全过程视角下绝热压缩空气储能系统环境影响演变规律分析

李瑞雄[1]，张浩然[2]，孙昊[1]，郭子奥[1]，屠清石[3]，王焕然[1]，席光[1]
（1. 西安交通大学能源与动力工程学院，710049，西安；2. 伦敦大学学院巴特莱特可持续建设学院，WC1E 7HB，伦敦；3. 英属哥伦比亚大学木材科学系，V6T 1Z4，温哥华）

摘要：为了全面评价动态电网结构情景下绝热压缩空气储能（A-CAES）技术在建造-运行-维护全生命周期视角的综合环境表现，构建了面向我国石膏矿硐场景的绝热压缩空气储能系统，并通过将A-CAES过程系统与环境扩展投入产出框架相耦合，建立融合型混合生命周期模型。其中，过程层用于精细表征A-CAES核心单元的技术细节与直接环境影响，投入产出层用于追踪上游原材料、设备制造、能源供给及基础设施建设所隐含的间接环境压力。研究结果表明：系统运行阶段的储能电力消耗是主导性因素，其对环境影响的贡献超过90%；采用相变材料的蓄热装置及系统基础设施的建设过程也具有显著影响；2010、2030及2050年，在不同电网结构情景下，伴随可再生能源发电占比提升，储能系统产生的大部分环境影响呈下降趋势，唯电离辐射影响因核电比例增加而上升；若以单位发电量为基准，我国系统在化石能源消耗与水资源消耗方面的影响较低。该研究可为A-CAES技术的低碳化设计与规划提供全生命周期视角下的科学依据。

关键词：压缩空气储能；融合型混合生命周期模型；环境影响
中图分类号：TK02 **文献标志码**：A
DOI：10.7652/xjtuxb202611014 **文章编号**：0253-987X(2026)11-0156-12

Analysis of the Evolution Patterns of Environmental Impacts of Adiabatic Compressed Air Energy Storage Systems from a Full-Process Perspective

LI Ruixiong[1], ZHANG Haoran[2], SUN Hao[1], GUO Zi'ao[1], TU Qingshi[3], WANG Huanran[1], XI Guang[1]
(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Bartlett School of Sustainable Construction, University College London, London WC1E 7HB, UK; 3. Department of Wood Science, University of British Columbia, Vancouver, V6T 1Z4, Canada)

Abstract: To comprehensively evaluate the overall environmental performance of adiabatic compressed air energy storage (A-CAES) technology under dynamic grid structure scenarios from a full lifecycle perspective of construction-operation-maintenance, an A-CAES system tailored to gypsum mine caverns in China is developed. By coupling the A-CAES process system with an environmentally extended input-output framework, an integrated hybrid life-cycle assessment (LCA) model is constructed. Specifically, the process-based layer is used to finely characterize the technical details and direct

收稿日期：2025-12-06。 作者简介：李瑞雄(1990—)，男，副教授，博士生导师；张浩然(通信作者)，男，研究员。
基金项目：科技项目：国家科技重大专项项目(2025ZD0805700)。
网络出版时间：2026-06-23 网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20260623.1036.004

environmental impacts of the core A-CAES units, while the input-output layer is employed to track the indirect environmental pressures embodied in upstream raw materials, equipment manufacturing, energy supply, and infrastructure construction. The results indicate that the electricity consumption for energy storage during the system operation phase is the dominant factor, contributing over 90% to the environmental impacts; the thermal energy storage device using phase change materials and the construction process of system infrastructure also have significant impacts. Across the grid structure scenarios for 2010, 2030, and 2050, driven by the increasing share of renewable energy power generation, most of the environmental impacts generated by the energy storage system show a downward trend, with the exception of ionizing radiation impacts, which increase due to a higher proportion of nuclear power. However, per unit of electricity generated, the Chinese system demonstrates lower impacts regarding fossil fuel and water consumption. This study can provide a scientific basis from the full lifecycle perspective for the low-carbon design and planning of A-CAES technology.

Keywords: compressed air energy storage; integrated hybrid LCA; environmental impact

绝热压缩空气储能(A-CAES)系统被认为是实现电力系统削峰填谷的可行技术之一[1-4]。该系统在储能阶段通过压缩机将环境空气压入储气装置，在释能阶段利用高压空气驱动透平发电，并通过对压缩热的回收与再利用，提高系统整体效率。相较于抽水蓄能等其他大规模储能技术，A-CAES 系统具有储能密度高、建设条件限制少、运行无需燃料消耗等显著优势[5-8]。随着该技术逐渐成熟，相关研究重点已从早期的可行性验证转向系统效率的进一步提升[9-10]。在众多提效途径中，采用相变材料(PCM)的压缩热存储技术因具备储热密度高、运行稳定、经济性较好等优点，近年来已成为研究热点之一[11-12]。然而，目前研究很少聚焦 A-CAES 的系统性环境影响，更少涉及 PCM 蓄热技术带来的环境效应[13]。因此，从制造、建设、运行、维护及报废等全生命周期视角评估 A-CAES 系统的环境影响显得尤为必要。

生命周期评估(LCA)作为“从摇篮到坟墓”的分析方法，能够系统评价产品生命周期各阶段(原材料开采、制造、使用、废弃与处理等)相关的环境影响[14-15]。Bouman 等[16]利用 LCA 方法分析了比利时一座 400 MW 风电场配套压缩空气储能系统的环境影响，发现 A-CAES 系统的环境影响对蓄热装置容量高度敏感。Denholm 等[17]研究了美国中西部地区储能系统分别在电网与风电供电条件下的环境影响，指出储能系统实际能源消耗与温室气体(GHGs)排放通常会高于模型结果，且当系统与可持续能源耦合时，其温室气体排放低于化石燃料发电。

但上述对 A-CAES 的传统生命周期评估通常仅涵盖有限工艺环节，其评估范围难以全面反映系统的真实环境影响[18-19]。为弥补这一不足，融合过程 LCA 与投入产出分析的混合生命周期方法应运而生，其能够更完整地刻画技术系统与背景经济系统之间的交互效应。在此框架下，Hertwich 与 Gibon 提出的集成情景的技术混合环境经济模型(THEMIS)为一种具有代表性的混合生命周期评估工具[20-22]。该模型能够在指定情景与区域背景下，系统评估技术系统的环境影响，并充分考虑技术系统与背景经济系统之间的动态交互效应[23-24]。为此，本文利用 THEMIS 对采用相变材料进行蓄热，并接入我国安徽省马鞍山市电网的 A-CAES 系统进行环境影响量化。论文开展了系统性的环境影响研究，对比分析了不同类型及组合的 PCM 材料在蓄热罐中的环境绩效，以寻找最优材料选择。此外，本文重点分析了系统在不同建设年份(2010、2030、2050 年)所造成的细颗粒物(PM2.5)排放，这对我国大气污染研究具有一定参考意义。

1　方法与数据

A-CAES 系统示意图如图 1 所示，系统主要由压缩机、空气透平、蓄热罐以及储气库构成。在储能阶段，压缩机组由富余电能驱动，将环境空气压缩至高压(1→2)，压缩过程中产生的热能由蓄热介质储存(2→3)。在释能阶段，高压空气首先通过蓄热罐进行预热(4→5)，随后流经节流阀并进入空气透平中膨胀(5→7)，带动发电机发电。图 2 为蓄热器中相变材料

的填充方式，图中 T_i 为第 i 层相变材料的相变温度[12]。本研究主要聚焦 4 个主要组件(压缩机、透平、蓄热罐、储气库)基础设施的建设、制造、施工、运行与维护所带来的环境影响评估[16]。在此，定义 1 kW·h 的输出电量为 A-CAES 系统评估的功能单位。

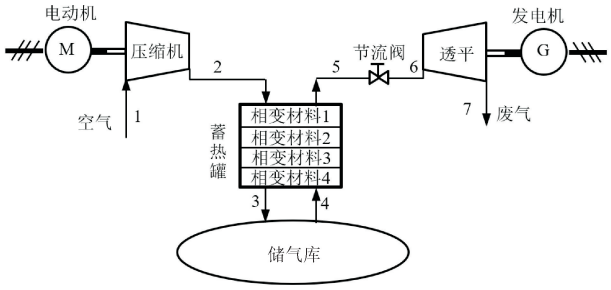


图 1 A-CAES 系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the A-CAES system

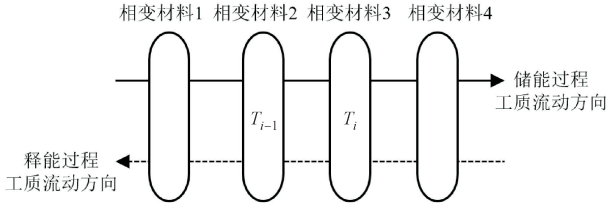


图 2 蓄热器中相变材料的布置示意图

Fig. 2 Schematic arrangement of phase change materials in the thermal energy storage unit

1.1 A-CAES 系统热力学指标

在 A-CAES 系统中，压缩机、透平、储气库以及蓄热罐(TES)等多个基本组件共同承担储能与释能功能，其中 TES 采用圆柱形填充床罐体结构。不同相变材料以分区的方式填充于同一蓄热罐内，各分区根据相变温度由高到低的规则沿气流流动方向依次布置，以匹配充放电阶段气体在 TES 内的温度梯度，从而提升热回收效率。根据系统产出的压缩热量可计算获得每种相变材料的质量[12]。基于能量和质量守恒，对每个组件进行热力学性能计算，获取各设备运行参数[3,12]。定义系统往返效率 η 为系统总发电量 $\sum \dot{W}_{\text{out}}$ 与总能耗 $\sum \dot{W}_{\text{in}}$ 之比，公式为

$$\eta = \sum \dot{W}_{\text{out}} \Big/ \sum \dot{W}_{\text{in}} \tag{1}$$

1.2 融合型混合生命周期模型

本文采用融合型混合生命周期模型 THEMIS 评估 A-CAES 系统产生的环境影响，优势如下[20]。

(1)纯过程型 LCA 往往受限于系统边界与数据可得性，易产生截断误差，部分上游投入被遗漏，从而低估环境影响。多区域投入产出模型(MRIO)分析虽具备全经济系统覆盖能力，但部门聚合较粗，难以准确表示 A-CAES 技术的具体工艺路线、材料构成与设备参数。作为过程 LCA 与 MRIO 融合的混合生命周期方法，THEMIS 模型通过扩展系统边界，在显著降低截断误差的同时保留了关键技术细节，兼顾了系统边界的完整性以及在技术层面上的可解释性。

(2)THEMIS 模型构建了电力系统的未来情景，可在不同情景年份下对电力结构等部门进行动态调整。A-CAES 的生命周期环境影响高度依赖电力系统：运行阶段的充电用电产生了显著的温室气体与污染物排放；建设阶段的材料与装备制造同样受电力结构的影响。因此，采用 THEMIS 模型可以实现 A-CAES 技术在电力系统的未来情景下的前瞻性评估。

在构建 THEMIS 模型时，对原始 Ecoinvent 和 EXIOBASE 数据库进行 4 类修正：技术数据优化、数据库更新、背景矩阵反馈以及前景过程构建。

步骤 1 由于技术更新的存在(如因效率提升与新技术引入而导致的材料使用量和能源消耗减少)，特别是技术效率的提升，数据库中的相关部门应根据情景进行相应调整。除了需要调整电力来源结构外，许多关键工业过程(如铝、钢、镍、锌等的生产)也应进行更新。例如，预计从 2010 年到 2030 年，铜制造过程中的电力消耗将减少约 3%[20]。

步骤 2 常规能源的排放因子需根据当前能源情景进行更新。例如，随着技术进步，燃煤电厂的常规排放降低。同时，调整背景数据库(包括生命周期清单(LCI)过程和多区域投入产出部门)，以匹配当前年份的生产与消费状况[20]。

步骤 3 背景系统需要利用前景过程数据对产品与技术模型进行更新，以减少或消除背景数据库中对新产品进行预测时产生的误差。本文 A-CAES 系统产生的电力作为电力结构的一部分，被用于制造新的 A-CAES 组件。然而，本文 A-CAES 系统的发电量与中国整体用电量相比非常小，可以忽略不计。

步骤 4 电力生产会影响许多关键技术，且是多种产品温室气体排放的主要来源。因此，前景过程包括发电技术以及研究者指定的其他过程。

上述步骤 1、2、3 中涉及的修正属于外生变量(基于对技术进步的预期)，而步骤 4 则是针对

THEMIS 中的内生变量。关于这些修改的更多说明可参见文献[20]。对应上述 4 个步骤，THEMIS 的技术矩阵 $\boldsymbol{A}_{\text{hybrid}}$ 如下

$$\boldsymbol{A}_{\text{hybrid}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A}_{\text{f}} & \boldsymbol{C}_{\text{d}} \\ \boldsymbol{C}_{\text{u}} & \boldsymbol{A}_{\text{LCA-IO}} \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{A}_{\text{f}}$ 是完整过程清单方阵，由直接投入数据和发电过程数据共同组成；矩阵 $\boldsymbol{C}_{\text{d}}$ 表示通往背景系统的下游截断；矩阵 $\boldsymbol{C}_{\text{u}}$ 表示通往前景过程的上游截断，$\boldsymbol{C}_{\text{d}}$ 和 $\boldsymbol{C}_{\text{u}}$ 被认为是融合型混合生命周期模型的关键组成部分[20]；$\boldsymbol{A}_{\text{LCA-IO}} = [\boldsymbol{A}_{\text{p}} \quad \boldsymbol{A}_{\text{ps}}; \quad \boldsymbol{A}_{\text{sp}} \quad \boldsymbol{A}_{\text{s}}]$，其中 $\boldsymbol{A}_{\text{p}}$ 和 $\boldsymbol{A}_{\text{s}}$ 分别表示包含 9 个世界区域的物理过程部门与投入产出部门，$\boldsymbol{A}_{\text{ps}}$ 表示将物理过程与经济部门关联的系数，$\boldsymbol{A}_{\text{sp}}$ 表示将经济部门与物理过程关联的系数。

$\boldsymbol{A}_{\text{f}}$ 含有 5 446 行与 5 446 列。相较于常规数据库中较粗的电力部门划分，THEMIS 模型框架中预先构建了电力过程矩阵，进一步细化并补充了多种电力供应技术，包括碳捕集与封存（CCS）条件下的燃煤发电、CCS 条件下的天然气发电、海洋与潮汐能发电、地热发电、太阳能光伏发电以及聚光太阳能发电等[20]。所以，$\boldsymbol{A}_{\text{f}}$ 矩阵是由 A-CAES 系统的技术矩阵与 THEMIS 模型框架中预先构建的电力过程矩阵共同组成。该矩阵维度在模型设定的所有情景年份中保持不变，变化的是随情景更新的技术矩阵参数。

$\boldsymbol{A}_{\text{LCA-IO}}$ 具有 5 914 行和 5 914 列，由 4 个子矩阵 $\boldsymbol{A}_{\text{p}}$、$\boldsymbol{A}_{\text{ps}}$、$\boldsymbol{A}_{\text{sp}}$ 和 $\boldsymbol{A}_{\text{s}}$ 组成。在 THEMIS 模型中，未考虑背景 LCA 过程与投入产出部门之间的关联关系。因此，4 087 行和 1 827 列的 $\boldsymbol{A}_{\text{ps}}$，以及 1 827 行和 4 987 列的 $\boldsymbol{A}_{\text{sp}}$，均被设定为零矩阵。

$\boldsymbol{C}_{\text{d}}$ 为 5 446 行和 5 914 列，被视为电力更新和模型集成的关键组成部分。$\boldsymbol{C}_{\text{u}}$ 为 5 914 行和 5 446 列，其中包含所有从背景系统流向前景过程的流量数据。

在上述模型基础上，环境影响量化值的公式为

$$\boldsymbol{d}_t = \boldsymbol{C}\boldsymbol{F}_t (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{A}_{\text{hybrid},t})^{-1} \boldsymbol{y}_t \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{d}_t$ 是 t 年份的环境影响量化值组成的向量；$\boldsymbol{C}$ 是全生命周期影响评价（LCIA）方法中环境影响评价因子的特征化矩阵；$\boldsymbol{F}_t$ 是 t 年份的环境压力矩阵；$\boldsymbol{A}_{\text{hybrid},t}$ 是 t 年份的技术矩阵；$\boldsymbol{I}$ 是单位矩阵；$\boldsymbol{y}_t$ 是 t 年份的需求向量（功能单元向量）。同时，采用贡献分析方法进一步考察各主要过程对各影响类别结果的贡献度 $\boldsymbol{D}_t$[20]，公式为

$$\boldsymbol{D}_t = \boldsymbol{C}\boldsymbol{F}_t (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{A}_{\text{hybrid},t})^{-1} \hat{\boldsymbol{y}}_t \tag{4}$$

本文中的 THEMIS 模型使用了 Ecoinvent 2.2 版本数据库以及多区域投入产出数据库 EXIOBASE。LCI 矩阵共包含 4 087 个过程、产品与服务，投入产出表涉及 9 个世界区域的 1 827 个经济部门。2010 年、2030 年和 2050 年电力生产与电网结构数据，来自中国国家能源局，用于更新 THEMIS 中相应的电力数据。此外，文章通过结合两种 LCIA 方法从排放与自然资源的角度对产品进行分析。对于排放可能带来的环境影响，采用美国环保署的减少和评估化学及其他环境影响的工具（TRACI）方法对酸化、气候变化、人类毒性等环境现象进行评估[21-22]。对于自然资源方面的影响，采用 ReCiPe LCIA 方法，该方法包含多项资源消耗和土地利用指标。两种 LCIA 方法的影响类别之间没有重叠，彼此独立。

1.3　过程数据及运行参数

本文中的 A-CAES 以位于中国安徽省含山县的一座废弃石膏矿硐作为储气库，该硐室储气体积约为 2 000 000 m^3，最大安全压力为 50 bar。为避免应力波动过大，最低运行压力设定为 35 bar。洞内无需大规模建设，仅需管道开挖与密封工作。用于空气进出口的管道其开挖与建设方式与井道工程相似，包括爆破与管道施工。管道长度为 400 m，直径为 3.5 m，可确保充放电过程中的空气快速流动。根据洞穴的开挖体积，对文献[16]的数据进行尺度化处理，获得空气进/出通道建设清单数据。硐室密封所需的混凝土与钢材的用量分别按材料密度 1.75、0.08 kg/m^3 计算，改造后硐室的预计使用寿命约为 80 a。

A-CAES 系统的储能电力来自区域电网。为了使 A-CAES 系统能够匹配安徽省电网负荷的调节需求，假设系统在最低电力需求阶段进行充电，并在峰值需求阶段进行放电。根据我国政府对含山地区日负荷波动的调查[25]，峰值负荷时段为上午 9:00—12:00 和下午 17:00—22:00；低谷负荷时段为夜间 23:00 至次日 8:00。为稳定电网负荷，同时降低压缩机和透平装置的成本，A-CAES 系统在整个负荷低谷时段进行储能（储气压力从 35 bar 提升至 50 bar），峰谷时段释放能量（储气压力从 50 bar 降低至 35 bar）。因此，系统每日低谷时段完成一次连续充电；两段峰值负荷窗口分别进行两次放电，其中早高峰放电 3 h、晚高峰放电 5 h，日累计放电 8 h；其余时段电网供需基本平衡，系统处于待机状态。

储能系统每年在设计工况下运行 350 d，运行参数见表 1。A-CAES 系统中相变材料物性参数见表 2。

表 1 A-CAES 系统的运行参数

Table 1 Operation parameters of the A-CAES system

参数	数值
储气最大压力/bar	50
储气最小压力/bar	35
空气透平排气温度/K	300.00
透平等熵效率	0.88
压缩机等熵效率	0.85
压缩功率/MW	459
膨胀功率/MW	322
充电阶段时长/h	9
放电阶段时长/h	8
每日充电次数	1
每日放电次数	2
储气体积/m^3	2 000 000

表 2 A-CAES 系统中相变材料物性参数

Table 2 Physical parameters of PCMs used in A-CAES system

相变材料	相变温度/K	潜热/(kJ·kg^{-1})
NaOH/KOH	450	222
1, 4-TPB	418	144
$CO(NH_2)_2$	406	251
石蜡基相变材料	363	197

尽管本文计算可获多类环境影响指标，但以下分析仅展示环境影响值大于 0.01 的类别：农用土地占用(ALO)、温室气体排放(CC)、化石能源消耗(FD)、淡水生态毒性物质排放(FE)、人体毒性物质排放(HT)、电离辐射(IR)、海洋生态毒性(ME)、自然土地转化(NLT)以及水资源消耗(WD)。

2 结果及分析

根据所建模型对 A-CAES 系统进行全生命周期性能评估。图 3 为 A-CAES 系统全生命周期分析的边界设置，包括压缩机(compressor)、透平(turbine)、储气库(air storage tank)、蓄热罐(thermal energy storage tank)部件的制造，系统运营与维护(operation)、交通运输(transportation)和其他电厂建设(construction)。

图 4 为评估流程示意图。不同 PCMs 方案下 A-CAES 系统最优系统效率见表 3，其中 2 种、3 种、4 种 PCM 方案分别对应 TES 内 2、3、4 个材料分区。可以发现，当系统使用 4 种 PCM(4PCMs)进行蓄热时，可获得最高效率 62.5%；采用 3 种 PCM(NaOH/KOH＋1，4-TPB＋石蜡基相变材料或 NaOH/KOH＋$CO(NH_2)_2$＋石蜡基相变材料作为蓄热材料时，系统效率均为 60.5%；使用 NaOH/KOH＋石蜡基相变材料作为蓄热介质时，最大效率为 57.6%。

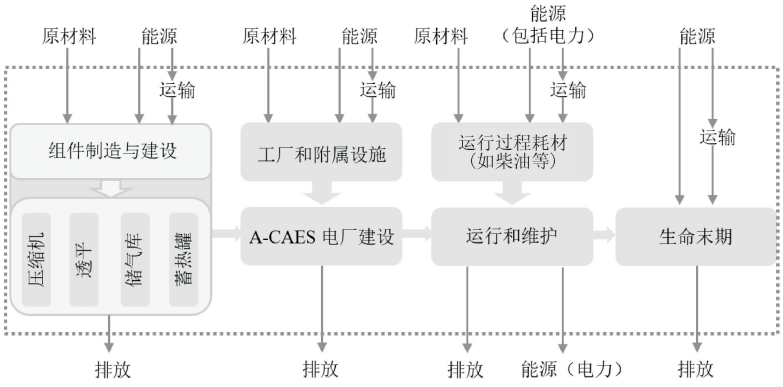


图 3 A-CAES 电站全生命周期分析边界

Fig. 3 Life cycle assessment boundaries of the A-CAES plant

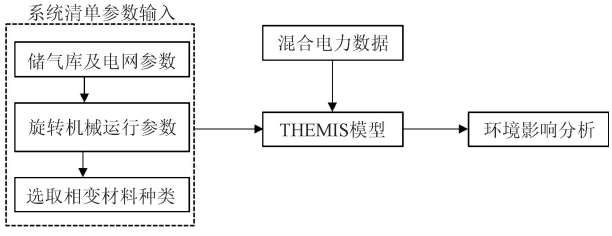


图 4 评估流程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the assessment process

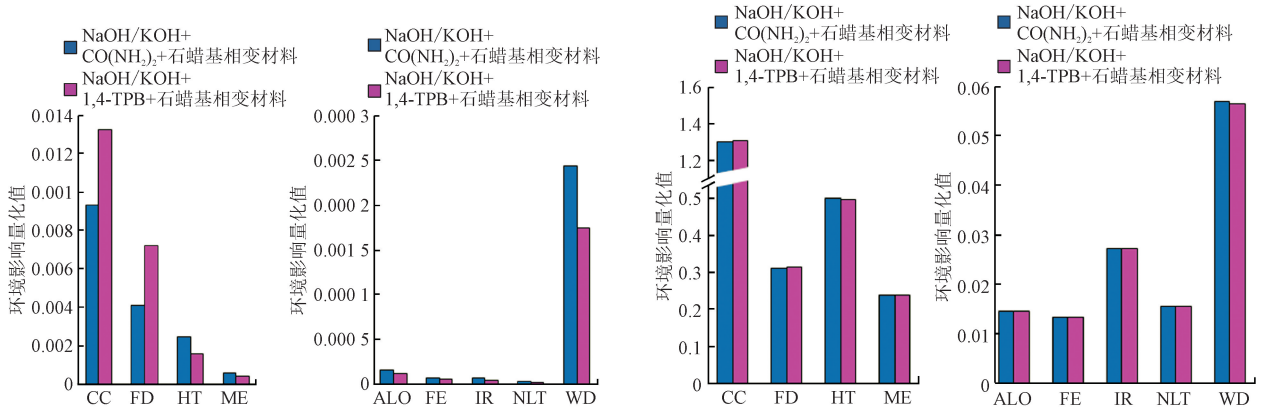
表 3 使用不同数量 PCM 时系统的最大系统效率

Table 3 Maximum round-trip efficiency of system by using different number of PCMs

PCMs 种类	最大系统效率/%
NaOH/KOH＋石蜡基相变材料	57.6
NaOH/KOH＋1，4-TPB＋石蜡基相变材料	60.5
NaOH/KOH＋$CO(NH_2)_2$＋石蜡基相变材料	60.5
NaOH/OH＋1，4-TPB＋$CO(NH_2)_2$＋石蜡基相变材料	62.5

2.1　相变材料的影响

对于表 3 中列出的两类 3PCMs 系统，蓄热器环境影响结果如图 5(a)所示。可以看到，在温室气体排放和化石燃料消耗方面，由 NaOH/KOH＋1，4-TPB＋石蜡基相变材料组成的蓄热介质相比于由 NaOH/KOH＋$CO(NH_2)_2$＋石蜡基相变材料组成的蓄热介质产生的环境影响值更高，这主要是由于不同相变材料的制造工艺和材料需求不同。然而，由 NaOH/OH＋$CO(NH_2)_2$＋石蜡基相变材料组成的材料体系在其他环境影响类别中产生更高影响。这意味着 1，4-TPB 对气候变化和化石资源消耗影响显著，而石蜡在其他影响类别(如人类毒性、海洋生态毒性、农业土地占用、淡水生态毒性、电离辐射、自然土地转化和水资源消耗)中具有重要作用。不同相变材料对 A-CAES 系统的影响如图 5(b)所示，NaOH/KOH＋$CO(NH_2)_2$＋石蜡基相变材料作为蓄热介质的系统在温室气体排放和化石消耗方面具有较低影响，但在其他环境影响类别影响显著。

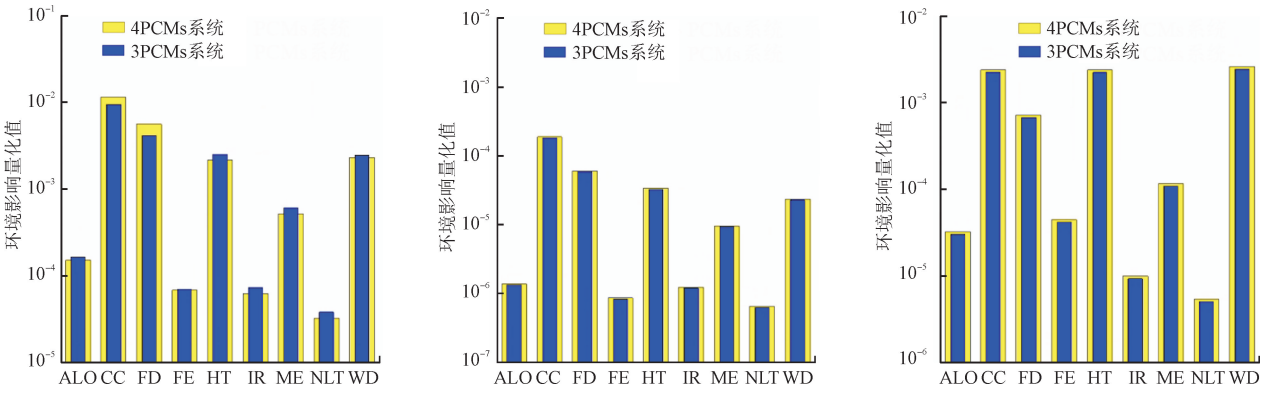


(a)采用 4 种 PCM 的系统运行与基础设施的环境影响　　(b)采用 3 种 PCM 的系统运行与基础设施的环境影响

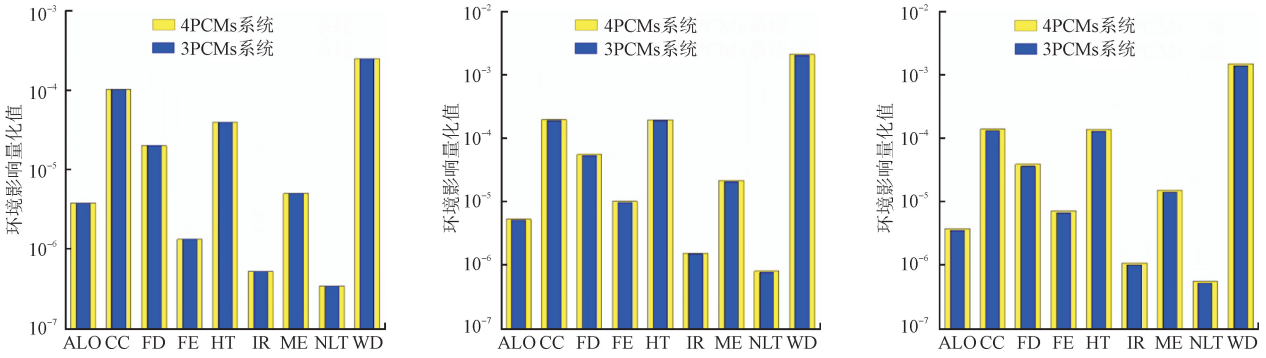
图 5　基于 1 kW·h 输出的蓄热设备与系统的影响比较

Fig. 5　Impact comparison of thermal energy storage equipment and system based on 1 kW·h output

基础设施(部件制造、运输与安装)在不同 PCM 配置的 A-CAES 系统中的贡献如图 6 所示。由于不同的热能回收能力导致材料消耗差异，因此 4PCMs 系统在部件运输、系统建设、旋转机械以及蓄热设备方面的影响均大于 3PCMs 系统。然而，储气库的影响在两类系统中基本相同。对于这两类系统，影响的主要贡献因素依次为系统建设、蓄热设备、旋转机械。图 5(b)与图 6 均基于 1 kW·h 电力输出，往返效率的倒数代表了充电功率消耗值，并计入前景过程。在多数情况下，4PCMs 系统中的各组件相较于 3PCMs 系统对应组件具有更高的环境影响，但 4PCMs 系统的总影响却低于 3PCMs 系统(如图 5(b)所示)。这意味着系统影响的主要因素是实际的储能电力，如表 4 所示。因此，相较于储能电量，单个组件对整个 A-CAES 电力系统环境影响的作用并不显著，提高往返效率在一定程度上是降低环境影响的有效途径。



(a)蓄热罐　　(b)交通运输　　(c)其他建设



(d)储气库 (e)压缩机 (f)透平

图 6 不同 A-CAES 系统的基础设施对环境影响

Fig. 6 Environmental impact of infrastructure for two different A-CAES systems

2.2 4PCMs 的 A-CAES 系统环境影响

表 4 为采用 4PCMs 配置的 A-CAES 系统前景矩阵过程贡献度占比。可以看到，储能电量对环境影响的贡献非常显著，如除水消耗占 84.5%外，其余大多数影响类别中，充电影响均占 90%以上。为了讨论基础设施(组件制造、运输与安装)的贡献，对表 4 的分析中本文不再考虑系统运行所用电力造成的影响。可以发现，温室气体排放的最大贡献来自蓄热罐，其次是系统建设和压缩机。其他设备在温室气体排放方面的影响可以忽略不计。海洋生态毒性也呈现类似趋势。此外，系统生命周期内的大部分化石燃料消耗源于蓄热设备的制造，特别是石蜡。在 A-CAES 系统中，大部分水资源消耗来自系统建设，其次为蓄热罐。压缩机、透平和储气库的对应贡献分别为 3.7%、2.6%和 0.4%，主要由钢材和混凝土生产造成。系统建设与蓄热设备在人体毒性方面的贡献最大，共占约 0.94%。从组件视角来看，蓄热设备对环境影响的贡献最高。这部分影响主要由 PCMs 以及蓄热罐建设所需的大量辅材(如混凝土，用于建造储罐与基础)引起。与蓄热罐制造相比，由于系统建设过程的物料与能源需求高，因此对水消耗与人体毒性有显著影响，1,4-DB 当量分别为 0.002 6 m^3 和 0.0024 kg，同时对温室气体排放和化石燃料消耗也有重要贡献。储气库对环境的负面影响较小，因为洞体开挖过程的影响未被计入。因此，通过优化压缩机与透平之间的功率匹配，可以优化 A-CAES系统的安装规模，从而减少系统建设带来的环境影响。

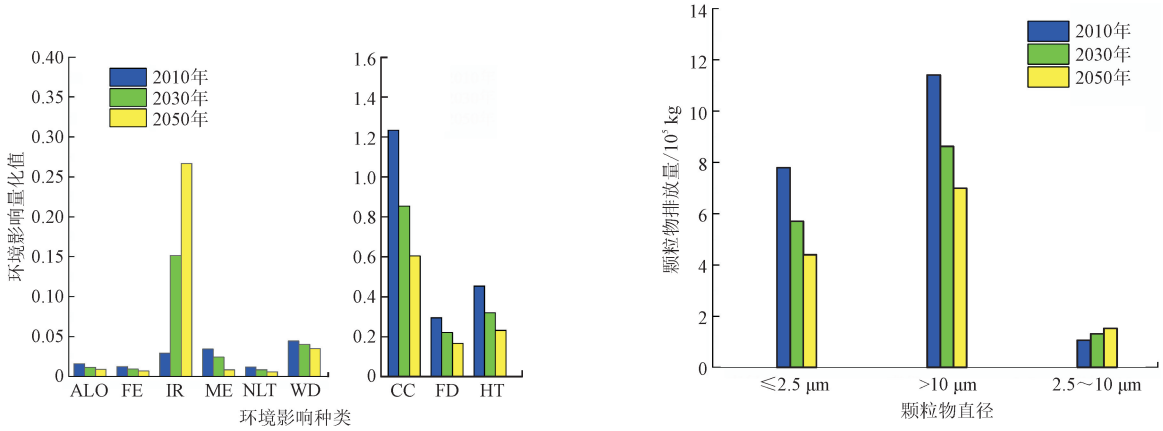
表 4 采用 4PCMs 配置的 A-CAES 系统前景矩阵过程贡献度占比

Table 4 Foreground contribution ratio in the prospect matrix of A-CAES with 4PCMs

环境影响类别	贡献度占比/%						
	透平	膨胀机	其他建设	蓄热器	储气库	交通运输	运营与维护
ALO	0.032	0.023	0.199	0.926	0.023	0.009	98.789
CC	0.015	0.011	0.187	0.894	0.008	0.015	98.870
FD	0.018	0.013	0.235	1.821	0.006	0.020	97.888
FE	0.077	0.054	0.343	0.528	0.010	0.007	98.981
HT	0.040	0.028	0.491	0.448	0.008	0.007	98.979
IR	0.006	0.004	0.037	0.236	0.002	0.005	99.710
ME	0.009	0.006	0.050	0.224	0.002	0.004	99.704
NLT	0.005	0.004	0.036	0.214	0.002	0.004	99.735
WD	3.702	2.604	4.609	4.116	0.434	0.042	84.493

图 7(a)为 A-CAES 系统分别于 2010 年、2030 年和 2050 年的环境影响。这些差异主要源于不同年份电网发电的燃料结构不同，相关数据来自我国电力企业联合会[25]。除电离辐射外，大多数环境影

响因素随时间推移而降低。电离辐射的增加主要是因为核电发电比例从 1.8% 上升至 18.1%。在 2010—2050 年期间，低碳技术的占比不断提升，而燃煤发电规模下降。就气候变化影响而言，从 2010—2030 年，温室气体排放减少约 0.406 kg；从 2030—2050 年，温室气体排放继续下降，但由于可再生能源增长逐渐趋于饱和，其下降幅度有所减缓。图 7(b)展示了当 A-CAES 系统的充电电力由弃风电供给时，2010—2050 年颗粒物排放的变化趋势。在此，弃风电被视为零环境影响的能源，以评估若 A-CAES 系统充分利用这些弃风电量可避免多少颗粒物排放。由于燃煤发电规模大幅下降，而燃煤发电是颗粒物排放的主要来源，因此 PM2.5 和 PM10 的排放量随着时间推移而减少。然而，PM2.5 和 PM10 排放量在未来略有增加，这与电网结构变化及技术进步有关。例如，核电站中铀资源利用与开采的增长，以及相关废物处理过程中会产生大量铀尘和具有肝肾毒性的真菌毒素。将 2010—2030 年与 2030—2050 年期间的 PM2.5 和 PM10 排放量变化进行对比可发现，前一时间段的下降更为显著，因为该阶段可再生能源占比增长 20%，而后一阶段仅为 14.8%[25]。



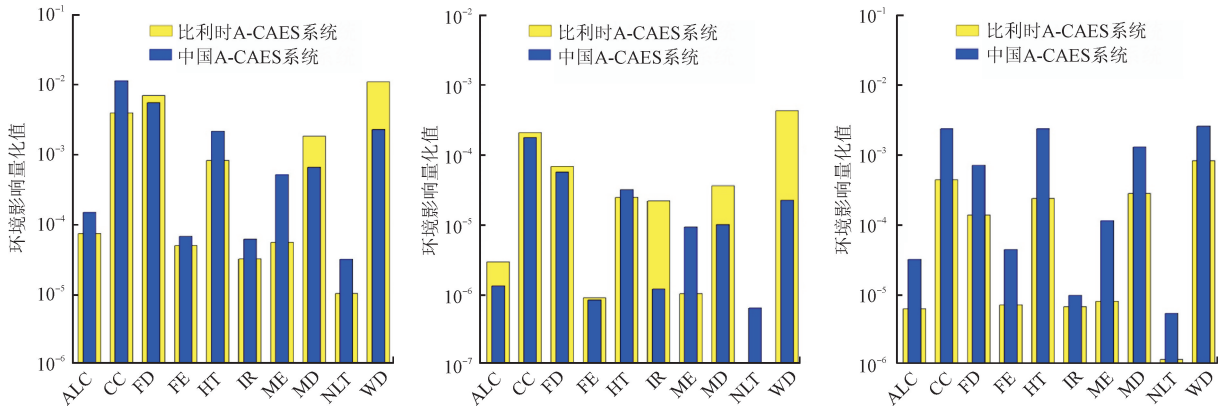
(a)不同年份建设 A-CAES 系统时其制造与建设带来的环境影响　　(b)不同年份 PM 排放的减少量

图 7　2010、2030 和 2050 年的环境影响及颗粒物排放

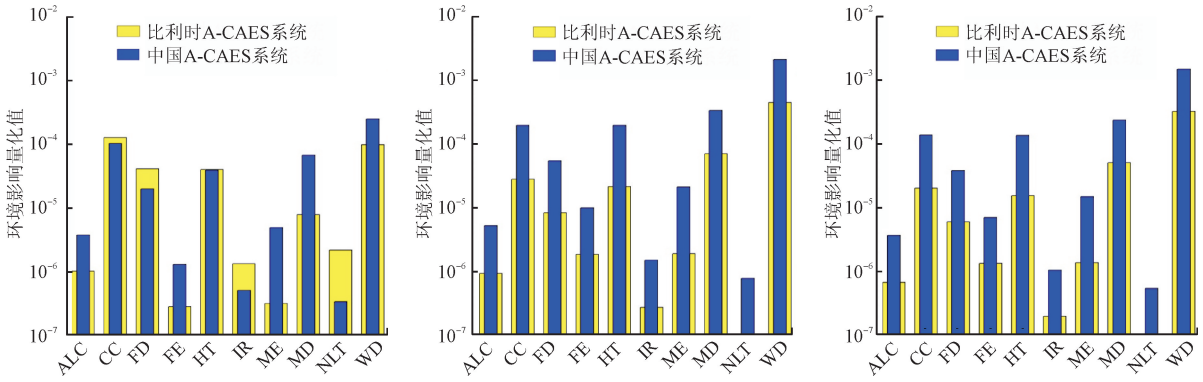
Fig. 7　Impacts and PM particles emission in 2010, 2030, and 2050

2.3　中国与比利时 A-CAES 系统影响比较

本节比较了中国 A-CAES 系统与比利时风电耦合 A-CAES 系统的环境影响。图 8 展示了压缩机、透平、储气库、运输及系统建设等环节的环境影响。对比分析表明，两国在系统设计、能源结构和技术水平方面的差异是影响结果的主要原因。比利时系统采用热矿物油(非相变材料)储热，其比热容低于相变材料(PCM)的潜热，因而需更大的设备规模与更多建筑材料(如混凝土与密封材料)。



(a)蓄热罐　　(b)交通运输　　(c)其他建设



(d)储气库 (e)压缩机 (f)膨胀机

图 8 比利时与中国的 A-CAES 系统影响比较

Fig. 8 Impact comparison of A-CAES system manufactured and constructed between Belgium and China

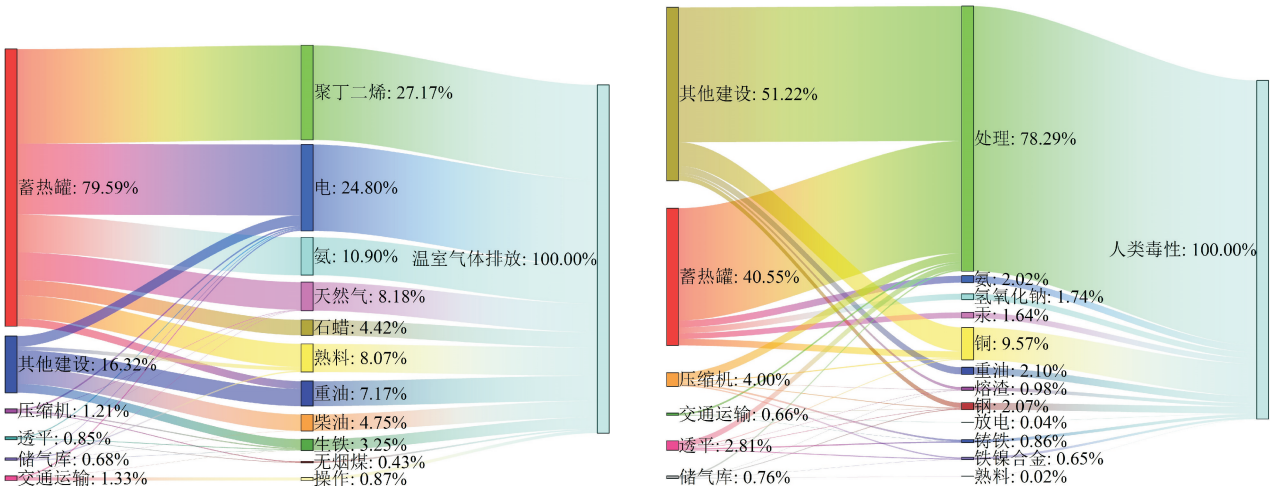
此外，比利时系统建设过程中的卡车与铁路运输距离分别为 140、1 260 km，远长于中国，导致其与运输相关的环境影响更高；其非相变材料蓄热罐在化石资源与水资源消耗方面也更具影响。中国电力结构以煤电为主，且发电效率、材料生产能耗等技术参数与比利时存在差距。随着中国未来电网中可再生能源比例提升，相关环境影响有望逐步降低。

2.4 环境影响贡献分析

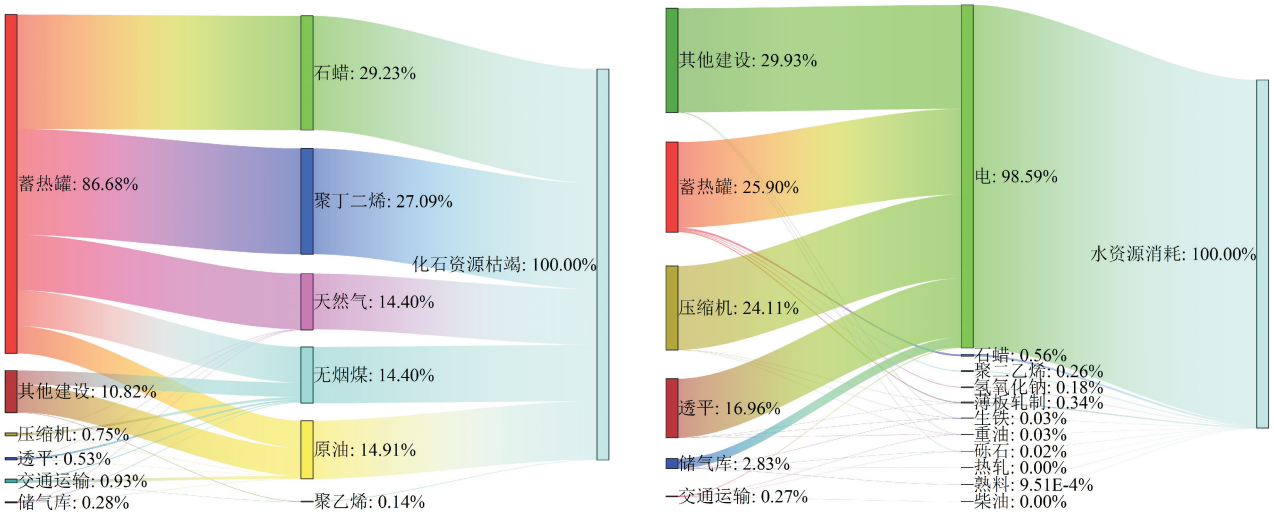
图 9 从材料与工艺层面展示了详细的环境贡献。图 9(a)～(c)表明，蓄热罐与系统建设对温室气体排放、化石资源消耗及人类毒性具有显著影响，这与前文结论一致。具体而言，若不考虑储能电力，材料制造(如聚丁二烯)和系统建设用电贡献了约 25%的温室气体排放，其中聚丁二烯因其生产依赖化石燃料(如煤)而成为主要来源。聚丁二烯与石蜡是温室气体排放和化石资源消耗的关键贡献者。在人类毒性方面，系统拆除过程的影响最为突出，主要来源于煤处置工艺。铜的使用贡献了约 9.6%的人类毒性影响，主要分布于系统建设与蓄热设备中；旋转机械中的铜使用亦贡献约 1%。

此外，金属制造过程耗水量大(如产 1 t 钢约需 8 t 水)，对水资源消耗具有显著影响。材料制造引起的水资源消耗占 98%以上，而系统建设环节约占 30%。因此，在维持运行性能不变的情况下，选用材料需求更低的压缩机与透平可有效降低系统资源消耗。例如，轴流式、离心式与活塞式压缩机在相同运行参数下材料用量不同，优化选型有助于减少 A-CAES 系统的整体环境影响。

从图 9 可以看出，热能储存部件中使用的石蜡和聚丁二烯对温室气体排放和化石资源消耗具有显著贡献。减少石蜡和聚丁二烯的使用量，或在保持往返效率相当的情况下，将其替换为环境影响较低的其他材料，是降低这两类影响的可行途径。潜在的替代材料包括六水氯化镁或乙酸盐，它们的相变温度与石蜡相近，但可能带来更低的环境影响。



(a)温室气体排放 (b)人类毒性



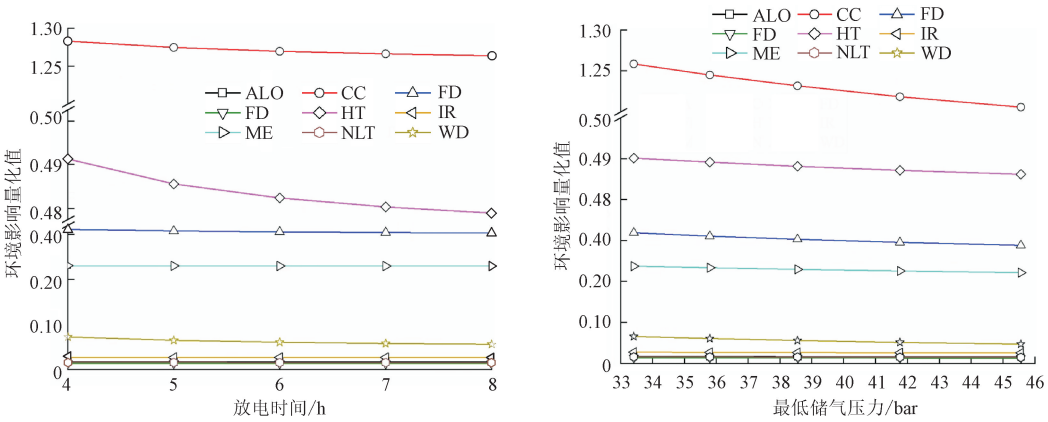
(c)化石资源枯竭　　(d)水资源消耗

图 9　主要环境影响的材料、工艺与产品贡献分析

Fig. 9　Materials, process, and product contribution towards the main impacts

2.5　敏感性分析

在敏感性分析中，本文考察了可能影响系统设计参数与环境性能的两个关键变量：①充电与放电时长，其通过改变压缩机和透平的额定功率需求，进而影响设备材料消耗；②储气库的最低运行压力，其与固定最高压力之间的压差决定了系统储能容量，较高的最低压力可减小压力循环幅值，从而降低储气库疲劳损伤、延长使用寿命。图 10 为敏感性分析结果。随着放电时间的延长，各类环境影响均呈下降趋势，这主要源于透平发电功率降低所带来的材料节约。在储能时间方面，系统环境影响主要受压缩机与蓄热设备支配：在固定储气压力条件下，延长充电时间可降低压缩机功率与蓄热负荷，从而减少相应材料用量。综合分析，放电时间为 8 h 时系统环境影响最低。



(a)放电时间的敏感性分析　　(b)最低储气压力的敏感性分析

图 10　放电时间与最低储气压力的敏感性分析

Fig. 10　Sensitivity analysis for full discharge time and minimum pressure

储气库最小压力直接影响系统储能能力。由图 10 可见，随着最小压力增大，环境影响逐步下降，并在 46 bar 时达到最低。其原因是：较低的最小压力虽可提升储能量，但会导致蓄热系统规模与材料用量大幅增加，而后者是环境影响的主要来源之一。计算表明，最小压力从 33 bar 增至 46 bar 可使单位温室气体排放减少约 0.105 kg/(kW·h)，在全生命周期内累计减排约 3.27×10^4 t。

3 结 论

(1)在系统的整个生命周期内,用于系统运行的电力占据了绝大部分环境影响(约 90%),远高于制造和建设所产生的影响。基于我国的电力结构,A-CAES 基础设施(即部件制造、运输和安装)的水资源消耗、化石燃料消耗、人类毒性和自然土地转化分别贡献了 15.5%、2.1%、1.0%和 0.3%。

(2)基础设施产生的温室气体排放仅占总排放量的 1.1%,其中机械设备和系统建设是主要贡献者。根据敏感性分析结果,在保持储气压力恒定的条件下,延长释能时间或减小储气压差可以降低环境影响。

(3)使用环境影响更低的 PCMs 来替代聚丁二烯、石蜡等材料,或提高系统运行效率可降低系统生命周期内产生的环境影响。本文的研究结果对于我国能源政策的制定具有一定参考价值。

参考文献:

[1] 赵朝成,刘明,倪广涛,等. 耦合熔盐储热的补燃式压缩空气储能系统热力性能分析 [J]. 工程热物理学报,2025,46(1):42-50.
Zhao Chaocheng, Liu Ming, Ni Guangtao, et al. Thermodynamic analysis on the afterburning-type compressed air energy storage system integrated with molten salt thermal storage [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2025, 46(1): 42-50.

[2] 李瑞雄,张宇飞,郭子奥,等. 液气复合压缩储能:一种高效低成本压缩空气储能新技术 [J]. 西安交通大学学报,2026,60:115-127.
Li Ruixiong, Zhang Yufei, Guo Ziao, et al. Liquid-gas hybrid compressed energy storage: a novel high-efficiency and low-cost compressed air energy storage technology [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2026, 60: 115-127.

[3] 葛刚强,王焕然,李瑞雄,等. 压缩空气储能蓄热器性能分析和优化设计 [J]. 西安交通大学学报,2023,57(1):45-54.
Ge Gangqiang, Wang Huanran, Li Ruixiong, et al. Performance analysis and optimization design of heat accumulator in compressed air energy storage [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(1): 45-54.

[4] Zhang Xinjing, Li Yang, Gao Ziyu, et al. Overview of dynamic operation strategies for advanced compressed air energy storage [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 66: 107408.

[5] Luo Xing, Wang Jihong, Krupke C, et al. Modelling study, efficiency analysis and optimisation of large-scale adiabatic compressed air energy storage systems with low-temperature thermal storage [J]. Applied Energy, 2016, 162: 589-600.

[6] 李保岐,何阳,陈海生,等. 空气补热型与耦合热泵型压缩空气储能系统供热能力研究 [J]. 西安交通大学学报,2026,60:24-34.
Li Baoqi, He Yang, Chen Haisheng, et al. Study on the heating capacity of air-supplemented heating and heat pump-coupled compressed air energy storage systems [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2026, 60: 24-34.

[7] Chen Longxiang, Zhang Liugan, Guo Weikang, et al. Dynamic analysis of an adiabatic compressed air energy storage system with temperature-regulated in air tanks [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 206: 114862.

[8] Chen Longxiang, Zhang Liugan, Wang Yongzhen, et al. Design and performance evaluation of a novel system integrating water-based carbon capture with adiabatic compressed air energy storage [J]. Energy Conversion and Management, 2023, 276: 116583.

[9] Li Ruixiong, Tao Rui, Yao Erren, et al. Decoupling heat-pressure potential energy of compressed air energy storage system: using near-isothermal compressing and thermal energy storage [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 63: 107017.

[10] Li Ruixiong, Tao Rui, Yao Erren, et al. Comprehensive thermo-exploration of a near-isothermal compressed air energy storage system with a pre-compressing process and heat pump discharging [J]. Energy, 2023, 268: 126609.

[11] Tessier M J, Floros M C, Bouzidi L, et al. Exergy analysis of an adiabatic compressed air energy storage system using a cascade of phase change materials [J]. Energy, 2016, 106: 528-534.

[12] Li Ruixiong, Zhang Yan, Chen Hao, et al. Exploring thermodynamic potential of multiple phase change thermal energy storage for adiabatic compressed air energy storage system [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 33: 102054.

[13] Li Ruixiong, Zhang Haoran, Wang Huanran, et al. Integrated hybrid life cycle assessment and contribution analysis for CO_2 emission and energy consumption of a concentrated solar power plant in China [J]. Energy, 2019, 174: 310-322.

[14] Berrill P, Arvesen A, Scholz Y, et al. Environmental

impacts of high penetration renewable energy scenarios for Europe [J]. Environmental Research Letters, 2016, 11(1): 014012.

[15] Tu Qingshi, Guo Jing, Li Nan, et al. Mitigating grand challenges in life cycle inventory modeling through the applications of large language models [J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(44): 19595-19603.

[16] Bouman E A, Øberg M M, Hertwich E G. Environmental impacts of balancing offshore wind power with compressed air energy storage (CAES) [J]. Energy, 2016, 95: 91-98.

[17] Denholm P, Sioshansi R. The value of compressed air energy storage with wind in transmission-constrained electric power systems [J]. Energy Policy, 2009, 37(8): 3149-3158.

[18] 廖正海，杨怀伟，郑树海，等. 基于生命周期评估框架的绝缘油碳足迹核算：方法与实践 [J]. 高电压技术，2025，51(6)：2610-2619.
Liao Zhenghai, Yang Huaiwei, Zheng Shuhai, et al. Carbon footprint accounting for insulation oils based on life-cycle assessment framework: strategy and practice [J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(6): 2610-2619.

[19] Hertwich E G. Life cycle approaches to sustainable consumption: a critical review [J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(13): 4673-4684.

[20] Gibon T, Wood R, Arvesen A, et al. A methodology for integrated, multiregional life cycle assessment scenarios under large-scale technological change [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(18): 11218-11226.

[21] Bergesen J D, Heath G A, Gibon T, et al. Thin-film photovoltaic power generation offers decreasing greenhouse gas emissions and increasing environmental co-benefits in the long term [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(16): 9834-9843.

[22] Hertwich E G, Gibon T, Bouman E A, et al. Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(20): 6277-6282.

[23] Arvesen A, Völler S, Hung C R, et al. Emissions of electric vehicle charging in future scenarios: the effects of time of charging [J]. Journal of Industrial Ecology, 2021, 25(5): 1250-1263.

[24] Pehl M, Arvesen A, Humpenöder F, et al. Understanding future emissions from low-carbon power systems by integration of life-cycle assessment and integrated energy modelling [J]. Nature Energy, 2017, 2(12): 939-945.

[25] 中国电力企业联合会. 电力工业统计资料汇编 [M]. 北京：中国电力企业联合会出版社，2020.

（编辑　亢列梅）