

【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：崔宏志·

广东省地热开发利用现状及未来发展探讨

朱雄¹, 张尊民^{2, 3, 4, 5}, 宋昊¹, 黄文博^{2, 3, 4, 5}, 蒋方明^{2, 3, 4, 5}

1) 国家能源集团广东电力有限公司, 广东广州 510250; 2) 中国科学院广州能源研究所, 广东广州 510640; 3) 中国科学院可再生能源重点实验室, 广东广州 510640; 4) 广东省可再生能源重点实验室, 广东广州 510640; 5) 中国科学技术大学能源科学与技术学院, 广东广州 510640

摘要: 系统综述了广东省地热资源概况与开发利用情况。根据广东省地热特点, 详述新型超长重力热管地热发电技术原理, 并基于有机朗肯循环(organic Rankine cycle, ORC)发电体系, 对梅州丰顺与惠州黄沙洞地热井开展发电潜力测算与经济性评估, 分析地热出水温度对系统热效率、自耗电率和单位电能产出的影响。结果显示, 两口地热井都存在着巨大的经济效益。其中, 梅州丰顺地热井资本金投资收益率可达6.5%(上网电价0.689元/(kW·h)); 惠州黄沙洞地热井如实现6.5%的资本金投资收益率, 则需对应上网电价为0.746元/(kW·h)。针对广东省地热开发过程中遇到的问题, 从勘察、利用、技术、管理和产业5个维度提出建议, 为推动广东省地热能产业的高质量发展提供参考。

关键词: 地热资源; 中低温地热发电; 有机朗肯循环系统; 发电装机; 地热能产业; 广东省

中图分类号: TK52

文献标志码: A

DOI: 10.3724/SP.J.1249.2025.04371

Current status and future development of geothermal energy exploitation in Guangdong province

ZHU Xiong¹, ZHANG Zunmin^{2, 3, 4, 5}, SONG Hao¹, HUANG Wenbo^{2, 3, 4, 5}, and JIANG Fangming^{2, 3, 4, 5}

1) Guangdong Electric Power Co. Ltd., CHN Energy Group, Guangzhou 510250, Guangdong Province, P. R. China

2) Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Science (CAS), Guangzhou 510640, Guangdong Province, P. R. China

3) Key Laboratory of Renewable Energy, CAS, Guangzhou 510640, Guangdong Province, P. R. China

4) Guangdong Provincial Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou 510640, Guangdong Province, P. R. China

5) School of Energy Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Guangzhou 510640, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: This paper introduces an overview of geothermal resources and their development and utilization in Guangdong province. Based on the characteristics of geothermal energy in Guangdong province, a combined power generation system incorporating super-long gravity heat pipe and an organic Rankine cycle (ORC) was used to evaluate the power generation potential and economic feasibility of the Fengshun geothermal well in Meizhou and Huangshadong geothermal well in Huizhou. The impact of geothermal effluent temperature on system thermal efficiency, self consumption rate, and unit electricity output was analyzed. The results show that both geothermal fields offer significant economic benefits. The capital investment return rate (CIRR) of the Fengshun geothermal well can

Received: 2025-05-03; **Accepted:** 2025-05-15; **Online (CNKI):** 2025-06-04

Foundation: National Key R & D Program of China (2021YFB1507300, 2021YFB1507301)

Corresponding author: Senior researcher JIANG Fangming (jiangfm@ms.giec.ac.cn)

Citation: ZHU Xiong, ZHANG Zunmin, SONG Hao, et al. Current status and future development of geothermal energy exploitation in Guangdong province [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2025, 42(4): 371-379. (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>

reach 6.5% (on-grid electricity price is 0.689 Yuan/(kW·h)). For the Huangshadong geothermal well to achieve the same CIRR, the corresponding on-grid electricity price would need to be 0.746 Yuan/(kW·h). Furthermore, some suggestions are proposed from the perspectives of exploration, utilization, technology, management, and industry development, with the aim of promoting the high-quality development of Guangdong's geothermal energy sector.

Key words: geothermal resources; low and medium temperature geothermal power generation; organic Rankine cycle system; power generation installed capacity; geothermal energy industry; Guangdong province

地热能来源于地球本身, 不受昼夜交替和气候影响, 是最稳定可靠的清洁可再生能源, 非常适合用于电力系统的基础负荷, 是一种切实可行且具有竞争力的清洁能源。

广东是中国能源消费大省, 用电量长期居于全国首位, 能源结构以化石能源为主, 非水可再生能源发电量占比仅 4.9%^[1]。化石能源的使用不仅排放了大量的温室气体, 更是影响广东省空气质量的重要因素。控制化石能源消费, 推动能源清洁化和低碳化改进, 是广东省实现生态文明建设和可持续发展的必然要求。

广东省具有丰富的地热资源, 已探明的温泉点超过 300 处^[2], 其中有 14 处温泉出水温度大于 90 °C, 具备地热发电潜力。广东省是我国最早开始进行地热发电的省份之一, 1970 年建设于梅州丰顺的地热发电站是中国第 1 座实验性地热发电站, 其中, 3 号 300 kW 的闪蒸发电机组曾经稳定运行超过 30 a^[3]。

广东省虽具有丰富地热资源且开发时间较早, 但利用程度还较低。主要存在以下问题: ① 地热能开发利用的产业规模尚未形成, 相关设备及施工投资较大, 地热发电收取标准暂未明确, 无法实现投资回收, 难以实现商业闭环; ② 尚未出台相关政策, 规划引导成片用户利用地热能进行制冷, 以实现地热发电制冷的梯级利用, 在推进地热能发电及综合利用产业化初期, 需要电价补贴政策进行扶持; ③ 资源储量、分布和可开采量还处于勘查状态, 投入不足造成资源数据基础较差, 地热资源赋存规律及分布特征等与生产密切相关的问题没有得到解决, 严重影响地热产业的发展。

2020 年 10 月, 广东省发改委联合 6 部门发布了《广东省培育新能源战略性新兴产业集群行动计划(2021—2025 年)》^[4], 积极支持中低温地热发电、供暖和制冷等项目建设。提出重点攻关地热发电及装备研发, 推进地热能开发利用的高质量发展, 使其在能源生产和消费革命中发挥更加重要的作用, 降低广东省能源对外依存度, 为提高清洁能源供给

比例探索新思路。本研究系统综述了广东省地热产业现状, 并针对梅州丰顺和惠州黄沙洞两个典型地热井进行发电效能与经济性分析, 同时, 针对地热产业中存在的问题, 提出了促进地热资源可持续发展的相关建议, 旨在推动广东省地热能产业的高质量发展。

1 广东省地热资源现状

1.1 资源概况

广东省地处欧亚板块东南边缘, 受深大断裂和岩浆入侵影响, 地热资源十分丰富, 储量居全国第 3, 仅次于西藏和云南, 约占全国总量的 10%^[5]; 其单位国土面积储量也位居全国第 3, 仅次于台湾与云南^[3]。目前, 已发现地热(水)点 328 处, 遍及全省 21 个地市^[6]。其中, 全省地热田以韶关最多(78 处), 其次为河源(39 处)和梅州(32 处), 见图 1 和表 1。全省已发现的地热(水)温度介于 25.0 ~ 127.7 °C, 其中, 高于 90 °C 的共 14 处, 分布在河源、惠州、梅州、潮州、揭阳、阳江、中山和湛江等地市^[7-8]。由图 1 和表 1 可见, 按照地级行政区统计, 广东地热主要集中分布在粤东、粤北和粤西南 3 大区域。粤西南雷州半岛盆地和茂名盆地无论是否考虑回灌条件, 地热田规模均为大型^[7-8]。阳江市阳东县的新洲地热田、潮州市潮安县的东江湖地热田、中山市南朗镇的虎池围地热田、梅州市丰顺县的邓屋地热田及丰良地热田等地下水温较高(高于 90 °C)、储量丰富, 具备地热发电潜力。湛江位于雷州半岛, 其地质构造受南海构造运动影响较大, 区域内广泛分布新生代玄武岩, 具备良好的地热生成和储存条件, 局部区域具备高温地热(高于 150 °C)开发条件^[9]。

地热能可分为浅层、水热型和干热岩型。据谢和平等^[10]的评估数据显示, 大湾区(由广东省的 9 个城市及香港和澳门组成)的浅层地热供暖潜力可达 $4 \times 10^9 \text{ m}^3$; 水热型地热可采地热水 $1.5 \times 10^{10} \text{ t/a}$, 折合标煤为 $4.6 \times 10^6 \text{ t/a}$; 其 5 km 深度内干热

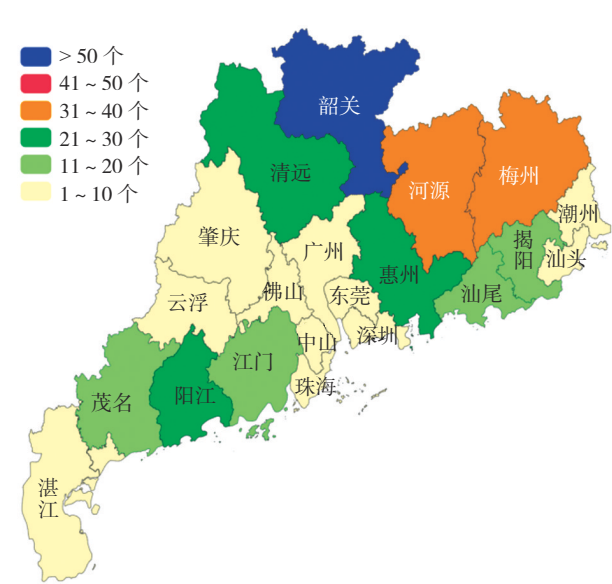


图1 广东省地热田现状分布
Fig. 1 Current distribution of geothermal fields in Guangdong province.

表1 广东省地热田行政区属统计
Table 1 Statistical table of administrative districts of geothermal fields in Guangdong province

城市	位置	地热田数量/个	城市	位置	地热田数量/个
广州	粤中	8	汕尾	粤东	11
深圳	粤中	4	揭阳	粤东	13
佛山	粤中	4	惠州	粤东	26
东莞	粤中	2	珠海	粤西南	7
肇庆	粤中	5	中山	粤西南	6
清远	粤中、粤北	27	江门	粤西南	12
韶关	粤北	78	阳江	粤西南	22
梅州	粤东	32	云浮	粤西南	4
潮州	粤东	6	湛江	粤西南	2
河源	粤东	39	茂名	粤西南	17
汕头	粤东	3			

岩资源总量折合标煤为 1.98×10^{10} t，其中可开采量按30%采收率计算约 5.94×10^9 t标煤。

广东省水热型地热资源总体上呈现分布面广、数量多和热量丰富的特点，但单个地热田规模较小，温度以中低温或低温为主，已探明的328处温泉点中，有30%的温泉温度高于60℃，开采深度总体比较浅，多数在1.0 km之内，个别为1.5~3.0 km。

1.2 开发利用情况

广东省利用地热可追溯到1970年在梅州丰顺

建成的全国第1座地热发电试验装置^[11]，1984年建成的3号闪蒸机组，装机容量为300 kW^[3]。该发电站在国内外均有一定的知名度，由于设备系统老化于2017年停运，持续运行超过30 a，是我国所有小型地热电站中唯一一个能够长时间持续运行的站点。

广东省也是最早应用吸收式地热制冷的省份之一。21世纪初，广东省梅州市丰顺县的千江温泉大酒店安装了2台300 kW的单效溴化锂吸收式制冷机组^[12]，利用的地热水温度为95℃，可以满足约6 000 m²建筑的制冷，比中央空调节省2/3以上的电能。机组利用完的地热尾水温度仍可达60℃以上，可以继续用于温泉休闲疗养，满足游泳池和客房洗浴的供热需求。广东省梅州市五华县汤湖热矿泥山庄利用70℃左右的地热水为热源，制取9℃的冷冻水，用于建筑制冷。

尽管广东省较早地开展了地热发电与制冷等较为先进的资源开发利用，但现有技术的经济收益与温泉旅游产业相差甚远，地热资源利用主要以温泉开发为主。已开发的155处地热田中，用于温泉旅游的多达143处，占比92%^[13-15]，地热资源浪费严重。对于温度高于60℃的热水通常需要进行降温处理，此外，超过90℃的甚至直接排放^[14]，造成了地热资源的较大浪费。

广东省区域内干热岩地热开发还处于起步阶段，无实质性开采利用。中国科学院广州能源研究所是国内最早开展干热岩地热开发利用研究的单位之一，该单位在世界范围内首创了利用超长重力热管产出的蒸汽直驱发电来开发干热岩地热资源的技术构想，并于2023年在1口4 150 m的井内成功实施^[16]，为广东省中深层地热开发提供了一种全新的技术方案。

1.3 与中国其他省市对比

与西藏、云南等传统地热强省相比，广东省的资源特点决定了差异化的开发路径。西藏、云南与广东的地热资源对比如表2。西藏以高温地热发电见长，但开发受限于高海拔、生态脆弱性及远离能源消费市场；云南虽兼具高温发电与中低温旅游优势，但基础设施配套不足。广东依托粤港澳大湾区的经济优势，能够将地热资源与市场需求紧密结合。例如，珠三角城市群对清洁能源的需求旺盛，地源热泵技术可替代传统能源用于建筑供暖/制冷。

表2 广东、云南与西藏的地热资源对比
Table 2 Geothermal Comparison among Guangdong, Yunnan and Xizang

省份	概况	市场需求	政策支持
广东	中低温为主,干热岩潜力大	经济发达,能源需求集中	明确规划干热岩开发示范区
西藏	高温资源储量占全国约 1/3	本地需求低,外送成本高	国家战略支持(清洁能源基地)
云南	高温资源丰富,总量次于西藏	旅游驱动型市场为主	侧重旅游与扶贫结合

总体而言,广东省凭借资源、市场与政策的三重叠加优势,正从温泉大省向地热能强省迈进,其探索路径或将成为“经济驱动型”地热开发的范本。

2 广东省地热发电潜力评估

2.1 地热发电技术现状

地热能的热利用方式主要包括空间供暖和生活热水供应等直接热利用,和以发电为代表的间接热利用。作为使用最为方便的能源形式,电能奠定了现代人们生活的基础,通过地热能进行发电也是地热行业发展的一个核心目标。根据资源条件的不同,目前主要的地热发电技术包含闪蒸、有机朗肯循环(organic Rankine cycle, ORC)发电、干蒸气发电及其组合。

应用最多最常见的地热发电技术为闪蒸系统,中国首座地热发电站广东丰顺地热发电站和最大的地热发电站西藏羊八井地热发电站均采用了单级闪蒸发电机组^[17-18]。闪蒸发电循环中,采出的高温地热水先进入闪蒸器内降压蒸发,产生蒸气后驱动汽轮机发电。闪蒸发电系统具有结构简单和操作简便的优点,然而,由于地热卤水中含有大量的矿物质,在闪蒸器内降压蒸发时极易结垢^[18],此外,与 ORC 发电相比,闪蒸发电针对中温热源的效率较低,因此,该技术目前正面临严峻的挑战。

在 ORC 系统中,地热水通过预热器和蒸发器等换热设备将热量传递给有机工质,有机工质吸热蒸发后驱动汽轮机发电。ORC 技术可以灵活选用压力范围合适、热力学性能好的有机工质以适配不同温度的地热水,较闪蒸系统往往具有更高的发电效率。DICKSON 等^[19]的研究指出,ORC 系统适用于 85~170 °C 之间的地热水,其适用的温度上限取决

于有机工作流体的热力学性能,温度下限则取决于经济性指标,当地热水温度太低时将不具备发电经济价值。

对地热条件极佳的干蒸气地热源可以采用干蒸气发电系统,此种地热田直接产出高温蒸气,可以直接驱动汽轮机进行发电。干蒸气地热发电系统是结构最简单、效率最高的地热发电系统^[20],在高温地热田中其热效率可达 20% 以上,焓损失也较小。意大利 Larderello 和美国 Geysers 是世界上两个最大的干蒸气地热储层,此外在新西兰、日本和印度尼西亚等地也发现了较小的干蒸气储层^[21-23]。干蒸气发电系统具有很好的经济效益,目前,该技术面对的主要问题是资源规模与分布受限。而超长重力热管地热发电系统热管本身输出饱和蒸气,可以直接驱动汽轮机发电,其结构类似于干蒸气地热发电系统,主要由超长重力热管、汽轮机、发电机、冷却塔和泵组成(图 2)。由于重力热管地热发电系统减少了运行中的泵功消耗,结构简单,维护成本较低,是一种非常有前景的新型地热能开采技术。研究发现,超长重力热管发电系统能量和焓效率总是大于传统的井下换热器发电系统^[24]。地热井的深度和数量是决定超长重力热管系统能效和发电成本的关键因素,深井和多井有可能带来高能效和低成本^[25]。

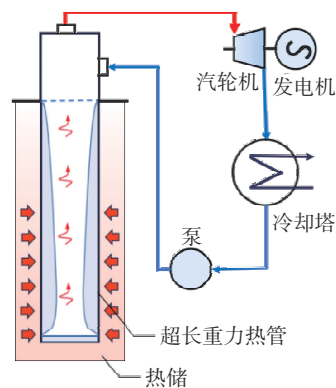


图2 超长重力热管发电系统示意图

Fig. 2 Schematic of super-long gravity heat pipe power generation system.

2.2 发电系统热力学计算

基于 ORC 机组进行效率测算和发电潜力评估。蒸发器的热功率为

$$Q_{\text{eva}} = m_r(h_1 - h_4) \quad (1)$$

汽轮机的功率为

$$W_{\text{tur}} = m_r(h_1 - h_2)\eta_{\text{gen}} = m_r(h_1 - h_{2s})\eta_{\text{s,tur}}\eta_{\text{gen}} \quad (2)$$

冷凝器的热功率为

$$Q_{\text{con}} = m_r(h_2 - h_3) \quad (3)$$

工质泵的功率为

$$W_{\text{pum}} = m_r(h_4 - h_3)/\eta_{\text{pum}} \quad (4)$$

冷却塔的功率为

$$W_{\text{coo}} = 3.6m_{\text{coo}}k_{\text{coo}}/\rho \quad (5)$$

$$m_{\text{coo}} = Q_{\text{con}}/(c_p\Delta t) \quad (6)$$

热效率为

$$\eta_{\text{th}} = (W_{\text{tur}} - W_{\text{pum}})/Q_{\text{eva}} \quad (7)$$

单位电能产出为

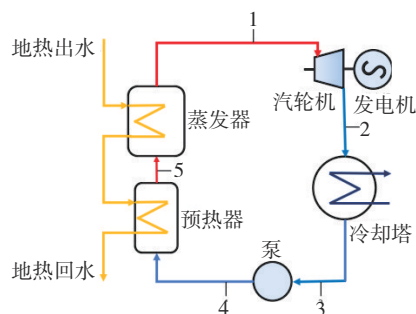
$$e_{\text{net}} = (W_{\text{tur}} - W_{\text{pum}} - W_{\text{coo}})/(3.6m_{\text{hot}}) \quad (8)$$

其中, m_r 、 m_{coo} 和 m_{hot} 分别为发电循环中工质、冷却循环水和地下水的质量流率, 单位: kg/s; η_{gen} 为发电机效率, η_{pum} 为工质泵效率, $\eta_{\text{s, tur}}$ 为汽轮机等熵效率, η_{th} 为热效率; Δt 为冷却塔进出口温差, 单位: $^{\circ}\text{C}$; k_{coo} 为冷却塔功耗系数, 单位: kWh/m^3 ; e_{net} 为单位电能产出, 单位: kWh/m^3 ; c_p 为循环水的定压比热容, 单位: $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$; ρ 为循环水的密度, 单位: kg/m^3 ; h_1 、 h_2 、 h_3 和 h_4 为循环过程中各点工质比焓(图3(a)), h_{2s} 为理想绝热的点2工质比焓, 单位: kJ/kg . 各点工质比焓可由各点工质温度、熵值确定(图3(b)). 本次测算中选用的ORC机组参数如表3, 发电所用工质为1, 1, 1, 3, 3-五氟丙烷(R245fa), 地下水出水温度用 t_{hot} 表示.

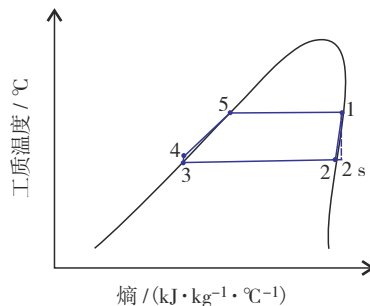
基于上述计算方法, 使用Matlab软件调用Refprop物性参数, 通过迭代计算得到满足夹点温差下的最大工质蒸发温度, 进而计算得到不同地热水温度下ORC机组的热效率和单位电能产出, 结果如图4. 由图4可见, 随着地热水温度的上升系统的热效率和单位电能产出都会增加, 后者的增加幅度尤为明显. 表4为热效率、系统自耗电率(工质泵和冷却塔的功耗占比)和单位电能产出的计算结果, 当地热水温度从 80°C 升至 120°C 时, 系统单位电能产出从 $0.404 \text{ kWh}/\text{m}^3$ 增加到 $3.310 \text{ kWh}/\text{m}^3$, 提升幅度高达719.3%, 同时系统自耗电从35.9%下降到19.9%. 可见在相同的取水量情况下, 出水温度对系统的总电能产出及运行经济性具有决定性影响.

2.3 梅州丰顺地热发电潜力分析

2009年, 广东省发改委批复了《关于要求提高丰顺县地热试验电站上网电价的请示》(梅市价(2009)118号), 将丰顺县地热发电电站上网电价提高



(a) ORC发电机组系统原理



(b) ORC循环工质温-熵

图3 有机朗肯循环发电系统示意图

Fig. 3 Schematic of organic Rankine cycle power generation system. (a) ORC power generation unit and (b) temperature-entropy diagram.

表3 地热ORC机组参数

参数名称	取值
地热水出水温度	$80 \sim 120^{\circ}\text{C}$
地热水回水温度	65°C
冷凝温度	35°C
夹点温差	5°C
透平内效率	80%
发电机效率	98%
工质泵效率	65%
冷却塔功耗系数	$0.07 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$
冷却塔进出口温差	8°C

到 $0.689 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, 是目前除西藏的羊八井地热电站($0.75 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$)之外的最高电价地热电站. 丰顺县是广东地区地热发电最具潜力的地区之一, 本研究基于梅州丰顺邓屋地热井的相关参数进行了发电潜力测算, 并估算项目经济收益.

根据文献[6, 11, 13, 17]推测出水温度为 92°C , 出水量为 $250 \text{ m}^3/\text{h}$, 结合2.2节所述模型, 计算得到此时系统热效率为5.75%, ORC机组装机功率375 kW, 净发电功率275 kW, 系统自耗电率26.8%. 按照年运行 $8 \times 10^3 \text{ h}$ 计算, 年发电量为

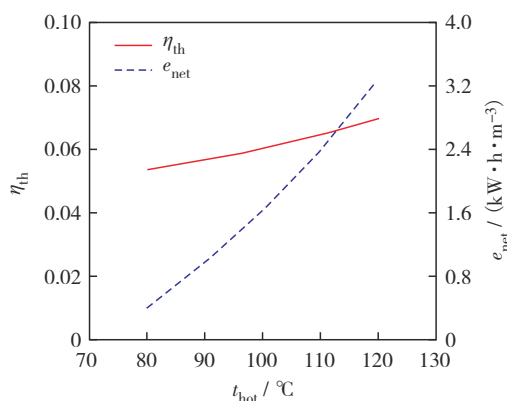


图4 不同地热水温ORC机组的热效率和单位电能产出

Fig. 4 Thermal efficiency and electric energy output per unit volume of geothermal fluid for ORC units at different geothermal water temperatures.

表4 不同地热水温ORC机组的热效率、自耗电率和单位电能产出

Table 4 Thermal efficiency, self-consumption rate, and electric energy output per unit volume of geothermal fluid for ORC units at different geothermal water temperatures

$t_{\text{hot}} / ^\circ\text{C}$	$\eta_{\text{th}} / \%$	自耗电率 / %	$e_{\text{net}} / (\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3})$
80	5.32	35.9	0.404
90	5.64	27.8	0.965
100	6.02	24.2	1.622
110	6.45	21.9	2.391
120	6.96	19.9	3.310

$3 \times 10^6 \text{ kW}\cdot\text{h}$, 售电量为 $220.8 \times 10^4 \text{ kW}\cdot\text{h}$, 年售电销售收入约为 190 万元。若取水费按 $0.273 \text{ 元}/\text{m}^3$ 计算, 每年支付费用为 54.6 万元, 年净收入约 135.4 万元, 项目动态投资按 600 万元计算(发电设备按 $9\,500 \text{ 元}/\text{kW}$ 计算, 其他施工费用约 250 万元), 对应资本金投资收益率为 6.5%。

2.4 惠州黄沙洞地热井发电潜力分析

惠州市惠城区黄沙洞地热田是较为典型的中高温地热田, 资源条件良好, 具备开发地热电站的先决条件^[26-27]。惠热一井终井深度为 3 009.17 m, 最高温度为 $127.7 ^\circ\text{C}$, 井口自喷水温为 $98.5 ^\circ\text{C}$, 井口压力 0.5 MPa , 涌水量大于 $4\,800 \text{ m}^3/\text{d}$, 是目前广东省内孔深最大、孔底水温最高、自喷涌水量最大的自流地热井。本研究将基于 1 个 2.4 MW 的 ORC 地热发电机组对黄沙洞地区的地热发电潜力进行评估。

根据文献^[6, 26-27]可知, 该地区地下可能存在两个主要地热储层, 浅层热储温度约为 $90 ^\circ\text{C}$,

深层热储温度约为 $120 ^\circ\text{C}$ 。测算时取地热井出水温度为两个热储的平均值(即 $105 ^\circ\text{C}$), 计算得此时 ORC 发电效率为 6.25%, 系统自耗电约为 22.9%, 单位流量净功率输出约为 $2 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 。如果设计净发电功率为 2.4 MW , 则需要总得地热采水量为 $1\,200 \text{ m}^3/\text{h}$, 根据现有资料^[6, 26-27]设计生产井 8 口, 单井流量 $150 \sim 200 \text{ t/h}$, 总热流循环量 $1\,200 \text{ t/h}$, 回灌井 4 口, 风险对抗井 2 口用于备用, 共需投资 8×10^3 万元。地面设备投资 3.5×10^3 万元(发电设备按 $9.5 \times 10^3 \text{ 元}/\text{kW}$, 其他设备预计 0.5×10^3 万元), 其他工作投资 1×10^3 万元, 项目合计投资 1.25 亿元。如参考丰顺地热电站电价 $0.689 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, 年销售收入为 1 320 万元, 在不考虑水资源费的前提下, 资本金投资收益率为 5.58%; 如资本金投资收益率为 6.5%, 对应上网电价为 $0.746 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

3 建议

针对广东省地热产业的发展现状和开发利用中存在的问题, 提出以下建议。

1) 地质勘查方面。查明地热资源的形成条件和可供开采范围是地热产业发展的基础依据。加快地热资源的勘探速度和深度, 进一步发掘广东省深部高温地热资源, 让投资者和决策者认识到地热资源的巨大潜力, 才能得到更多的人力、物力投入和政策支持^[28]。同时, 广东省各级政府应改善勘查制度, 简化地热资源探矿权和采矿权审批流程, 出台相应指引, 明确所需材料、办理时限等要素, 设立专门审批通道, 规范和简化流程, 实现对外一站式办理与在线审批。

2) 地热利用方面。地热的利用绝不能单一化, 否则不仅会浪费能源, 更难以做到产业的可持续发展。对于地质条件好的地热田, 优先发电, 积极向“梯级利用”方面发展, 做到能源利用最大化, 推进发电-制冷(供热)-温泉的复合梯级利用模式^[29-30]。同时, 地热能还可以与其他可再生能源(如风能和太阳能)互补^[31-33], 做到能源供应的不间断性。

3) 技术方面。技术的好坏直接影响到地热产业的发展能力, 是地热实现产业化的核心, 应当加强对关键技术研发的支持力度, 深入开展地热资源评价技术、高效换热技术、中高温热泵技术、高温钻井工艺技术的研究以及经济回灌技术攻关。开展

井下换热技术深度研发,深入开展超长重力热管式地热发电技术攻关和设备研发;开展干热岩资源发电试验项目的可行性论证,选择合适场址并进行必要的勘探及开发,政府按照一定比例给予配套科研经费支持。

4) 管理制度方面。① 政府应建立并完善扶持地热发电的机制,建立地热发电并网、调峰和上网电价等方面的政策体系。建议出台参考羊八井地热电站上网电价(0.750元/(kW·h))政策,以支持地热能产业发展。② 政府还应减免采矿权出让收益,同时对“取热不耗水、完全等量同层回灌”或“密封式、无干扰井下换热”项目,以及对地下岩层和水体没有影响的地热能开发项目免收地热资源税,对无法实现完全回灌的地热发电项目,参照水力发电用水(小型)0.004元/(kW·h)的标准收取水资源费。建立奖罚制度,激发企业以更大的动力去发展与创新。③ 企业要加强地热能开发利用规划和项目管理。统筹各地区地热能资源禀赋制定广东省地热能开发利用总体规划,探索在广东区域建立基于地热能的集中供冷示范应用场景,协调地热能开发利用与园区集中供电、供热和供暖的联结,规划引导建设地热能综合利用场景。

5) 产业体系建设:为推动地热能产业高质量发展,需要建立涵盖技术标准、质量保障、人才培育和国际合作的全方位支撑体系。重点制定资源勘查评价、钻井工程和流体开采回灌等技术规范,完善地热电站和建筑供能系统的设计建造标准。建立设备认证制度和监测平台,实现全流程质量管控。着力培养涵盖地质勘查、工程技术和运营管理的专业化队伍。同时,通过参与国际标准制定、开展技术合作和共建示范项目,提升我国在全球地热领域的影响力。

综上,广东省应该建立政府引导、企业投资与科研院所协同创新的模式,全面推动深层地热资源的综合利用。政府出台一系列政策,为地热开发提供资金支持和制度保障,同时鼓励企业加大投资力度,推动地热能发电、供暖和农业等领域的应用。科研院所通过技术创新,提升地热资源勘探与开发效率,推动地热产业链的延伸与升级。这一多方协作的模式,不仅有助于广东省能源结构的优化,还将为全国地热资源的开发利用提供示范,助力实现“双碳”目标,推动绿色低碳发展。

结 语

广东省具有丰富的地热资源,主要集中在粤东、粤北和粤西南。其干热岩地热可开采量约 4×10^{12} t标准煤,但开发还处于起步阶段,无实质性开采。对典型地热田进行发电潜热测算,得到:① 梅州丰顺地热井出水温度约92℃,出水量为250 m³/h,经过ORC机组发电后,净发电功率275 kW,自耗电率为26.8%。按照年运行 8×10^3 h计算,年净收入约135.4万元。② 惠州黄沙洞地热井平均出水温度为105℃,如果设计净发电功率为2.4 MW,在不考虑水资源费的前提下,资本金投资收益率为5.58%。此外,针对广东省地热资源开发过程中的现存问题,本研究从勘查、利用、技术、管理及产业5个维度提出系统性改进建议,为地热产业的高质量发展提供实施路径。

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFB1507300, 2021YFB1507301)

作者简介:朱雄(2475623320@qq.com),国家能源集团广东电力有限公司高级工程师。研究方向:能源项目开发和新型电力系统建设。

引 文:朱雄,张尊民,宋昊,等.广东省地热开发利用现状及未来发展探讨[J].深圳大学学报理工版,2025,42(4):371-379.

参考文献 / References:

- [1] 广东省人民政府办公厅.广东省能源发展“十四五”规划的通知:粤府办〔2022〕8号[EB/OL].(2022-04-13)[2025-03-01].https://www.gd.gov.cn/zwgk/wjk/qbwj/yfb/content/post_3909371.html.
Office of the People's Government of Guangdong Province. Notice on the 14th Five Year Plan for energy development in Guangdong Province: Yue Fu Ban [2022] No. 8 [EB/OL]. (2022-04-13)[2025-03-01]. https://www.gd.gov.cn/zwgk/wjk/qbwj/yfb/content/post_3909371.html. (in Chinese)
- [2] 郭志,吴玉婷,叶洪恩.广东省地热资源开发利用环境影响评价[J].城市建设理论研究电子版,2024(27):163-165.
GUO Zhi, WU Yuting, YE Hongen. Environmental impact assessment of geothermal resource development and utilization in Guangdong Province [J]. Theoretical Research in Urban Construction, 2024 (27): 163-165. (in Chinese)
- [3] 廖月芝,龚宇烈,刘国钦.广东省丰顺县地热资源利用现状及开发模式探讨[C]//中国可持续发展论坛论文集.珠海:中国可持续发展研究会,2011:92-95.

- LIAO Yuezhi, GONG Yulie, LIU Guoqin. Exploration of the current status and development model of geothermal resources utilization in Fengshun County, Guangdong Province [C]// Proceedings of China Sustainable Development Forum. Zhuhai: Chinese Society for Sustainable Development, 2011: 92-95. (in Chinese)
- [4] 广东省发展和改革委员会, 广东省能源局, 广东省科学技术厅, 等. 关于印发广东省培育新能源战略性新兴产业集群行动计划(2021—2025年)的通知[EB/OL]. (2020-09-29)[2025-03-01]. http://drc.gd.gov.cn/snyj/tzgg/content/post_3167461.html. Guangdong Provincial Development and Reform Commission, Energy Bureau of Guangdong Province, Department of Science and Technology of Guangdong Province, et al. Notice on issuing the action plan for cultivating strategic emerging industry clusters of new energy in Guangdong Province (2021-2025) [EB/OL]. (2020-09-29) [2025-03-01]. http://drc.gd.gov.cn/snyj/tzgg/content/post_3167461.html. (in Chinese)
- [5] 谢庆裕, 姚昱旸. 因地制宜建设地热高效利用示范区[N]. 南方日报. 2021-09-02(A07). XIE Qingyu, YAO Yuyang. Constructing geothermal efficient utilization demonstration zones according to local conditions [N]. Southern Daily. 2021-09-02(A07). (in Chinese)
- [6] 曾土荣. 广东省地热资源现状调查评价与区划报告[DS]. 湛江: 广东省地质局第四地质大队, 2015. DOI: 10.35080/n01.c.137861. ZENG Turong. Investigation, evaluation and zoning report on geothermal resources in Guangdong Province [DS]. Zhanjiang: Fourth Geological Brigade of Guangdong Geological Bureau, 2015. DOI: 10.35080/n01.c.137861. (in Chinese)
- [7] 吴广翩. 广东隆起山地型地热系统特征及成因[J]. 云南地质, 2023, 42(4): 442-450. WU Guangpian. Characteristics and genesis of uplift geothermal system in Guangdong Province [J]. Yunnan Geology, 2023, 42(4): 442-450. (in Chinese)
- [8] 叶洪恩, 吴玉婷, 郭志. 广东省沉积盆地型地热资源评价[J]. 地下水, 2024, 46(6): 24-28. YE Hongen, WU Yuting, GUO Zhi. Evaluation of geothermal resources in sedimentary basins in Guangdong Province [J]. Ground Water, 2024, 46(6): 24-28. (in Chinese)
- [9] 姜光政, 王亚奇, 胡杰, 等. 中国中-高温地热资源勘探方向与优选靶区[J]. 科技导报, 2022, 40(20): 76-82. JIANG Guangzheng, WANG Yaqi, HU Jie, et al. Medium-high temperature geothermal resources in China: exploration directions and optimizing prospecting targets [J]. Science & Technology Review, 2022, 40(20): 76-82. (in Chinese)
- [10] 谢和平, 杨仲康, 邓建辉. 粤港澳大湾区地热资源潜力评估[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(1): 1-8. XIE Heping, YANG Zhongkang, DENG Jianhui. Assessment of geothermal resource potential in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Engineering Science and Technology, 2019, 51(1): 1-8. (in Chinese)
- [11] 周长进, 杨继湘. 广东省丰顺县的地热资源及其开发利用[J]. 自然资源学报, 1992, 7(2): 152-160. ZHOU Changjin, YANG Jixiang. Exploitation and utilization of the geothermal resources in Fengshun County, Guangdong Province [J]. Journal of Natural Resources, 1992, 7(2): 152-160. (in Chinese)
- [12] 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 Zhenneng, 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)
- [13] 李光宇. 广东省丰顺县地热区温泉水化学特征及成因研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2024. LI Guangyu. Research on the hydrochemical characteristics and genesis of hot springs in the geothermal area of Fengshun County, Guangdong Province [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2024. (in Chinese)
- [14] 薛江华. 占着全国储量第三的地热资源, 只搞温泉可惜了[N]. 羊城晚报. 2021-09-02(A06). XUE Jianghua. Occupying the third largest reserve of geothermal resources in the country, it's a pity to only focus on hot springs [N]. Yangcheng Evening News. 2021-09-02(A06). (in Chinese)
- [15] 谢庆裕, 姚昱旸. 广东地热开发92%用作温泉旅游, 省政协委员建议高效用能勿浪费[N]. 南方日报. 2021-09-01(A07). XIE Qingyu, YAO Yuyang. 92% of geothermal development in Guangdong is used for hot spring tourism, and members of the Provincial Political Consultative Conference suggest efficient use of energy without waste [N]. Southern Daily. 2021-09-01(A07). (in Chinese)
- [16] HUANG Wenbo, CHEN Juanwen, MA Qingshan, et al. Developing kilometers-long gravity heat pipe for geothermal energy exploitation [J]. Energy & Environmental Science, 2024, 17(13): 4508-4518.
- [17] 徐名捷, 罗楚豪, 李颂哲. 广东省丰顺县的地热资源

- 及地热电站[J]. 太阳能学报, 1995, 16(1): 121-124.
- XU Mingjie, LUO Chuhao, LI Songzhe. Geothermal resources and the continuous operation of power station for the last decade in Fengshun County, Guangdong Province [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 1995, 16(1): 121-124. (in Chinese)
- [18] 周大吉. 西藏羊八井地热发电站的运行、问题及对策 [J]. 电力建设, 2003, 24(10): 1-3, 9.
- ZHOU Daji. Operation, problems and countermeasures of Yangbajing geothermal power station in Tibet [J]. *Electric Power Construction*, 2003, 24(10): 1-3, 9. (in Chinese)
- [19] DICKSON M H, FANELLI M. Geothermal energy: utilization and technology [M]. London: Routledge, 2013.
- [20] CHAMORRO C R, MONDÉJAR M E, RAMOS R, et al. World geothermal power production status: energy, environmental and economic study of high enthalpy technologies [J]. *Energy*, 2012, 42(1): 10-18.
- [21] DIPIPO R. Geothermal energy electricity generation and environmental impact [J]. *Energy Policy*, 1991, 19(8): 798-807.
- [22] ZARROUK S J, MOON H. Efficiency of geothermal power plants: a worldwide review [J]. *Geothermics*, 2014, 51: 142-153.
- [23] DIPIPO R. Geothermal power plants: principles, applications, case studies and environmental impact [M]. 3rd ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2012.
- [24] MA Qingshan, HUANG Wenbo, CHEN Juanwen, et al. Thermodynamic and economic performance of super-long gravity heat pipe geothermal power plant [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 248, Part A: 123115.
- [25] MA Qingshan, CHEN Juanwen, HUANG Wenbo, et al. Power generation analysis of super-long gravity heat pipe geothermal systems [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 242: 122533.
- [26] 王磊, 张金龙. 黄沙洞地区深部地热资源调查评价 [J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(12): 85-87.
- WANG Lei, ZHANG Jinlong. Investigation and evaluation of deep geothermal resources in Huangshadong area [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2022, 40(12): 85-87. (in Chinese)
- [27] 甘浩男, 蔺文静, 王贵玲, 等. 广东惠州黄沙洞地区岩石圈热-流变结构及其热源启示 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(4): 26-38.
- GAN Haonan, LIN Wenjing, WANG Guiling, et al. Lithospheric thermo-rheological structure of the Huangshadong geothermal field in Huizhou of Guangdong and its heat-sources implications [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(4): 26-38. (in Chinese)
- [28] 邱根雷, 张晓龙, 吴凯. 陕西省地热资源开发利用现状与问题研究 [J]. 中国非金属矿工业导刊, 2018 (S1): 70-73.
- QIU Genlei, ZHANG Xiaolong, WU Kai. Research on the current status and problems of geothermal resource development and utilization in Shaanxi Province [J]. *China Non-Metallic Mining Industry*, 2018 (S1): 70-73. (in Chinese)
- [29] 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)
- [30] 杨清, 吴冰洁, 李曼. 地热供暖梯级利用优化研究 [J]. 中国煤炭地质, 2024, 36(4): 50-55, 29.
- YANG Qing, WU Bingjie, LI Man. Study on optimization of geothermal heating cascade utilization model [J]. *Coal Geology of China*, 2024, 36(4): 50-55, 29. (in Chinese)
- [31] 黄璜, 刘然, 李茜, 等. 地热能多级利用技术综述 [J]. 热力发电, 2021, 50(9): 1-10.
- HUANG Huang, LIU Ran, LI Qian, et al. Overview on multi-level utilization techniques of geothermal energy [J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(9): 1-10. (in Chinese)
- [32] 何奇, 张宇, 邓玲, 等. 基于水电储能调节的风光水发电联合优化调度策略 [J]. 广东电力, 2024, 37(3): 12-24.
- HE Qi, ZHANG Yu, DENG Ling, et al. Joint optimal scheduling strategy of wind, photovoltaic and water storage power generation considering hydropower storage regulation [J]. *Guangdong Electric Power*, 2024, 37(3): 12-24. (in Chinese)
- [33] 姜曙, 刘芳芳, 刘媛媛, 等. “地热能+”在工程实践中的综合梯级应用 [J]. 综合智慧能源, 2022, 44(9): 59-64.
- JIANG Shu, LIU Fangfang, LIU Yuanyuan, et al. Comprehensive cascade application of "geothermal energy+" in engineering practice [J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2022, 44(9): 59-64. (in Chinese)

【中文责编: 晨兮; 英文责编: 之聿】