

【环境与能源 / Environment and Energy】

·地热等多态清洁能源融合开发专题，策划人：崔宏志·

广东惠州惠热-1井地热资源经济性评价与开发模式优选

袁潮¹, 黄少鹏², 魏正安², 李献瑞³, 唐科¹, 张敏⁴

1) 深圳大学土木与交通工程学院, 广东深圳518060; 2) 深圳大学高等研究院, 广东深圳518060; 3) 人工智能与数字经济广东省实验室(深圳), 广东深圳 518107; 4) 广东省地质局惠州地质调查中心, 广东惠州 516008

摘要: 经济性评价与适应当地需求的开发模式优选是地热资源可持续发展的关键。中国南方地区经济发达、气候湿热, 对新能源尤其是低碳制冷需求强劲, 而该区域地热资源以深循环型中低温($< 150\text{ }^{\circ}\text{C}$) 水热系统为主, 适用于发电、制冷及直接利用。本研究以广东省惠州市黄沙洞地热田惠热-1井(井口温度 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$, 流量 $130\text{ m}^3/\text{h}$)为例, 以20 a为生命周期, 采用静态投资回收期、动态投资回收期、净现值(net present value, NPV)和平准化能源成本(levelized cost of energy, LCOE)4种经济评价方法, 对比分析有机朗肯发电循环(organic Rankine cycle, ORC)、吸收式制冷(absorption refrigeration system, ARS)和地热水直接利用系统(domestic water system, DWS)以单一或梯级共6种开发模式(ORC、ARS、ORC-ARS、ORC-DWS、ARS-DWS和ORC-ARS-DWS)的经济效益。结果表明: 对于惠热-1井, ARS-DWS两级梯级利用模式在动态投资回收期(1.42 a)、NPV($> 13.900 \times 10^3$ 万元)和LCOE(0.041元/(kW·h))等关键指标上均表现最优, 灵敏度分析进一步证实, 该模式在不同运行参数及电价波动下均保持良好的经济稳定性。结合案例实证, 提出中国南方中低温地热资源开发应优先采用“吸收式制冷+生活热水”的梯级利用模式。研究成果可为同类型资源开发提供量化决策依据。

关键词: 地热学; 中低温地热资源; 经济性评价; 吸收式制冷; 梯级利用; 开发模式优化; 平准化能源成本

中图分类号: P314

文献标志码: A

DOI: 10.3724/SP.J.1249.2025.06631

Economic evaluation and optimization of development models for geothermal resources of Well HR-1 in Huizhou, Guangdong

YUAN Chao¹, HUANG Shaopeng², WEI Zheng'an², LI Xianrui³, TANG Ke¹, and ZHANG Min⁴

1) College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

2) Institute for Advanced Study, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

3) Guangdong Laboratory of Artificial Intelligence and Digital Economy (SZ), Shenzhen 518107, Guangdong Province, P. R. China

4) Huizhou Geological Survey Center of Guangdong Geological Bureau, Huizhou 516008, Guangdong Province, P. R. China.

Abstract: Economic evaluation and the selection of development models suited to local needs are crucial for the sustainable development of geothermal resources. Southern China, characterized by a developed economy and a hot-

Received: 2025-07-31; Accepted: 2025-09-16; Online (CNKI): 2025-10-16

Foundation: National Natural Science Foundation of China (U20A2096); Shenzhen Basic Research Foundation (20200827003238001)

Corresponding author: Professor HUANG Shaopeng (shaopeng@szu.edu.cn)

Citation: YUAN Chao, HUANG Shaopeng, WEI Zheng'an, et al. Economic evaluation and optimization of development models for geothermal resources of Well HR-1 in Huizhou, Guangdong [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2025, 42(6): 631-640. (in Chinese)

Open access: This article is licensed under the CC BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



<http://journal.szu.edu.cn>

humid climate, exhibits a strong demand for new energy, particularly low-carbon cooling solutions. The geothermal resources in this region are mainly deep-circulation, medium-low-temperature ($< 150\text{ }^{\circ}\text{C}$) hydrothermal systems, suitable for power generation, cooling, and direct utilization. Taking Well HR-1 in the Huangshadong geothermal field of Huizhou, Guangdong Province (wellhead temperature $110\text{ }^{\circ}\text{C}$, flow rate $130\text{ m}^3/\text{h}$) as a case study, this research conducts a 20-year life-cycle economic evaluation employing four methods: static payback period (SPP), dynamic payback period (DPP), net present value (NPV), and levelized cost of energy (LCOE). The economic performance of six distinct development models is comparatively analyzed. Two of these models are single-purpose systems: organic Rankine cycle (ORC) and absorption refrigeration system (ARS), with domestic water system (DWS) serving as the tail water treatment component. The remaining four models are cascaded utilization systems: ORC-ARS, ORC-DWS, ARS-DWS, and ORC-ARS-DWS. The results demonstrate that for Well HR-1 as medium-low temperature geothermal resources, the two-stage ARS-DWS cascaded utilization model performs best across key economic indicators, with a DPP of 1.42 years, NPV exceeding 139 million CNY, as well as an LCOE of $0.041\text{ CNY}/(\text{kW}\cdot\text{h})$. Sensitivity analysis further confirms the economic stability of this model under varying operational parameters and electricity price fluctuations. Based on this case study, the research suggests that the medium-low temperature geothermal resources in Southern China should prioritize the ARS-DWS cascade utilization model. This study provides a quantitative decision-making basis for the development and utilization of similar geothermal resources in the region.

Key words: geothermics; medium-low-temperature geothermal resources; economic evaluation; absorption refrigeration; cascade utilization; development model optimization; levelized cost of energy (LCOE)

地球内部热能主要源于地球形成演化过程及其内部放射性同位素衰变^[1], 构成了储量巨大的地热资源基础。地热能作为清洁可再生能源, 在全球能源转型与碳中和战略实施中占据重要地位。中国地热资源以中低温($< 150\text{ }^{\circ}\text{C}$)水热型为主^[2], 其分布广泛、储量丰富的特征为多元化开发利用奠定了资源基础。

中低温水热型地热资源利用技术体系可分为直接利用和发电两大开发利用类型^[3]。直接利用涵盖工业应用(生鲜脱水、谷物干燥、化学制造和绿氢生产等)、农业应用(灌溉、水产养殖和温室加热等)及服务业应用(供暖制冷、医疗康养及温泉洗浴等)^[4]。中低温地热发电技术主要基于有机朗肯循环(organic Rankine cycle, ORC)和 Kalina 循环, 但面临投资成本高和热电转换效率低等关键技术限制, 其效率通常仅为直接供热($45\% \sim 60\%$)的 $1/3$ ^[5]。

中低温地热资源开发利用模式已趋向多元, 开发模式的选择应基于资源禀赋条件、区域需求特点及技术经济性能的综合考量, 以实现资源价值最大化。在全球范围, 目前地热供暖制冷占直接利用总量的 87.73% ^[6]。中国地热资源开发呈现明显的南北区域差异化特征。北方已形成以供暖为核心的地热开发技术体系, 在京津冀地区大气污染防治工程中产生了显著的环境减排效益, 推动中国地热直接

利用规模持续位居全球首位^[7]。然而, 在地热资源赋存丰富、经济基础雄厚、能源需求强劲的南方地区, 其地热资源开发规模却远不及北方。

与中国北方相比, 在高温高湿气候条件下, 南方对于地热资源应用需求更多的是制冷而不是供暖^[8-9], 尤其是中深层地热资源作为驱动热源的溴化锂吸收式制冷技术展现出明显的工程热力学优势^[10]。溴化锂吸收式制冷技术以水为制冷剂、溴化锂溶液为吸收剂, 通过吸收-解析热力循环实现制冷效应, 其技术优势在于直接利用中低温热能而非高品位电能, 实现能源品位合理匹配, 有效缓解电网峰值负荷压力, 在夏热冬暖的气候区具有巨大的应用潜力。

中国南方地区受亚热带季风气候影响形成对制冷能源的刚性需求, 在碳中和目标框架下对低碳清洁能源技术需求日趋紧迫。本研究以广东省惠州市黄沙洞地热田惠热-1 井(温度 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$, 流量 $130\text{ m}^3/\text{h}$)为典型案例, 通过采用静态投资回收期(static payback period, SPP)、动态投资回收期(dynamic payback period, DPP)、净现值(net present value, NPV)和平准化能源成本(levelized cost of energy, LCOE)4 种经济评价方法, 对 ORC、吸收式制冷(absorption refrigeration system, ARS)、ORC-ARS、ORC-地热水直接利用系统(domestic water system,

DWS)、ARS-DWS 和 ORC-ARS-DWS 等 6 种单一及梯级开发模式的经济效益进行了对比分析. 通过定量分析不同开发模式的投资收益特征、成本结构及风险要素, 识别影响中低温地热资源开发经济性的关键变量, 旨在为南方地区中低温地热资源开发模式优化提供科学决策依据, 推动中国东南沿海地区地热资源的高效利用与可持续开发.

1 南方地热开发模式分析

中低温地热发电、制冷和热水直接利用技术是适配我国南方资源的开发模式, 20 世纪 70 年代, 在广东丰顺建成了中国第 1 个地热电站, 福州则成功研制以 90 °C 地热流体为热源的双级氨吸收式制冷实验系统^[8]. 地热热水在文旅、康养、洗浴、养殖和烘干等方面的直接利用更是源远流长.

1.1 地热发电

目前, 在中低温地热发电中采用的多为以异丁烷作为循环工质的 ORC 热力发电技术, 循环工质在机组内循环时各个组件处的能量状态请扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图 S1. 发电机组主要包含透平机、中冷器、冷凝器、预热器及蒸发器等核心部件, 通过设置中冷器以优化系统热电转换效率, 蒸发压力与冷凝压力是决定 ORC 循环的发电性能的两个关键热力参数^[11-12]. 依据地热发电工质选择理论及低温地热 ORC 发电优化方法^[13], 结合区域气候特征约束, 在异丁烷最佳回注温度 70 °C 工况下, 设定系统蒸发压力 1.10 MPa、冷凝压力 0.45 MPa, 具体运行参数请扫描论文末页右下角二维码查看补充材料表 S1.

以异丁烷 ORC 温熵图(图 S1)为例进行分析, 该热力循环包括 4 个基本过程: ① 工质泵等熵压缩过程, 将低压液相异丁烷压缩至高压液相状态; ② 预热器和蒸发器中的等压加热过程, 工质依次经历显热加热和潜热相变, 最终形成高温高压饱和蒸汽; ③ 透平机等熵膨胀过程, 高参数蒸汽膨胀做功并降压降温; ④ 冷凝器等压凝结过程, 低压蒸汽释放潜热并冷凝为液相, 完成循环闭合. 该 ORC 系统通过工质的相变传热特性实现中低温热源的高效热-功转换(式 1 至式 4).

$$V_b \rho_b (h_{pro} - h_{inj}) = m_{wf} (h_1 - h_4) = V_{wf} \rho_{wf} (h_1 - h_{4*}) \quad (1)$$

$$E_t = V_{wf} \rho_{wf} (h_1 - h_2) \eta_g \quad (2)$$

$$E_b = V_b \rho_b (h_{pro} - h_{inj}) \quad (3)$$

$$\eta_e = \frac{V_{wf} \rho_{wf} (h_1 - h_2)}{V_b \rho_b (h_{pro} - h_{inj})} \quad (4)$$

其中, V_b 为循环地热水体积, 单位: m^3 ; ρ_b 为地热水在生产井口的密度, 单位: kg/m^3 ; V_{wf} 为循环工质体积, 单位: m^3 ; ρ_{wf} 为循环工质在状态预热器入口位置的密度, 单位: kg/m^3 ; m_{wf} 为注入流体质量, 单位: kg ; h_{pro} 和 h_{inj} 分别为生产井口和回灌井口所对应焓值, 单位: kJ/kg ; h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 和 h_{4*} 分别为透平机入口、透平机出口、冷凝器出口、工质泵出口和预热器入口工质状态的焓值, 单位: kJ/kg ; E_t 为可以用来转化电能的热量大小, 等于异丁烷工质在透平机中出入口状态能量差, 单位: kJ ; E_b 为发电系统单位时间输入能量, 单位: kJ ; η_g 和 η_e 分别为发电机效率和热电转换效率.

地热发电收益通常包括电力销售收入、政策补贴收入和其他附加收益等. 鉴于中国尚未出台地热发电专项电价补贴政策, 本研究只考虑源于电力销售的收益 P_{ORC} ,

$$P_{ORC} = Q_e I_e \quad (5)$$

其中, Q_e 是总电量, 单位: $kW \cdot h$; I_e 是电力销售电价, 单位: 元/($kW \cdot h$).

1.2 地热吸收式制冷

地热吸收式制冷是一种有别于压缩制冷的新型技术, 主要特点在于利用热源(天然气、工业废热、太阳能及地热能)驱动机组循环制冷. 目前, 吸收式制冷机组多以水为制冷剂、溴化锂溶液为吸收剂, 其吸收式制冷机组运行原理请扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图 S2. 吸收式制冷机组的工作流程可分为以下 4 个主要过程: ① 发生过程. 地热流体经高效换热设备向发生器供热, 驱动溴化锂-水二元工质溶液发生相变分离; 水从溶液中蒸发, 溴化锂溶液质量分数由初始 45% ~ 50% 浓缩至 55% ~ 65%, 完成热力驱动的气液分离. ② 冷凝过程. 发生器产生的过热蒸气制冷剂进入冷凝器, 在饱和温度及 10 kPa 左右的压力工况下, 通过间壁式换热释放显热及相变潜热(约 $2.300 \times 10^3 kJ/kg$), 凝结为饱和液体后经节流元件实现等焓膨胀降压. ③ 蒸发过程. 制冷剂经节流后压力急剧下降至 0.6 ~ 0.9 kPa 真空度, 在蒸发器内于 5 ~ 7 °C 低温工况下发生等焓蒸发相变, 从被冷却介质中吸收蒸发潜热(约 $2.500 \times 10^3 kJ/kg$), 实现有效的制冷负荷转移. ④ 吸收过程. 低压制冷剂蒸气基于溴化锂的强化学亲和性被高浓度吸收剂溶液快速吸收,

该过程为强放热反应(约 60 ~ 70 kJ/mol), 通过冷却介质连续排除吸收热以维持 25 ~ 40 °C 最佳吸收工况; 稀释后的溶液经溶液泵升压并预热后回流至发生器, 构成完整的热化学循环.

地热水在单位时间内传导给工质的热量为

$$Q_{\text{geo}} = V_w(\rho_{\text{in}}h_{\text{in}} - \rho_{\text{out}}h_{\text{out}})\eta_h \quad (6)$$

其中, V_w 为地热水的体积流量; h_{in} 和 h_{out} 分别为地热水的进出口焓值; ρ_{in} 和 ρ_{out} 分别为地热水的进出口密度; $\eta_h = 0.95$, 是地热水热交换率.

利用吸收式制冷系统的能效比(coefficient of performance, COP) δ_{COP} 为制冷量(输出)与驱动热能(输入)之间的比例计算系统制冷量.

$$\delta_{\text{COP}} = \frac{m_c(h_{\text{evap, in}} - h_{\text{evap, out}})}{m_w(h_{\text{geo, in}} - h_{\text{geo, out}})} = \frac{Q_c}{Q_{\text{in}}} \quad (7)$$

$$Q_c = Q_{\text{in}}\delta_{\text{COP}} \quad (8)$$

其中, Q_c 为系统的制冷量, 单位: kW·h; Q_{in} 为系统输入的热能量, 单位: kW·h; 对于地热吸收式制冷, $Q_{\text{in}} = Q_{\text{geo}}$; m_c 和 m_w 分别为循环工质质量和循环地热水质量, 单位: kg. $h_{\text{evap, in}}$ 和 $h_{\text{evap, out}}$ 分别为循环工质进出蒸发器的焓值, 单位: kJ/kg; $h_{\text{geo, in}}$ 和 $h_{\text{geo, out}}$ 分别为地热水进出口焓值, 单位: kJ/kg.

地热吸收式制冷系统的收益 P_{ARS} 由接入费和使用费构成,

$$P_{\text{ARS}} = P_s A + P_c w \quad (9)$$

其中, P_s 为接入费单价; A 为供冷面积, 单位: m^2 ; $A = 1000 Q_c / q_c$, Q_c 和 q_c 分别为吸收式制冷总量(单位: kW)和冷负荷密度(单位: W/m^2); P_c 为使用费单价; w 为用冷量, 单位: kW·h.

1.3 地热水直接利用系统

中国南方中低温地热水的直接利用主要包括温泉洗浴、生活用水供应、烘干和养殖等应用, 在技术经济性方面表现突出. 以广东丰顺地热田为例, 该项目利用地热水进行梯级利用并将尾水直接供给用水企业, 实现地热井-输送管网-终端用户的直接利用工艺流程, 经济效益显著^[14]. 该模式充分利用地热水温度适宜和水质优良的特点, 避免了换热过程中的能量损失, 具有系统效率高、投资相对较低和运行稳定等技术优势.

地热水 DWS 热能利用效率 η_D 为生活用水系统利用热量 Q_u 与地热系统所供给的总热量 Q_i 的比值,

$$\eta_D = \frac{Q_u}{Q_i} \times 100\% \quad (10)$$

年经济收益 P_{DWS} 为

$$P_{\text{DWS}} = \sum_{i=1}^n (P_i V_i) - P_{\text{cop}} \quad (11)$$

其中, n 为用水类别总数; P_i 为第 i 类用水价格; V_i 为第 i 类用水量; P_{cop} 为年运营成本.

2 经济评价方法

基于 SPP、DPP、NPV 和 LCOE 四种经济评价方法, 通过多维度量化项目财务绩效, 系统整合现金流、时间价值和能源成本等关键要素, 为开发模式优选和投资决策提供理论支撑, 确保地热项目实现经济效益最大化与资源可持续利用的双重目标.

1) SPP 是指项目投产后用项目年净收益偿还项目原始总投资所需的时间, 满足式(12)项目寿命 T ,

$$\sum_{t=0}^T \psi_t = 0 \quad (12)$$

其中, t 为项目运行时间, 单位: a; ψ_t 为第 t 年的净现金流量. SPP 可以通过列表的方法来计算, 能够直观地反映原始投资的回收速度, 但是忽略了项目之后可能产生的效益.

2) DPP 是考虑资金时间价值的投资回收期, 动态回收期 λ_{DPP} (单位: a) 为

$$\lambda_{\text{DPP}} = \sum_{t=0}^T \psi_t (1+j)^{-t} = 0 \quad (13)$$

其中, j 为贴现率(通常采用资本成本或要求的最低回报率). 相较于 SPP 指标, DPP 计算方法虽然更复杂, 需要贴现率计算, 但它提供了更准确的投资回收时间判断, 适用于需考虑资金成本或长期项目的评估.

3) NPV 法将项目全生命周期现金流按贴现率折现求和, 量化货币时间价值, 为投资决策提供客观依据. 净现值 P_{NPV} 为

$$P_{\text{NPV}} = \sum_{t=0}^T \frac{P_{\text{CF}, t}}{(1+j)^t} \quad (14)$$

其中, $P_{\text{CF}, t}$ 为第 t 年的现金流量, 初始投资($t=0$ 时)为负值. $P_{\text{NPV}} > 0$ 时, 表明项目具经济可行性; $P_{\text{NPV}} = 0$ 时, 满足最低回报要求; $P_{\text{NPV}} < 0$ 时, 则不具投资价值. 与 SPP 法相比较, 净现值法充分考虑了时间价值, 可以根据净值判断项目的可行性, 但难点是贴现率往往难以准确确定.

4) 地热资源开发项目的 LCOE^[15] 是将项目在整个寿命周期内的所有成本折现后与寿命周期内开发利用的热量或电量折现值进行比较, 计算得出的平

均能源成本.

$$P_{\text{LCOE}} = \frac{P_{\text{CCAP}} + \sum_{t=1}^T \frac{P_{\text{COM},t}}{(1+j)^t}}{\sum_{t=1}^T \frac{E_{\text{pro},t}}{(1+j)^t}} \quad (15)$$

其中, P_{CCAP} 为地热项目前期总成本, 包括资源勘探与评估、土地租赁、采矿许可、现场准备、地热钻井与井场建设、地面设施等费用; $P_{\text{COM},t}$ 为第 t 年操作和维护成本, 为井场、设备运行及维护成本之和; $E_{\text{pro},t}$ 为第 t 年热能或电能生产总量.

LCOE 方法不仅可以用于不同地热资源开发利用项目的经济评价与对比, 也可以用于地热项目与其他新能源(如太阳能、风能和水能)项目的比较.

3 惠热-1井案例分析

3.1 地热地质背景

惠热-1井是广东省惠州市黄沙洞地热田的标志性地热井, 位于惠城区矮陂镇丘陵地带, 构造上属欧亚大陆东南缘东南沿海褶皱带. 受太平洋板块和菲律宾海板块俯冲作用的影响, 这一构造区经历了多期次构造-岩浆活动, 特别是不同年代深断裂的反复活动, 为地热田的形成提供了良好的地质-构造条件^[16-19]. 黄沙洞地热田所在区域地层较全, 从寒武系到新近系均有出露. 区域内岩浆活动主要发

生在古生代和中生代, 以花岗岩质岩浆为主(惠州地区火成岩及主要断裂分布请扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图S3), 富含U、Th和K等放射性元素, 高生热率和高热导率共同导致黄沙洞地热田地表热流值高于华南地区平均水平^[20-23]. 惠热-1井由中国地质科学院于2016—2018年实施钻探, 终孔深度3 009 m, 在2 907 m深处测得地层温度127.7℃. 放喷试验结果显示: 井口稳定温度118.0℃, 工作压力0.22 MPa, 流量137~200 m³/h^[17]. 完井初期(2018年)受钻井作业影响, 钻孔上部温度偏高、下部温度偏低, 至2022年钻孔温度场已趋于稳定状态, 其重复测温曲线请扫描论文末页右下角二维码查看论文补充材料图S4. 在本研究经济评价中, 保守地取地热流体井口温度为110℃、流量130 m³/h.

3.2 开发模式及成本构成

基于ORC发电、ARS制冷和地热水DWS直接利用3种基础应用技术, 通过不同组合方式构建了6种地热利用模式进行对比分析(图1). 具体方案包括两种单一利用模式(ORC发电和ARS制冷模式)、3种2级梯级利用模式(ORC-ARS、ORC-DWS和ARS-DWS梯级模式)以及1种3级梯级利用模式(ORC-ARS-DWS综合模式), 上述6种地热开发模式分别对应图1中的A、B、A-B、A-C、B-C及A-B-C技术模块, 形成了从单一技术应用到多级梯级综合利用的完整开发体系.

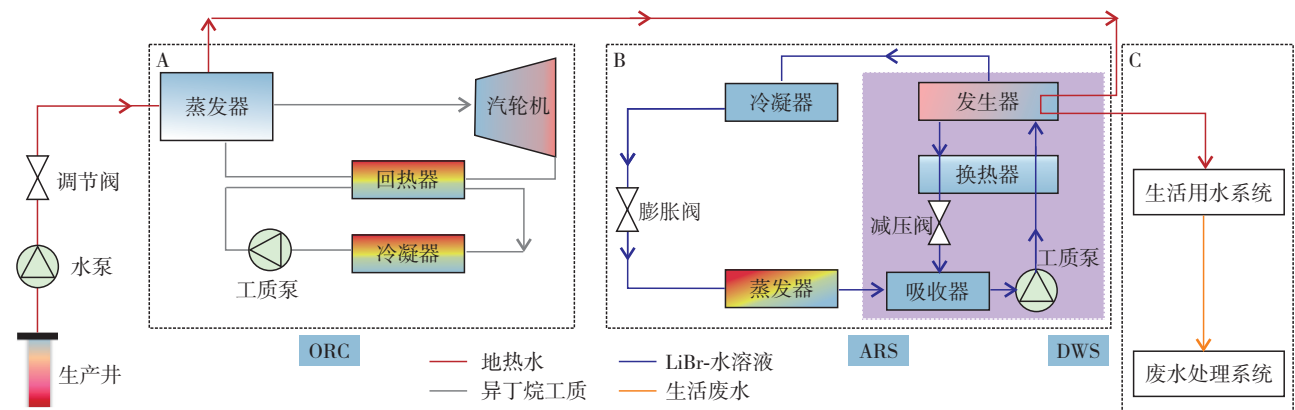


图1 惠热-1井潜在梯级利用开发模式

Fig. 1 Potential cascaded utilization and development models for the Well HR-1. Red solid line, light blue solid line, dark blue solid line, and orange solid line represent geothermal water, isobutane working fluid, LiBr-water solution, and domestic wastewater, respectively.

在前期投资方面, 根据惠热-1井项目执行单位提供的数据, 项目前期勘探及钻井成本约为1.00×10³万元, 参考惠州当地和广东省内地热项目的情况, 估算土地征收费用为0.050×10³万元, 矿权费

用设定为0.150×10³万元. 技术装备投资方面, 采用分组件成本核算, ORC发电系统地面机组设备总投资为0.520×10³万元; 溴化锂吸收式制冷系统按市场价600元/kW标准计算, 结合惠热-1井制冷装

机容量初步计算最大装机容量为 6.8×10^3 kW, 估算地面制冷设备成本约 0.408×10^3 万元. 综合各项成本要素后, ORC 发电模式和溴化锂 ARS 制冷模式的固定投资成本分别为 2.000×10^3 万元和 1.850×10^3 万元, 生活用水系统作为上述两种主要应用模式的尾水利用环节, 大部分前期勘探和开发成本已先期投入, 该模式固定投资成本为 240 万元. 3 种开发模式自身的能源消耗主要来自于机组及其生活用水系统的泵送设备, 其中, ORC 机组工质泵功率为 60 kW^[24], ARS 及 DWS 两种模式主要参考实际工程案例中的机组运行功率和实际泵功分别取值 24 kW 和 40 kW. 3 种基本应用模式的详细成本构成请扫描论文末页右下角二维码查看补充材料表 S2.

广东惠州属典型的亚热带季风气候区, 夏季高温多雨, 冬季干燥少雨, 年度气温和降水的时空分布具有明显的季节性差异. 根据历年气象数据分析, 供冷周期一般始于 4 月并延续至 11 月, 年均供冷时间长达 275 d^[10]. 考虑到地热开发可持续且不受天气变化特征, 单级及梯级利用模式运行时长取 8×10^3 h, 取惠热-1 井地热生产井流量为 130 m³/h, 年用地热量为 1.04×10^6 m³. 依据市场现有机组技术指标, ARS 的 COP 取 0.70^[25], ORC 的 COP 取 0.10^[26], 机组输出温度为 65 °C. 参考广东丰顺地热电站地热井的超过 50 a 的开发实践, 本研究不考虑回灌, 地热水用作生活用水系统的温度为 65 ~ 35 °C, 热效率为 0.875, 最终将以生活废水形式完成循环^[10].

成本计算中, 系统折现率取值为 5%、设备服役年限为 20 a, 电价参考广东省电力征收标准取

0.75 元/(kW·h). 根据住房和城乡建设部发布的暖通建筑空调设计标准^[27], 夏热冬暖面积冷负荷指标为 90 ~ 150 W/m², 本研究取 120 W/m². 我国南方地区集中供冷收费标准接入费约为 130 元/m², 单位冷量使用费为 0.56 元/(kW·h) 左右^[28]. 参照广东省地热水收费标准确定文中生活用水的征收标准为 3.82 元/m³. 另外, 考虑到制冷及地热水直接利用模式本身季节性和时变性特征, 计算整体收益时按照原始收益的 60% 予以折减, 各种开发模式的具体经济计算参数详见补充材料表 S3.

3.3 结果分析

惠热-1 井不同开发模式多经济评价指标计算结果表明(图 2), ORC 发电模式的经济表现欠佳(SPP 为 7.05 a, DPP 为 8.92 a, NPV 为 1.534×10^3 万元, LCOE 为 0.561 元/(kW·h)), 成本回收周期长, 项目盈利能力较弱, 单位资源开发成本高昂. ORC-DWS 梯级利用模式引入地热水直接利用系统的经济性能明显改善, SPP 和 DPP 分别缩短到 4.52 a 和 5.25 a, NPV 提升至 3.940×10^3 万元, LCOE 降低至 0.081 元/(kW·h). 对比 ORC 发电模式, ARS 制冷模式的相关经济指标(SPP 为 1.35 a, DPP 为 1.46 a, NPV 为 11.500×10^3 万元; LCOE 为 0.069 元/(kW·h))显示该模式具有能源利用率高、市场契合度强及更好的经济开发潜力. ARS-DWS 梯级开发模式的经济指标表现最优, 其 SPP 为 1.31 a, DPP 为 1.42 a, 项目 NPV 达到 13.900×10^3 万元, LCOE 低至 0.041 元/(kW·h), 该模式深刻体现了模式优选和梯级利用的双重优势. ORC-ARS 梯级利用模式也呈现出较好的经济效益, SPP 和 DPP 分别为 2.80 a 和 2.99 a, NPV 为 7.800×10^3 万元,

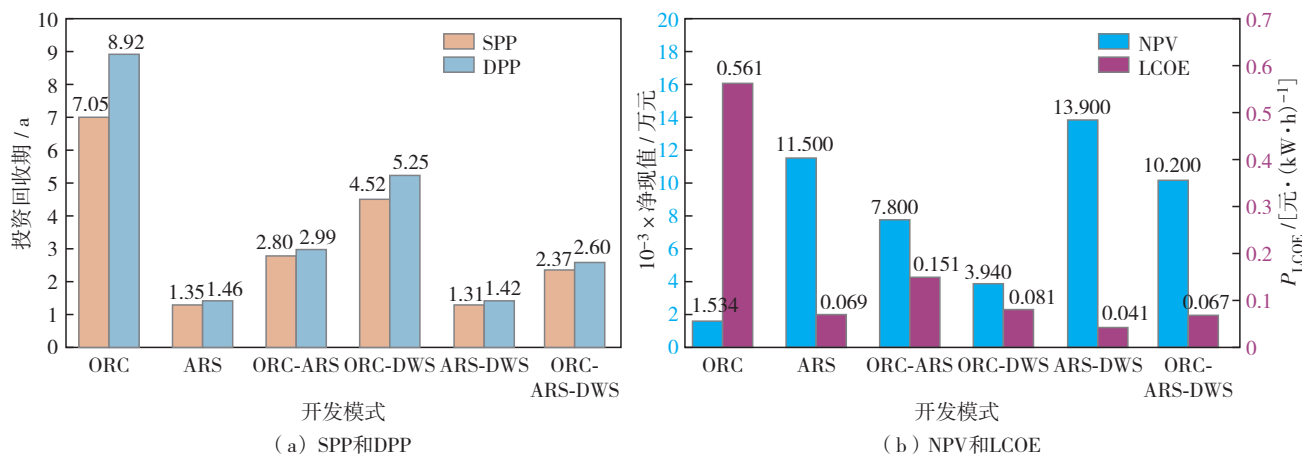


图 2 惠热-1 井多种开发模式经济指标对比

Fig. 2 Comparison of economic indicators for different development scenarios of Well HR-1. (a) SPP and DPP. (b) NPV and LCOE.

LCOE 为 0.151 元/(kW·h), 明显高于其他 2 级梯级利用模式, 原因是该模式高昂的初始投资. 3 级梯级综合模式 ORC-ARS-DWS 主要通过多级技术集成, 在保持合理投资回收期的同时, 更实现了多源开发路径, 提升中低温地热资源开发的适应性和利用率.

4 灵敏度分析

本研究选取折现率、初始投资、电力价格、年运行时间、输入温度和输入流量 6 个关键技术经济参数进行灵敏度分析. 上述参数作为影响地热能项目投资决策的重要变量, 其参数波动将影响项目的 SPP、DPP、NPV 和 LCOE 等关键经济指标, 通过灵敏度分析可为项目风险评估和投资决策提供科学依据.

4.1 折现率

折现率反映地热开发项目的投资风险和资金成本, 对于量化项目经济指标的波动性及投资决策的鲁棒性具有重要意义. 整体上, 6 种开发模式的经济表现均随折现率的增加而下降. DPP 随折现率增加的变化如补充材料图 S5(a) 所示, ORC 与 ORC-DWS 所受影响较大, 其他应用模式略有波动但总体平稳, 说明在相同折现率条件下, 固定投资大、收益小的应用模式需要更长的时间收回成本. 如补充材料图 S5(b) 所示, 净现值随着折现率的增加而减少, 净现值越大的应用模式下降速率越大. 观察 LCOE 的动态变化, ORC 显著增加, ORC-ARS 也有较明显的上升趋势, 从侧面反映 ORC 系列应用模式受市场变化及调节的影响较大, 在投资的稳健性方面稍显不足. 综合分析结果表明, 折现率变化对不同开发模式的经济影响程度存在差异: 以 ARS 为核心的开发模式具备较强的市场竞争优势和抗风险能力; 梯级利用模式能够实现多源收益, 有效改善单一技术的经济劣势; ORC 发电模式难以满足高收益需求, 需结合梯级利用方式以改善其经济性能.

4.2 初始投资

初始投资是地热项目经济可行性评估的核心要素, 初始投资规模直接决定项目的资本密集度和风险水平. 灵敏度计算结果请扫描论文末页右下角二维码查看论文补充材料图 S6, 由图 S6 可见, ORC 发电模式下, 初始投资增加 10% 时, 其 SPP 从 7.05 a 增至 7.76 a, 增幅接近 10%, DPP 增幅为

13%, NPV 降至 1.330×10^3 万元, LCOE 增至 0.595 元/(kW·h). 这一结果表明 ORC 发电技术对初始投资成本最为敏感, 且经济收益受市场投资环境的波动影响最大. ORC-DWS 模式的回收周期随初始投资增长略有增加, NPV 和 LCOE 数据波动小且处于低位区间, 说明梯级模式增强开发项目的稳定收益和利用效率. ARS 模式及 ARS-DWS 梯级利用模式各经济参数表现俱佳, 受初始投资变化的影响较小. ORC-ARS 模式的 NPV 波动小, 该模式的初始投资成本较高, LCOE 对成本增加相对敏感. ORC-ARS-DWS 模式的 SPP、DPP 和 LCOE 的数据表现仅次于 ARS-DWS, 表现出较强的投资抗风险能力. 综上所述, 高成本低收益开发模式更易受到初始投资变化的影响而显著降低开发可行性, 梯级利用模式可适当降低风险, 但更重要的是遵循市场规律、优选开发模式实现降本增效.

4.3 电力价格

受电价标准、市场交易机制和国家补贴政策的影响, 电力价格存在波动将直接影响 ORC 发电及其相关开发模式的经济表现, 电力价格灵敏度分析请扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图 S7. 如图 S7 所示, ORC 模式和 ORC-DWS 模式均对电价变化表现出较高灵敏度. 当电价从 0.65 元/(kW·h) 增至 0.85 元/(kW·h) 时, ORC 模式 SPP 从 8.46 a 大幅缩短至 6.05 a, DPP 从 11.28 a 降至 7.38 a, NPV 增至 2.120×10^3 万元. 按照目前上网电价 (0.65 ~ 0.75 元/(kW·h)), ORC 发电具备开发可行性, 但需要强调的是 LCOE 始终处在高位区间 (0.551 ~ 0.571 元/(kW·h)), 说明单纯提高上网电价也很难彻底摆脱该模式高成本低收益的现状; ORC-DWS 模式灵敏度较强但整体经济表现良好, 电价为 0.65 元/(kW·h) 时 SPP 和 DPP 相比 ORC 模式缩短了近 4 a, NPV 增加 2.6 倍, LCOE 也在 0.079 ~ 0.083 元/(kW·h) 的低位区间. ARS 模式及 ARS-DWS 模式电价波动仅对运维成本产生微小波动, 基本不受电价变化的影响, 两种模式回收期均小于 1.50 a. ORC-ARS 模式和 ORC-ARS-DWS 梯级开发模式随电价变化的影响程度适中, 各项经济指标平稳, 在电价波动情况下仍可保持良好的经济表现. 综合分析表明, 电力价格对 ORC 发电模式影响最大, 梯级利用模式收益稳定、来源多元、抗风险能力更强. 在当前上网电价水平下 (参考西藏羊八井上网电价: 0.75 元/(kW·h), 含税 0.9

元/(kW·h)), ORC 发电实现经济创收是可行的,但从投资收益率角度来看, ORC 发电模式经济表现仍较为受限,亟需寻求技术突破和系统提升.

4.4 年运行时间

年运行时间是影响地热项目收益水平和投资回收能力的重要参数,年运行时间灵敏度分析请扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图 S8. 如图 S8 所示, ORC 发电模式对运行时间最为敏感,当年运行时间由 7.5×10^3 h 提升至 8.5×10^3 h 时, SPP 从 7.58 a 降低至 6.60 a, 降幅近 13%, 净现值从 1.290×10^3 万元增至 1.770×10^3 万元, LCOE 从 0.588 元/(kW·h) 降至 0.538 元/(kW·h), 表明 ORC 发电模式在低收益和高成本双重约束下对长时间连续运行的依赖性. 相比之下, ORC-DWS 梯级模式虽同样受运行时间影响, 但经济表现相对稳健, SPP 从 4.84 a 降低至 4.24 a, 净现值从 3.530×10^3 万元增长至 4.350×10^3 万元, 增幅超 23%, LCOE 保持在 0.078 ~ 0.085 元/(kW·h) 的相对较低水平. ARS 模式和 ARS-DWS 梯级利用模式由于其本身的良好收益及经济稳定性, SPP、DPP 及 LCOE 经济指标波动小, NPV 明显增长表明, 以 ARS 制冷为核心的开发模式投资回收周期稳定且效益可观. 分析结果表明, ORC 发电模式受低收益高成本特征约束对运行时间高敏感, ARS 制冷及 DWS 直接利用基于高收益基础净现值变化更大. 地热发电需保持高负载率以确保经济可行性, ARS 制冷和 DWS 直接利用应用可通过灵活调节运营时间获得更优投资回报.

4.5 输入温度

ORC 及 ARS 机组的转换效率受输入温度的直接影响, 惠热-1 井机组输入温度变化对经济参数的影响请扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图 S9. 随着输入温度升高, SPP 和 DPP 显示 ORC 回收期急剧减小, ORC-DWS 模式的下降速率低于 ORC, ORC-ARS 及 ORC-ARS-DWS 保持相对稳定, ARS 及 ARS-DWS 受输入温度的影响较小; NPV 数据显示 ARS 及 ARS-DWS 模式呈线性快速增加; ORC 和 ORC-DWS 模式持续上升, 但增长速率不及 ARS 单一模式; ORC-ARS 系列应用模式在低输入温度条件下 (100 ~ 110 °C) 净现值基本保持不变, 当输入温度持续升高 (大于 110 °C) 后, 净现值开始增加, 其增长速率与 ORC 及 ORC-DWS 接近; LCOE 显示输入温度升高后 ORC 模式的能源平准化成本显著降

低, 其他模式较为稳定. 这说明 ORC 模式对输入温度的依赖性明显大于其他模式, 进一步证实了 ARS 模式及梯级利用能够有效保障中低温地热资源经济稳定开发.

4.6 输入流量

系统输入地热流体的流量是地热资源开发的另一关键参数, 依据黄沙洞惠热-1 井的流量变化范围进行参数灵敏性研究, 结果显示, SPP 和 DPP 均随流量的增加而减小, 回收期越大其降低幅度越大, 流量灵敏度分析请扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图 S10. 不同模式的 NPV 随流量的增加呈线性增长, 且初始流量 (100 m³/h) 条件下 NPV 越大的模式, 其增长幅度及速率也越大. LCOE 方面, ORC 及 ORC-ARS 受输入流量变化的影响明显, 其他模式略有降低但幅度均较微小, 再次证明了初始投资成本过高且收益欠佳的地热开发模式 (ORC 和 ORC-ARS) 对资源禀赋的要求更高, 合理的模式选择及有效的成本控制是克服资源禀赋限制的关键途径.

5 结 论

1) 吸收式制冷开发模式具有显著经济优势. ARS 制冷模式下静态投资回收期为 1.35 a, 动态投资回收期为 1.46 a, 净现值为 11.500×10^3 万元, LCOE 为 0.069 元/(kW·h). ARS-DWS 梯级模式经济指标更优, SPP、DPP 分别减至 1.31 a 和 1.42 a, 净现值 13.900×10^3 万元, LCOE 降至 0.041 元/(kW·h), 该开发模式与南方地区夏热冬暖气候特征下的制冷能源需求高度匹配, 具备良好的市场适应性和开发前景.

2) ORC 模式面临经济可行性挑战. ORC 发电模式 SPP 为 7.05 a, DPP 为 8.92 a, 净现值为 1.534×10^3 万元, LCOE 达 0.561 元/(kW·h). 受限于中低温地热 10% 的热电转换效率和较高设备成本, 在现行电价体系下经济竞争力不足.

3) 梯级利用开发模式显著提升了开发效益. ORC-DWS 梯级模式将 ORC 发电模式 DPP 从 8.92 a 缩短至 5.25 a, 净现值增至 3.940×10^3 万元. ORC-ARS-DWS 三级模式 DPP 为 2.60 a, 净现值 10.200×10^3 万元, 证实梯级利用能有效改善单一开发模式的经济效益.

4) 参数敏感性分析结果表明, ORC 发电系统

对温度和流量参数敏感性高,经济性严重依赖资源品质;ARS制冷系统适应性强,受资源变化影响小.双工质发电经济优化的灵敏度分析显示,ORC发电系统关键途径包括:电价机制优化(电价高于0.75元/(kW·h))、降低设备成本并提升转换效率、保障高负载率运行(年运行时间从 7.5×10^3 h增至 8.5×10^3 h,可缩短投资回收期13%以上).梯级利用技术可显著降低对资源禀赋依赖,提升经济稳定性,基础负荷运行配合梯级利用成为实现中低温地热资源经济开发的最优路径.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U20A2096);深圳市基础研究计划资助项目(20200827003238001)

作者简介:袁潮(2250471015@email.szu.edu),深圳大学博士研究生.研究方向:地热资源开发经济性评价与数值模拟.

引文:袁潮,黄少鹏,魏正安,等.广东惠州惠热-1井地热资源经济性评价与开发模式优选[J].深圳大学学报理工版,2025,42(6):631-640.

参考文献 / References:

- [1] HUANG Shaopeng. Geothermal energy in China [J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(8): 557-560.
- [2] 汪集旻. 能源环境危机下的地热能开发[J]. 科技导报, 2012, 30(4): 3.
WANG Jiyang. Geothermal energy development under energy and environmental crisis [J]. *Science & Technology Review*, 2012, 30(4): 3. (in Chinese)
- [3] HADJIAT M M, MRAOUI A, OUALI S, et al. Assessment of geothermal energy use with thermoelectric generator for hydrogen production [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(75): 37545-37555.
- [4] ALHUYI-NAZARI M, MUKHTAR A, YASIR A S H M, et al. Applications of geothermal sources for absorption chillers as efficient and clean cooling technologies for buildings: a comprehensive review [J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 82: 108340.
- [5] LUND J W, HUTTRER G W, TOTH A N. Characteristics and trends in geothermal development and use, 1995 to 2020 [J]. *Geothermics*, 2022, 105: 102522.
- [6] DA Junya, LI Ming, LI Guoliang, et al. Simulation and experiment of a photovoltaic-air source heat pump system with thermal energy storage for heating and domestic hot water supply [J]. *Building Simulation*, 2023, 16: 1897-1913.
- [7] 庞忠和, 孔彦龙, 庞菊梅, 等. 雄安新区地热资源与开发利用研究[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(11): 1224-1230.
PANG Zhonghe, KONG Yanlong, PANG Jumei, et al. Geothermal resources and development in Xiong'an New Area [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32(11): 1224-1230. (in Chinese)
- [8] 黄德斌. 福州建成我国第一套地热制冷装置[J]. 制冷技术, 1982(3): 15-16.
HUANG Defu. Fuzhou completes China's first geothermal cooling system [J]. *Chinese Journal of Refrigeration Technology*, 1982 (3): 15-16. (in Chinese)
- [9] 马伟斌, 夏文慧, 余传拔. 热水型溴化锂两级吸收式制冷机在工业中的应用[J]. 制冷, 1998(4): 37-40.
MA Weibin, XIA Wenhui, YU Chuanfu. Application of hot water type lithium bromide double-stage absorption chiller in industry [J]. *Refrigeration*, 1998 (4): 37-40. (in Chinese)
- [10] 姚远, 龚宇烈, 陆振能, 等. 中深层地热制冷技术在我国南方地区的应用与展望[J]. 科技促进发展, 2020, 16(3): 352-358.
YAO Yuan, GONG Yulie, LU Zhenheng, et al. Application and prospect of mid-deep geothermal refrigeration technology in South China [J]. *Science & Technology for Development*, 2020, 16(3): 352-358. (in Chinese)
- [11] 王永真, 罗向龙, 陈颖, 等. 地热水双级吸收式制冷系统的火用经济分析[J]. 广东工业大学学报, 2015, 32(01): 42-49.
WANG Yongzhen, LUO Xianglong, CHEN Ying, et al. Exergoeconomic analysis of a two-stage absorption refrigeration system using the waste geothermal water [J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2015, 32 (01): 42-49. (in Chinese)
- [12] 陈然, 刘强, 蒙冬玉. 过冷度对地热发电非共沸工质有机朗肯循环热力性能的影响[J]. 发电技术, 2020, 41(2): 190-197.
CHEN Ran, LIU Qiang, MENG Dongyu. Effect of subcooling on thermal performance of organic Rankine cycle with zeotropic mixture in geothermal power generation [J]. *Power Generation Technology*, 2020, 41(2): 190-197. (in Chinese)
- [13] 王建永, 王江峰, 王红阳, 等. 有机朗肯循环地热发电系统工质选择[J]. 工程热物理学报, 2017, 38(1): 11-17.
WANG Jianyong, WANG Jiangfeng, WANG Hongyang, et al. Selection of working fluid for organic Rankine cycle used in geothermal power plant [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(1): 11-17. (in Chinese)
- [14] 马伟斌, 龚宇烈, 赵黛青, 等. 我国地热能开发利用现状与发展[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(2): 199-207.
MA Weibin, GONG Yulie, ZHAO Daiqing, et al.

- Geothermal energy exploitation, utilization, and its development trend in China [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2016, 31(2): 199-207. (in Chinese)
- [15] KE Tingting, HUANG Shaopeng, XU Wei, et al. Evaluation of the multi-doublet performance in sandstone reservoirs using thermal-hydraulic modeling and economic analysis [J]. *Geothermics*, 2022, 98: 102273.
- [16] 张敏, 旷健, 肖志才, 等. 广东惠州燕山期以来地质构造演化: 对华南构造的新启示[J]. *地球科学*, 2021, 46(1): 242-258.
ZHANG Min, KUANG Jian, XIAO Zhicai, et al. Geological evolution since the Yanshanian in Huizhou, Guangdong province: new implications for the tectonics of South China [J]. *Earth Science*, 2021, 46(1): 242-258. (in Chinese)
- [17] 范艳霞, 李海龙, 张军龙, 等. 东南沿海黄沙洞地热田地应力与控热构造研究[J]. *地球物理学报*, 2022, 65(10): 3944-3961.
FAN Yanxia, LI Hailong, ZHANG Junlong, et al. Research on the in-situ stress state and the geothermal-controlling structure of the Huangshadong geothermal field in the Southeast Coast of China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(10): 3944-3961. (in Chinese)
- [18] WEI Zhengnan, HUANG Shaopeng, XU Jiangwan, et al. Geochemical evolution of geothermal waters in the Pearl River Delta region, South China: insights from water chemistry and isotope geochemistry [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2024, 51: 101670.
- [19] LI Xianrui, HUANG Shaopeng, HERGERT T, et al. Contemporary crustal stress in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, SE China: implications for geothermal resource exploration and seismic hazard assessment [J]. *Geothermics*, 2025, 127: 103253.
- [20] 蔺文静, 刘志明, 马峰, 等. 我国陆区干热岩资源潜力估算[J]. *地球学报*, 2012, 33(5): 807-811.
LIN Wenjing, LIU Zhiming, MA Feng, et al. An estimation of HDR resources in China's Mainland [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2012, 33(5): 807-811. (in Chinese)
- [21] 徐讲湾, 黄少鹏, 魏正安, 等. 粤港澳大湾区地热异常空间分布特征的 GIS 分析[J]. *深圳大学学报理工版*, 2023, 40(5): 588-598.
XU Jiangwan, HUANG Shaopeng, WEI Zhengnan, et al. Spatial characteristics of geothermal anomalies in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on GIS [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2023, 40(5): 588-598. (in Chinese)
- [22] 唐科, 黄少鹏, 魏正安, 等. 广东惠州地区钻孔岩芯热导率测试与分析[J]. *深圳大学学报理工版*, 2024, 41(1): 1-9.
TANG Ke, HUANG Shaopeng, WEI Zhengnan, et al. Measurement and analysis of the thermal conductivity of borehole core samples from Huizhou, Guangdong, China [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2024, 41(1): 1-9. (in Chinese)
- [23] LIAO Keyan, QIU Nansheng, FENG Qianqian, et al. Crustal structure and deep geotherm of the Pearl River Delta in South China: insights from gravity and thermal modeling [J]. *Geothermics*, 2025, 127: 103245.
- [24] 闫沛伟, 张曼铮, 肖猛, 等. 地热能有机朗肯循环系统控制策略研究[J]. *化工学报*, 2023, 74(12): 4810-4819.
YAN Peiwei, ZHANG Manzheng, XIAO Meng, et al. Study on the control strategy of a geothermal organic Rankine cycle system [J]. *CIESC Journal*, 2023, 74(12): 4810-4819. (in Chinese)
- [25] ZARE V. A comparative thermodynamic analysis of two tri-generation systems utilizing low-grade geothermal energy [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 118: 264-274.
- [26] LIANG Zhongrong, ZHENG Guo, WU Guowei, et al. Thermodynamic performance of organic Rankine cycle based pumped thermal energy storage system with different working fluids [J]. *Heliyon*, 2025, 11(1): e41052.
- [27] 中国建筑设计研究院有限公司. 民用建筑暖通空调设计统一技术措施 2022[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
China Architecture Design and Research Institute Co. Ltd. Unified technical measures for HVAC design of civil buildings 2022 [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022. (in Chinese)
- [28] 肖利涛, 李岩, 尹丽丽. 某数据中心集中供冷方案经济性分析[J]. *制冷与空调*, 2022, 22(11): 102-105.
XIAO Litao, LI Yan, YIN Lili. Economic analysis of centralized cooling scheme in a data center [J]. *Refrigeration and Air-Conditioning*, 2022, 22(11): 102-105. (in Chinese)

【中文责编: 晨兮; 英文责编: 之聿】



补充材料