq ASAI < 99.97\%$)、III($99.885\% \leq ASAI < 99.927\%$)、IV($99.526\% \leq ASAI < 99.885\%$)、V($99.52\% \leq ASAI < 99.526\%$),我国各省份供电可靠率分级情况如表2所示。可以看出,供电可靠率较低的区域主要包括:①可再生能源高渗透区(青海、内蒙古等);②配电网基础建设滞后于用电需求增长的东北地区;③水电占比较高受季节变化影响较大的西南地区。

表2 我国各省份供电可靠率分布及区间

Table 2 Distribution and interval of power supply reliability rate in each province of China

地区	省份	分级区间	省份	分级区间	省份	分级区间
华东地区	山东	II	江苏	I	上海	II
	浙江	I	安徽	I	福建	I
	江西	III	台湾	—		
华北地区	北京	I	天津	II	河北	IV
	山西	IV	内蒙古	III		
华中地区	河南	III	湖北	I	湖南	II
华南地区	广东	I	广西	I	海南	IV
	港澳	—				
东北地区	黑龙江	IV	吉林	IV	辽宁	II
西北地区	陕西	IV	甘肃	IV	青海	IV
	宁夏	II	新疆	IV		
西南地区	重庆	III	四川	IV	贵州	III
	云南	III	西藏	V		

1.2 电网支撑

1.2.1 削峰填谷

用电峰谷的产生是电力系统“供需时空错配”的主要体现,用电低谷时段富余的电能多数未被消纳,是弃电的主要来源。配储不仅可以消纳用电低谷富余的电能、提高能源利用率,还能优化电力供需不平衡,减轻电网运行压力。峰谷差率可用于定量表征储能系统的削峰填谷作用,计算公式为:

$$K_{PVDR} = \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{max}} \times 100\%$$

(4)

式中, K_{PVDR} 为峰谷差率; P_{max} 、 P_{min} 分别为某一统计周期内的实际最大、最小负荷(MW)。将其按以下标准进行分级:I($K_{PVDR} \geq 40\%$)、II($30\% \leq K_{PVDR} < 40\%$)、III($K_{PVDR} < 30\%$)。我国各省份峰谷差率分级结果如表3所示,可以看出,大部分省份

仍处于 30% 以上，北京、浙江等发达城市峰谷差率甚至超过 40%。

表 3 我国各省份峰谷差率分布及区间（数据来源：国家发改委）

Table 3 The distribution and interval of peak-valley difference rate in various provinces of China						
地区	省份	分级区间	省份	分级区间	省份	分级区间
华东地区	山东	III	江苏	III	上海	II
	浙江	I	安徽	III	福建	III
	江西	III	台湾	—		
华北地区	北京	I	天津	II	河北	II
	山西	III	内蒙古	III		
华中地区	河南	III	湖北	III	湖南	II
华南地区	广东	II	广西	II	海南	III
	港澳	—				
东北地区	黑龙江	II	吉林	II	辽宁	III
西北地区	陕西	II	甘肃	III	青海	III
	宁夏	III	新疆	III		
西南地区	重庆	II	四川	II	贵州	II
	云南	III	西藏	II		

1.2.2 需求响应

发电功率与用电负荷的失衡，易导致供电波动，造成生产生活损失。配置储能可以有效解决电网波动问题。因此，可以通过电网的调峰次数来定量评估储能需求。将其按以下标准进行分级：I（2~3 次/天）、II（1.5~2 次/天）、III（1.5~2 次/天）、IV（<1 次/天），我国各省份调峰日均次数分级结果如表 4 所示。

1.3 能源转型

1.3.1 绿电消纳-可再生能源渗透率

可再生能源渗透率可以从相对量的角度评估新能源对地区能源结构的冲击以及对储能的需求，计算公式为：

$$R_{re} = \frac{E_{re}}{E_{total}} \times 100\% \quad (5)$$

式中， R_{re} 为可再生能源渗透率； E_{re} 为可再生能源的发电量； E_{total} 为该地区总发电量。将其按以下标准进行分级：I（ $R_{re} \geq 50\%$ ）、II（ $30\% \leq R_{re} < 40\%$ ）、III（ $20\% \leq R_{re} < 30\%$ ）、IV（ $10\% \leq R_{re} < 20\%$ ）、V（ $0 \leq R_{re} < 10\%$ ）。我国各省份可再生能源渗透率分级如表 5 所示，可以看出，东部地区由于用电要求较高，可再生能源渗透率处于较低水平，随着能源结构深化改革，配套的储能设施需求也将

表 4 我国各省份调峰日均次数分布及区间（数据来源：ESCN 中国储能网、省政府或发展改革委发布）

Table 4 The distribution and interval of the average number of peak shaving days in each province of China

地区	省份	分级区间	省份	分级区间	省份	分级区间
华东地区	山东	I	江苏	I	上海	II
	浙江	I	安徽	III	福建	II
	江西	II	台湾	—		
华北地区	北京	II	天津	II	河北	II
	山西	III	内蒙古	II		
华中地区	河南	II	湖北	II	湖南	II
华南地区	广东	I	广西	IV	海南	II
	港澳	—				
东北地区	黑龙江	IV	吉林	IV	辽宁	III
西北地区	陕西	II	甘肃	III	青海	III
	宁夏	III	新疆	III		
西南地区	重庆	II	四川	II	贵州	II
	云南	II	西藏	III		

逐渐增大；水电充沛的西南云贵地区渗透率高达 80% 左右，表明大型水电基础设施已基本保障了该区域的用电需求。

表 5 我国各省份可再生能源渗透率分布及区间

Table 5 The distribution and range of renewable energy penetration rate in various provinces of China

地区	省份	分级区间	省份	分级区间	省份	分级区间
华东地区	山东	IV	江苏	IV	上海	V
	浙江	V	安徽	V	福建	V
	江西	IV	台湾	—		
华北地区	北京	V	天津	V	河北	III
	山西	IV	内蒙古	III		
华中地区	河南	IV	湖北	IV	湖南	IV
华南地区	广东	V	广西	IV	海南	V
	港澳	—				
东北地区	黑龙江	III	吉林	III	辽宁	IV
西北地区	陕西	III	甘肃	II	青海	I
	宁夏	III	新疆	III		
西南地区	重庆	V	四川	V	贵州	IV
	云南	IV	西藏	V		

然而，由于水电、核电为相对稳定能源，在探究可再生能源渗透率与储能需求的关系时，需排除水电、核电等的影响，仅考虑由于风光电波动性产生的储能需求。由图 3 可以看出，我国西北和东北

部省份风光资源富集，风光能源渗透率较高，对储能系统的配置需求也相应提高；中部地区以火电为主，能源转型背景下也需要进一步增加配储，实现降碳的目标。

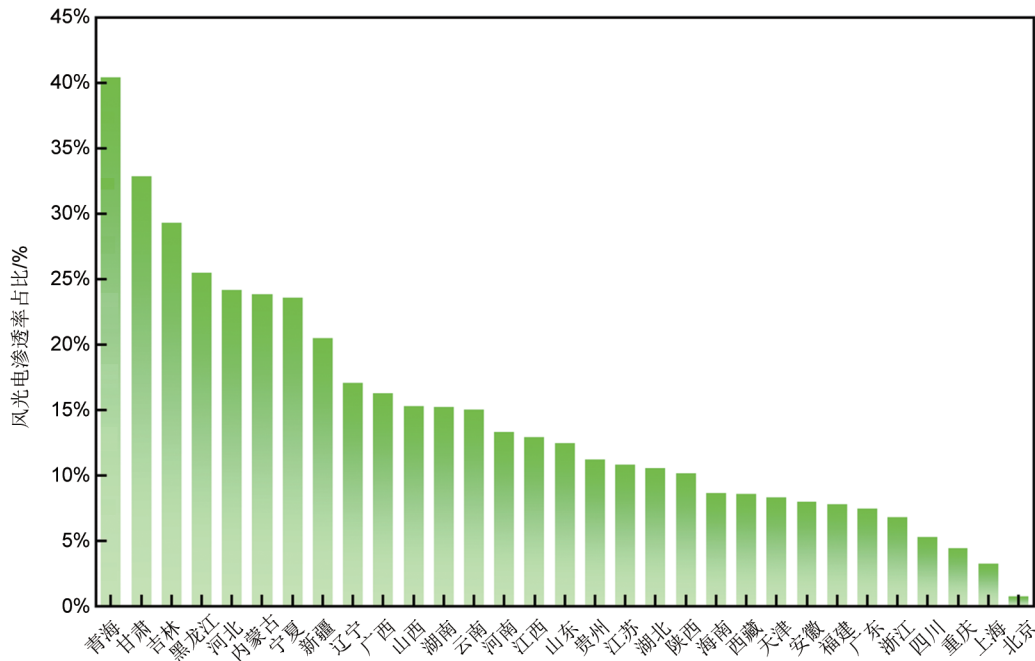


图3 我国风光电渗透率分布及数据（数据来源：北极星火力发电、各省份能源局发布）

Fig. 3 Distribution and data of wind-photovoltaic power permeability in China

1.3.2 绿电消纳-装机量

相对于渗透率的相对性评估，风光电装机量可以从绝对量角度评估储能需求。将风电装机按以下标准进行分级：I（700~1650万千瓦）、II（400~700万千瓦）、III（200~400万千瓦）、IV（100~200万千瓦）、V（0~100万千瓦），将光电装机按以下标准进行分级：I（1650~2700万千瓦）、II（650~1650万千瓦）、III（450~650万千瓦）、IV（160~450万千瓦）、V（0~160万千瓦），我国各省份2024年风光电新增装机量分级结果如表6所示。可见，内蒙古、新疆等地处风口区域且多平原，风电资源富集，年风电新增装机量增幅明显；山东、河北等地区则以分布式光伏为主。

1.4 经济效益

1.4.1 投资回报

新型长时大规模储能的盈利逻辑，核心是依托其“长时持续出力加容量调节”的特性，在电力系统“源网荷储”全链条中捕捉多元化价值。投资回报周期可以较好地评估储能电站在多元盈利模式下的经济性，其计算以项目净现值等于零为基准，公式为：

表6 我国各省份2024年新增风光电装机分布及区间（数据来源：国际能源网、国家发展改革委）

Table 6 The distribution and interval of new wind, photovoltaic and electrical installations in 2024 in various provinces of China									
地区	省份	风电	光电	省份	风电	光电	省份	风电	光电
华东	山东	V	I	江苏	V	I	上海	V	V
	浙江	V	II	安徽	IV	II	福建	V	IV
	江西	V	III	台湾	—	—			
华北	北京	V	V	天津	V	IV	河北	II	I
	山西	IV	II	内蒙古	I	I			
华中	河南	IV	III	湖北	IV	II	湖南	IV	III
	广东	IV	II	广西	II	II	海南	V	IV
华南	港澳	—	—						
东北	黑龙江	III	V	吉林	III	V	辽宁	III	IV
西北	陕西	IV	II	甘肃	II	III	青海	V	II
	宁夏	V	III	新疆	I	I			
西南	重庆	V	V	四川	IV	III	贵州	IV	IV
	云南	IV	I	西藏	V	V			

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{R_t - C_t}{(1 + d)^t} - I_0 = 0$$

(6)

式中，NPV为净现值； R_t 为第 t 年收益(电价收

入、辅助服务收入等)； C_t 为第 t 年成本（运行成本、能耗成本等)； I_0 为初始投资； d 为折现率。由于部分地区目前尚无压缩空气储能电站的工程案例（如：云南、北京等），在该部分地区通过抽蓄电站的投资回报周期进行估计，通过调研发现：西南地区 CAES 电站的投资回报周期约为抽蓄电站的 80%；其他地区 CAES 电站受储库条件、用电负荷等多因素影响，投资回报周期约为当地抽蓄电站的 45%~55%。对我国各省份预计投资回报周期进行统计，并按以下标准进行分级 I（<8 年）、II（8~10 年）、III（10~12 年）、IV（大于 12 年），结果如表 7 所示。可以看出，压缩空气储能电站在以下三种场景下投资回报周期较短，具有较好的经济效益：①山东、江苏等用电负荷高的省份，出力调峰需求旺盛，市场前景广阔；②政策支持力度大的省份，相关补贴对项目经济效益的贡献占比显著；③西北等风光装机规模较大的地区，凭借其大规模装机量可以取得较好的电网侧收益。

1.4.2 配储收益

由于新能源发电的波动性，配储可进一步拓宽其盈利空间：当实际发电量低于申报电量时，误差允许范围内可获利，通过储能增加出力后，误差范

表 7 我国各省份预计投资回报周期分布及区间（数据来源：各省份 CAES 公开发布）

Table 7 The expected investment return cycle distribution and interval of each province in China						
地区	省份	分级区间	省份	分级区间	省份	分级区间
华东地区	山东	I	江苏	I	上海	IV
	浙江	I	安徽	III	福建	III
	江西	II	台湾	—		
华北地区	北京	II	天津	IV	河北	II
	山西	III	内蒙古	II		
华中地区	河南	III	湖北	II	湖南	II
华南地区	广东	II	广西	IV	海南	II
	港澳	—				
东北地区	黑龙江	IV	吉林	IV	辽宁	IV
西北地区	陕西	II	甘肃	II	青海	II
	宁夏	II	新疆	II		
西南地区	重庆	III	四川	IV	贵州	IV
	云南	IV	西藏	IV		

围内获利扩大；当实际发电量高于申报电量时，存储超额部分电量可减少回收额度，项目经济性亦有提升。其收益机制如图 4 所示。

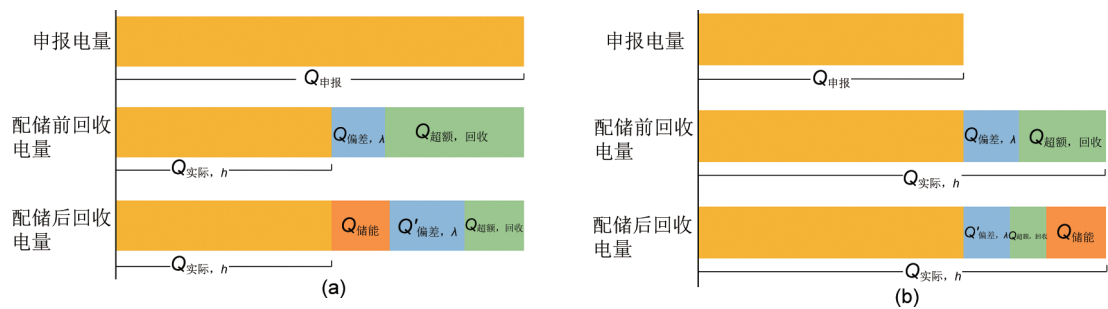


图 4 新能源配储欠发 (a)、超发 (b) 收益模式
Fig. 4 Renewable energy reserve (under-generation) revenue model

欠发场景下的回收金额计算公式为：

$$R_{\text{配储,前}} = [Q_{\text{申报}} - (1 + \lambda)Q_{\text{实际},h}] \times \Delta P \quad (7)$$
$$R_{\text{配储,后}} = [Q_{\text{申报}} - (1 + \lambda)(Q_{\text{实际},h} + Q_{\text{储能}})] \times \Delta P \quad (8)$$

超发场景下的回收金额计算公式为：

$$R_{\text{超,配前}} = [(1 - \lambda)Q_{\text{实际},h} - Q_{\text{申报}}] \times \Delta P \quad (9)$$
$$R_{\text{超,配后}} = [(1 - \lambda)(Q_{\text{实际},h} - Q_{\text{储能}}) - Q_{\text{申报}}] \times \Delta P \quad (10)$$

式中， $R_{\text{配储,前}}$ ， $R_{\text{配储,后}}$ 分别为欠发储能出力前后收益额度； $Q_{\text{申报}}$ 为申报电量（MW）； $R_{\text{超,配前}}$ ， $R_{\text{超,配后}}$ 为超发储能出力前后回收额度； λ 为新能源

发电量允许偏差； ΔP 为日前电价与实时市场电价差。可以看出，发电量允许偏差显著影响获益额度，因此可通过 λ 评估储能经济性，将其按以下标准进行分级：I（30%< λ ≤40%）、II（20%< λ ≤30%）、III（10%< λ ≤20%）、IV（ λ ≤10%），不同省份分级结果如表 8 所示。

1.5 地区政策

1.5.1 政策数量

不同省份所发布的政策数据来源于 CNESA 中关村储能产业技术联盟，结果如图 5 所示，可以看

表 8 不同省份新能源电量允许偏差统计（数据来源：国家电监会）

Table 8 Statistics of allowable deviation of new energy power in different provinces						
地区	省份	分级区间	省份	分级区间	省份	分级区间
华东地区	山东	III	江苏	IV	上海	IV
	浙江	II	安徽	II	福建	IV
	江西	IV	台湾	—		
华北地区	北京	IV	天津	IV	河北	III
	山西	I	内蒙古	III		
华中地区	河南	III	湖北	IV	湖南	IV
华南地区	广东	IV	广西	II	海南	IV
	港澳	—				
东北地区	黑龙江	III	吉林	III	辽宁	IV
西北地区	陕西	IV	甘肃	III	青海	IV
	宁夏	I	新疆	III		
西南地区	重庆	IV	四川	IV	贵州	IV
	云南	IV	西藏	IV		

可量化内容评估实施强度；③政策类型相关性，核查是否为压缩空气储能专项政策；④发展阶段明确性，明确政策处于征求意见、实施方案等具体修订阶段；⑤建设配套完备性，考察地区储能建设协调、实施细则等配套保障情况；⑥推进效率适配性，明确主导部门并考量其落实效率。根据单条政策内容所符合的条数进行重要程度量化得分。

政策重要程度、覆盖环节以及时效性具体赋分如表 9 所示。

根据各省份发布的储能政策统计，其政策支持力度量化得分计算公式为：

$$T = \sum_{i=1}^n s_i = \sum_{i=1}^n (a_i + b_i + c_i)$$

(11)

式中， T 为地区政策得分； s_i 为第 i 条政策得分； a_i 为第 i 条政策重要程度得分； b_i 为第 i 条政策覆盖环节得分； c_i 为第 i 条政策时效性得分； n 为该地区发布政策条数。

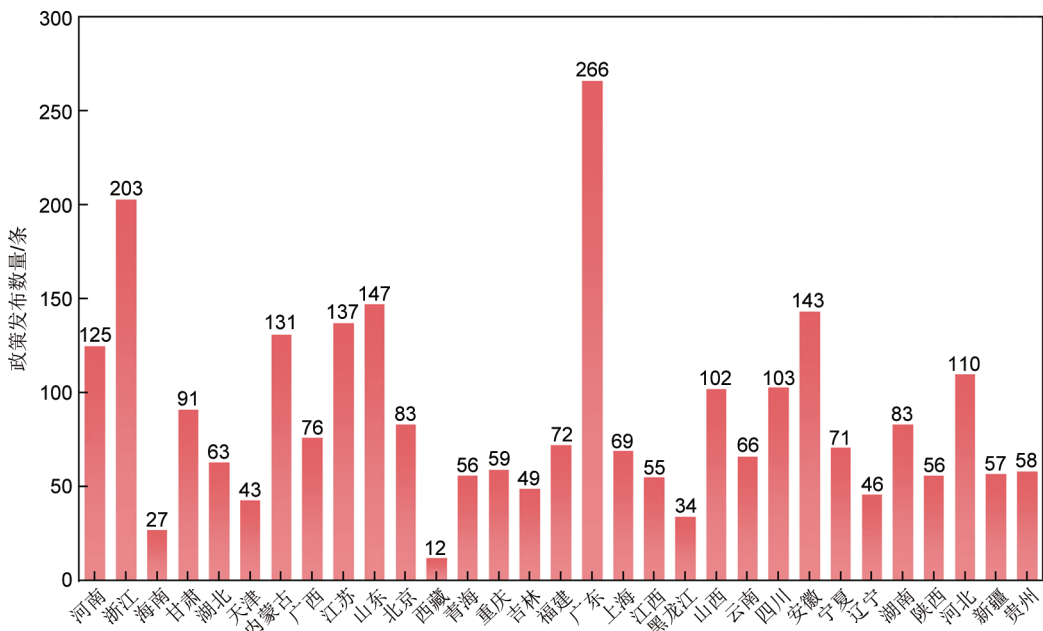


图 5 我国内陆各省份政策数量统计（数据来源：CNESA 中关村储能产业技术联盟）
Fig. 5 Statistics on the number of policies in inland provinces of China

出，广东、浙江表现出储能建设的显著积极性。

1.5.2 政策支持力度

对于政策支持力度，本研究分别从政策重要程度、覆盖环节、时效性三方面进行评估。其中，政策重要程度按以下六项标准划分：①核心矛盾针对性，判断政策是否直击储能盈利、并网等关键问题；②落地力度量化性，以补贴金额、配储要求等

基于 CNESA 统计的各地区已发布政策数据（2020—2025 年），对各地区储能相关政策的数量及具体内容进行系统性梳理与量化评估，代表性省份得分统计结果如表 10 所示。将其按以下标准进行分级：I（≥350 分）、II（250~350 分）、III（150~250 分）、IV（50~150 分）、V（0~50 分），我国各省份分级结果见表 11。可以看出，政策

表9 政策重要程度、覆盖环节、时效性量化得分
Table 9 Quantitative scores of policy importance, coverage and timeliness

符合标准数	分值	政策覆盖环节	分值	政策时效性	分值
5~6项	1	A: 项目建设与投资	1.0	近期(1~2年内)	1.0
3~4项	0.6	B: 电力市场、补贴/电价政策	0.9	中期(3~5年)	0.7
1~2项	0.3	C: 装备研发、鼓励配储、示范项目	0.8	远期(>5年)	0.3
—	—	D: 规划、标准、宏观政策	0.6	—	—

表10 湖北省和河北省的政策综合得分
Table 10 The comprehensive score of policy in Hubei and Hebei provinces

省份	政策数量	重要程度	覆盖环节	时效性	得分
湖北	48条	非常重要: 20条 比较重要: 8条 一般重要: 20条	A: 1条; B: 16条; C: 18条; D: 12条	1~2年: 13条 3~5年: 30条 ≥5年: 5条	112.1
河北	87条	非常重要: 40条 比较重要: 31条 一般重要: 16条	A: 0条; B: 22条; C: 42条; D: 23条	1~2年: 56条 3~5年: 28条 ≥5年: 3条	204.8

表11 国各省份政策得分结果区间划分
Table 11 The division of the result interval of the policy score of each province in the country

地区	省份	分级区间	省份	分级区间	省份	分级区间
华东地区	山东	II	江苏	II	上海	IV
	浙江	I	安徽	II	福建	IV
	江西	IV	台湾	—		
华北地区	北京	III	天津	IV	河北	III
	山西	III	内蒙古	II		
华中地区	河南	II	湖北	IV	湖南	III
华南地区	广东	I	广西	III	海南	
	港澳	—				
东北地区	黑龙江	IV	吉林	IV	辽宁	IV
西北地区	陕西	IV	甘肃	III	青海	IV
	宁夏	IV	新疆	IV		
西南地区	重庆	IV	四川	III	贵州	IV
	云南	IV	西藏	V		

支持力度较大的省份分布在东部地区（广东、浙江、江苏）、华北地区（山东、河北）和西北地区（青海、甘肃），分别对应生产生活用电保障需求、环保降碳

需求与可再生能源消纳需求三大核心场景。

2 压缩空气储能电站适建性评估

2.1 地区适建性指标量化

根据相关标准规范及政策^[14-17]以及已建项目^[18-20]调研数据等，对适建性指标量化区间进行划分如表12~13所示。

2.2 层次分析法指标权重计算

在各指标定量评估的基础上，采用专家调研和层次分析法计算各个指标对压缩空气储能电站适建性评价的权重，结果如表14所示。

2.3 地区适建性分布

各地区的压缩空气储能电站适建性得分按式(12)、(13)进行计算。

$$S'_i = \sum (s_i \times w_{Ai}) \tag{12}$$

其中，

$$s_i = \sum (w_{ci} \times s_{ci}) \tag{13}$$

式中， S'_i 为地区压缩空气储能电站适建性综合得分； s_i 为该地指标的得分； w_{Ai} 为一级指标权重； Ai 为统计的一级指标(功能性、经济性、社会性)； w_{ci} 为三级指标权重； s_{ci} 为三级指标得分； Ci 为二级指标(峰谷差率、供电可靠、备用容量等)。将其按以下标准进行分级：I（≥8分）、II（7~8分）、III（6~7分）、IV（5~6分）、V（0~5分），我国各省份压缩空气储能电站适建性分级结果如表15所示。可见，①东部地区（广东、山东、江苏、浙江等），因用电负荷旺盛、储库建设经济性好、政策支持强劲，成为压缩空气储能电站的强适建性区；②西北地区新能源装机规模较大，调节功能需求较强，但用电负荷需求较弱，为一般适建性区域；③西南地区储能以抽水蓄能为主，且用电负荷偏低，为压缩空气储能电站较弱适建性地区；④东北地区因政策支持较弱、用电负荷偏低，属弱适建区域。总体而言，我国强适建区及较强适建区地区合计占比约30%，CAES行业发展前景广阔。

3 结论与展望

本研究从功能性、经济性及社会性三个维度构建了压缩空气储能电站适建性评价指标体系，对我国各省份开展了指标调研统计和量化分级，形成了大规模压缩空气储能电站适建性评估方法及我国压缩空气储能电站适建性分区，主要得出以下结论：

表 12 功能性指标量化区间划分

Table 12 Grading criteria for functional indicators

指标评分	功能性					
	能源保障		电网支撑		能源转型	
	容量需求缺口率	供电可靠率	峰谷差率	日均调峰次数	可再生能源渗透率	绿电装机/万 kW
10	>20%	<99.97%	>40%	2~3	>50%	风电：701~1650；光电：1650~2700
8	15%~20%	99.927%~99.97%	30%~40%	1.5~2	30%~40%	风电：401~700；光电：650~1650
6	10%~15%	99.885%~99.927%	<30%	1~1.5	20%~30%	风电：211~400；光电：450~650
4	5%~10%	>99.526%	—	<1	<20%	风电：≤210；光电：≤450

表 13 经济性与社会性指标量化区间划分

Table 13 Grading criteria for economic and social indicators

指标评分	经济性（经济效益）		社会性（地区政策）	
	投资回报周期	新能源发电量偏差值	政策数量	政策支持力度
10	≤8 年	30%<A≤40%	≥150	≥350
8	8~10 年	20%<A≤30%	100~150	250~350
6	10~12 年	10%<A≤20%	50~100	150~250
4	≥12 年	A≤10%	0~50	<150

表 14 适建性指标权重计算结果

Table 14 Weight calculation results of construction suitability index

一级指标	得分	权重	二级指标	得分	权重
A ₁ 功能性	8.466	0.3427	C ₁ 备用容量	7.891	0.1598
			C ₂ 供电可靠	8.135	0.1647
			C ₃ 削峰填谷	9.181	0.1859
			C ₄ 需求响应	8.414	0.1703
			C ₅ 可再生能源渗透率	8.004	0.1620
			C ₆ 新能源装机量	7.769	0.1573
A ₂ 经济性	8.832	0.3576	C ₇ 投资回报	8.867	0.51
			C ₈ 配储收益	8.519	0.49
A ₃ 社会性	7.403	0.2997	C ₉ 政策数量	7.355	0.4786
			C ₁₀ 政策质量	8.013	0.5214

（1）系统梳理了备用容量、峰谷差率、绿电消纳潜力等核心指标的定量计算方法，分析了各指标的区域分布特征及其规律。

（2）对于我国各地区发布的 CAES 相关政策，从政策数量和支持力度两方面进行了量化评估，揭示了储能政策支持强度高的三大场景：生产生活用电需求、环保减排降碳需求和清洁能源消纳需求。

（3）采用层次分析法建立了压缩空气储能电站适建性评估指标的权重体系，计算得到了我国压缩

表 15 我国各省份适建性得分结果区间划分

Table 15 The interval division of the results of the suitability score of each province in China

地区	省份	分级区间	省份	分级区间	省份	分级区间
华东地区	山东	I	江苏	I	上海	II
	浙江	I	安徽	II	福建	IV
	江西	IV	台湾	—		
华北地区	北京	II	天津	III	河北	II
	山西	III	内蒙古	III		
华中地区	河南	III	湖北	II	湖南	II
华南地区	广东	I	广西	III	海南	III
	港澳	—				
东北地区	黑龙江	V	吉林	V	辽宁	V
西北地区	陕西	III	甘肃	III	青海	III
	宁夏	IV	新疆	IV		
西南地区	重庆	III	四川	II	贵州	III
	云南	III	西藏	V		

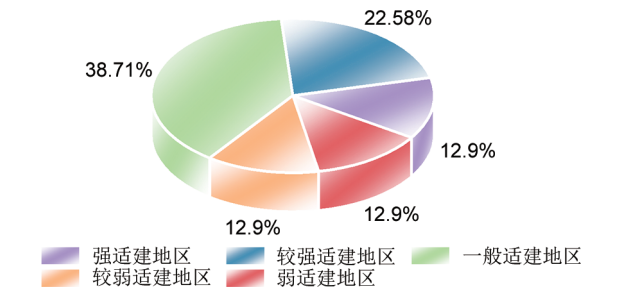


图 6 我国压缩空气储能电站适建性分布及占比情况

Fig. 6 The distribution and proportion of construction suitability indicators in China

空气储能电站适建性的地区分布结果。结果表明，强、较强适建省份合计占比为 35.48%。

尽管本研究已就压缩空气储能电站适建性评估的核心问题展开系统分析，但研究过程中仍存在一些待深化的细节，主要表现在：研究中所整理的各省份相关指标数据基于近年统计结果，受区域发展

动态性与政策调整影响,数据时效性将随时间推移逐步减弱。此外,在本研究的基础上,未来可进一步拓展两个研究方向:一是构建动态指标评估体系,结合区域发展态势实时更新指标维度与数据参数;二是开展多类型储能技术的综合对比分析,为储能项目规划建设与区域能源系统优化提供更具针对性的理论支撑与实践指导。

参考文献

- [1] 国家发展和改革委员会. 关于印发“十四五”可再生能源发展规划的通知: 发改能源〔2021〕1445号[EB/OL]. [2025-10-09]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202206/t20220601_1326719_ext.html.
- [2] 刘笑驰, 梅生伟, 丁若晨, 等. 压缩空气储能工程现状、发展趋势及应用展望[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(10): 38-47, 102. DOI: 10.16081/j.epae.202309005.
LIU X C, MEI S W, DING R C, et al. Current situation, development trend and application prospect of compressed air energy storage engineering projects[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(10): 38-47, 102. DOI: 10.16081/j.epae.202309005.
- [3] 辛传奇, 王文权, 陈伟, 等. 压缩空气储能技术多维度应用与发展路径分析[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(9): 3636-3647.
XIN C Q, WANG W Q, CHEN W, et al. Multi-dimensional application and development paths of compressed air energy storage technology[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(9): 3636-3647.
- [4] 侯心宇, 苗世洪, 王廷涛, 等. 大容量先进绝热压缩空气储能系统动态建模及特性分析[J]. 电工技术学报, 2025, 40(24): 8123-8135. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.242058.
HOU X Y, MIAO S H, WANG T T, et al. Dynamic modelling and characterization of large capacity advanced adiabatic compressed air energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(24): 8123-8135. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.242058.
- [5] 何青, 王立健, 刘文毅. 深冷液化空气储能系统的热力学建模及焓分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(10): 127-132. DOI: 10.13245/j.hust.181022.
HE Q, WANG L J, LIU W Y. Thermodynamic model and exergy analysis of cryogenic liquefied air energy storage system[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2018, 46(10): 127-132. DOI: 10.13245/j.hust.181022.
- [6] ZHANG L, CUI J, ZHANG Y P, et al. Performance analysis of a compressed air energy storage system integrated into a coal-fired power plant[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 225: 113446. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113446.
- [7] ZAKERI B, SYRI S. Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 42: 569-596. DOI: 10.1016/j.rser.2014.10.011.
- [8] KAPILA S, ONI A O, KUMAR A. The development of technoeconomic models for large-scale energy storage systems[J]. Energy, 2017, 140: 656-672. DOI: 10.1016/j.energy.2017.08.117.
- [9] 赵方亮, 刘瀚琛, 张猛, 等. 考虑先进绝热压缩空气储能的配电网韧性提升策略[J/OL]. 分布式能源, 1-8[2026-03-03]. <https://link.cnki.net/urlid/10.1427.TK.20260113.2301.002>.
ZHAO F L, LIU H C, ZHANG M et al. Resilience enhancement strategy of distribution grid considering advanced adiabatic compressed air energy storage[J]. Distributed Energy, 1-8[2026-03-03]. <https://link.cnki.net/urlid/10.1427.TK.20260113.2301.002>.
- [10] 葛士宇, 史汪洋, 徐钢, 等. 压缩空气储能辅助太阳能电站调峰性能分析[J]. 热力发电, 2025, 54(9): 35-45.
GE S Y, SHI W Y, XU G, et al. Performance analysis of peak load balancing for compressed air energy storage assisted solar power station[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(9): 35-45.
- [11] 耿晓倩, 徐玉杰, 黄景坚, 等. 先进压缩空气储能系统全生命周期能耗及二氧化碳排放[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(9): 2971-2979. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0129.
GENG X Q, XU Y J, HUANG J J, et al. Life cycle energy consumption and carbon emissions of advanced adiabatic compressed air energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(9): 2971-2979. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0129.
- [12] 刘洋恺, 孙伟卿, 刘唯. 基于AHP和TOPSIS-模糊综合评价的多场景储能选型方法[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(2): 691-701. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0624.
LIU Y K, SUN W Q, LIU W. Multiscenario energy storage selection method based on AHP and TOPSIS-fuzzy comprehensive evaluation[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(2): 691-701. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0624.
- [13] 赵娟, 李秉晨, 王喆, 等. 基于BMW和TOPSIS的新型储能场景适用性评价[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(1): 443-455.
ZHAO J, LI B C, WANG Z, et al. Evaluation of scenario applicability of new energy storage based on BMW and TOPSIS methods[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(1): 443-455.
- [14] 国家能源局. 供电系统用户供电可靠性评价规程: DL/T 836—2012[S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
National Energy Bureau of the People's Republic of China. Reliability evaluation code for customer service in power supply system: DL/T 836—2012[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.
- [15] 本刊编辑部. 国家发展改革委进一步完善分时电价机制[J]. 农村电工, 2021, 29(9): 1.
- [16] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电力储能用压缩空气储能系统技术要求: GB/T 43687—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical requirements for compressed air energy storage system used for electrical energy storage: GB/T 43687—2024[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.
- [17] 国家电监会印发华东、东北、南方、华中、西北区域发电厂辅助服务管理及并网运行管理实施细则[J]. 电站信息, 2009(1): 16-19.
- [18] 大唐中宁100MW/400MWh压缩空气储能项目已进入主设备安装阶段[EB/OL]. [2025-09-17]. https://www.znzhf.gov.cn/xwzx/zwdt/202408/t20240809_4618409.html.
- [19] 卢奇秀. 全球首座300兆瓦级压气储能电站全容量并网[N]. 中国能源报, 2025-01-13(12). DOI: 10.28693/n.cnki.nshca.2025.000052.
- [20] 国际首套百兆瓦先进压缩空气储能国家示范项目顺利并网[J]. 高科技与产业化, 2022, 28(1): 80. DOI: 10.26927/j.cnki.hitech.2022.01.025.