



地质力学学报
Journal of Geomechanics
ISSN 1006-6616, CN 11-3672/P
中文核心期刊
中国科技核心期刊
CSCD 来源期刊（核心库）

《地质力学学报》预出版论文

论文题目：雄安新区地热资源勘查开发现状及展望

作者：王贵玲，马峰，朱喜，余鸣潇，卢星辰，李杰，董向宇

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2026095

投稿时间：2026-07-12

录用时间：2026-09-24

预出版时间：2026-09-24

预出版版权说明

预出版，是指在网络出版或纸质版印刷出版之前，文章的电子版本在网上提前公开，是正式出版的预备版本。预出版的文章是通过严格的“三审制”审查后，本刊确定录用的文章，其内容的著作权等受《著作权法》等法律法规保护。预出版的文章将在之后的印刷版上刊发，印刷版的文章可能与预出版的文章略有不同，预出版文章经录用后便以电子版本形式在网站发出，没有经过排版和编校，会存在部分文字及编排格式与正式出版有出入，但文章主体内容是完全一致的。

学者研究或引述预出版文章，应当以印刷纸质版内容为准；但如果牵涉首创权等时间问题，则应当以适当方式注明文章的预出版日期。

雄安新区地热资源勘查开发现状及展望

王贵玲^{1,2}, 马峰^{1,2*}, 卢星辰³, 李杰⁴, 朱喜^{1,2}, 余鸣潇^{1,2}, 董向宇⁵, 顾昊琛¹

WANG Guiling^{1,2}, MA Feng^{1,2*}, LU Xingcheng³, LI Jie⁴, ZHU Xi^{1,2}, YU Mingxiao^{1,2}, DONG Xiangyu⁵, GU Haochen¹

1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061;

2. 自然资源部地热与干热岩勘查开发技术创新中心, 河北 石家庄 050061;

3. 中石化绿源地热能开发有限公司, 河北 雄安 071800;

4. 香港中文大学(深圳), 广东 深圳 518172;

5. 中国地质科学院勘探技术研究所, 天津 300399

1. *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, Hebei, China;*

2. *Technology Innovation Center of Geothermal & Hot Dry Rock Exploitation and Development, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang 050061, Hebei, China;*

3. *Sinopec Green Energy Geothermal Development Co., Ltd., Xiongan 071800, Hebei, China;*

4. *The Chinese University of Hong Kong (Shenzhen), Shenzhen 518172, Guangdong, China;*

5. *Institute of Exploration Techniques, Chinese Academy of Geological Sciences (CAGS), Tianjin 300399, China*

Current status and prospects of geothermal resource exploration and development in Xiong'an New Area

Abstract:[Objective] This study aims to review the history and current status of geothermal resource exploration and development in Xiong'an New Area, and to assess the advances, challenges, and future directions of geothermal exploration and utilization. **[Methods]** Based on the results of comprehensive geothermal exploration across the whole area, this study synthesizes the theoretical approaches, exploration and development technologies, and representative application. **[Results]** The principal achievements are as follows: (1) The “dominant-flow heat transfer” theory for buried hills is proposed, revealing the nonlinear characteristics of upward deep heat transport and providing a theoretical basis for identifying highest-temperature and largest-capacity geothermal wells in North China. (2) An evaluation method for recoverable geothermal resources under withdrawal-recharge equilibrium is established, comprehensively considering recharge rate, inter-well heat-exchange efficiency, and reservoir temperature attenuation, thereby improving the applicability of resource assessment to geothermal planning and development. (3) For geothermal exploration, the wide-field electromagnetic (WFEM) method is applied for the first time to the Jixianian geothermal reservoirs in Xiong'an New Area; demonstrating high precision and low cost in locating deeply buried geothermal reservoir structures. To address the low core recovery caused by the fractured weathered crust at the top of buried-hill reservoirs, a small-diameter pilot-hole drilling technique is proposed, achieving an overall core recovery of

¹基金项目: 厦门自然科学基金项目(3502Z202473096); 深地国家科技重大专项(2025ZD1009902); 中国地质调查项目(DD202605202305, 20189112); 河南省重点研发项目(241111321000)

第一作者: 王贵玲(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事水文地质、地热地质及环境地质相关研究工作。

Email: guilingw@163.com

通讯作者: 马峰(1983—), 男, 正高级工程师, 博士生导师, 主要研究方向为地热资源勘查评价及裂隙渗流传热。

Email: mafeng@mail.cgs.gov.cn

85.06%。(4) Hydra-jet and acid-fracturing stimulation is implemented for the first time on the deep Gaozhuangzhuang Formation geothermal reservoir, increasing reservoir productivity eightfold and raising the geothermal-fluid temperature from 60.0 °C to 66.5 °C. (5) To address the spatial mismatch between resource-rich areas with low heat demand and heat-demand centers with limited geothermal resources, the concept and associated technologies of long-distance heat transmission are proposed, and a new large-scale exploitation model based on “centralized extraction–centralized transmission–centralized reinjection” is established. [Significance] These theoretical and technological innovations provide guidance for the efficient and scaled development of geothermal resources in Xiong'an, and offer theoretical and technical support for the green and large-scale geothermal development in the Beijing–Tianjin–Hebei region and nationwide.

Keywords: geothermal resources; exploration and assessment; development and utilization; production–reinjection balance; reservoir stimulation and enhancement; long-distance heating transmission; Xiong'an New Area

摘要: 雄安新区中深层地热资源丰富, 碳酸盐岩热储具有储量大、分布广、清洁稳定等特点, 是雄安新区能源体系的关键组成部分。基于全区整装勘查成果, 文章系统总结了地热勘查开发的理论、技术方法及应用案例: 提出了古潜山“优势流传热”理论, 揭示深部热量向上传输的非线性特征, 指导探获了多口中高温地热井; 建立了采灌均衡条件下地热可采资源量评价方法, 综合考虑回灌率、采灌井间热交换效率、热储温度衰减等因素, 提升了资源评价结果对地热规划开发的指导作用。在勘探技术方面, 首次将广域电磁法用于雄安新区蓟县系热储的勘探, 该技术在识别埋深较大的热水储层构造时具有精度高、成本低的优势; 针对古潜山热储顶部风化壳破碎、取芯率低的难题, 提出了小径先导探孔钻进工艺, 使整体岩芯采取率达到 85.06%; 对深部高于庄组热储实施了水力喷射+酸化压裂增产工艺, 实现热储产能提升 8 倍, 地热流体温度从 60.0℃ 升至 66.5℃; 针对区域“资源富集区负荷小、负荷中心资源匮乏”的空间错位矛盾, 提出了远程供热的理念及相关技术, 构建了“集采—集输—集灌”规模化开采新模式。以上针对雄安新区地热资源探测开采的理论与技术创新, 对该区地热资源高效规模化开发利用具有指导作用, 也为京津冀乃至全国地热规模化绿色开发提供了理论与技术支撑。

关键词: 地热资源; 勘查评价; 开发利用; 采灌均衡; 增产改造; 远程供热; 雄安新区

中图分类号: P314 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2026) 05-0000-00

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2026095

0 引言

雄安新区地热资源禀赋好, 是中国中东部地热开发利用条件最好的地区。地热能作为一种清洁、稳定、可再生的本土能源, 在该区能源结构转型与低碳城市建设中占据核心地位。近年来, 雄安新区在地热资源勘查评价、规模化开发与智慧化应用等方面取得了显著进展。

雄安新区水热型地热资源具有分布面积广、储量大、水质优、易回灌的特点, 在采灌均衡条件下, 全区水热型地热资源年可开采量折合标准煤 $346 \times 10^4 \text{ t}$, 可满足约 $1 \times 10^8 \text{ m}^2$ 的

建筑物供暖需求。全区均适宜浅层地热能开发，每 100 m² 的土地上埋设地埋管换热器可提供 2000 kW 的换热热功率，浅层地热能资源可满足约 1×10⁸ m² 的建筑物供暖、制冷需求（朱喜等，2023）。目前，雄安新区热能供热面积达到 945×10⁴ m²，约占据城镇集中供热总面积的 40%，标志着其地热规模化利用进入新阶段。

文章通过系统梳理雄安新区地热资源的勘探历程，剖析其开发利用现状与技术瓶颈，并基于当前理论认识和技术，对未来发展前景进行科学预展望，以期为京津冀乃至全国同类地质条件的区域提供科学、绿色、高效的清洁能源解决方案，助力国家能源结构转型与绿色低碳发展。

1 雄安新区地热地质背景及开发利用现状

1.1 地热地质背景

雄安新区位于华北克拉通西部，渤海湾盆地冀中坳陷中北部。冀中坳陷北邻燕山褶皱带、南接邢衡隆起，西临太行山隆起，东至沧县隆起（陈墨香等，1994；汪集旻等，2012）。次级构造单元包括徐水凹陷、容城凸起、牛驼镇凸起、保定凹陷、高阳低凸起、饶阳凹陷和霸县凹陷等，构成冀中坳陷“凹凸相间”的构造格局（图 1，图 2；杨明慧等，2002；何登发等，2018；王贵玲等，2020）。

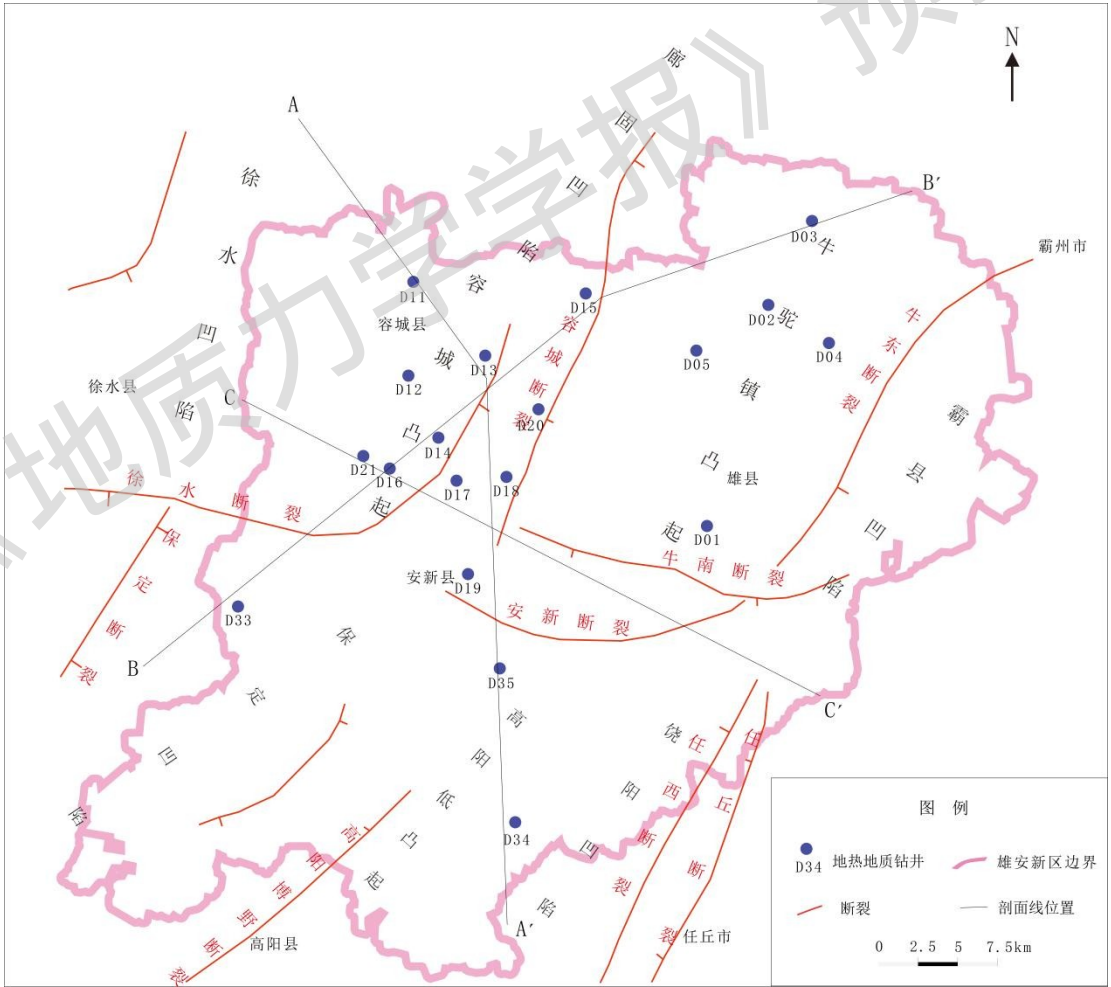


图 1 雄安新区构造纲要图及地热地质勘查点分布图

Fig. 1 Structural outline map and distribution of geothermal exploration sites in Xiong'an New Area

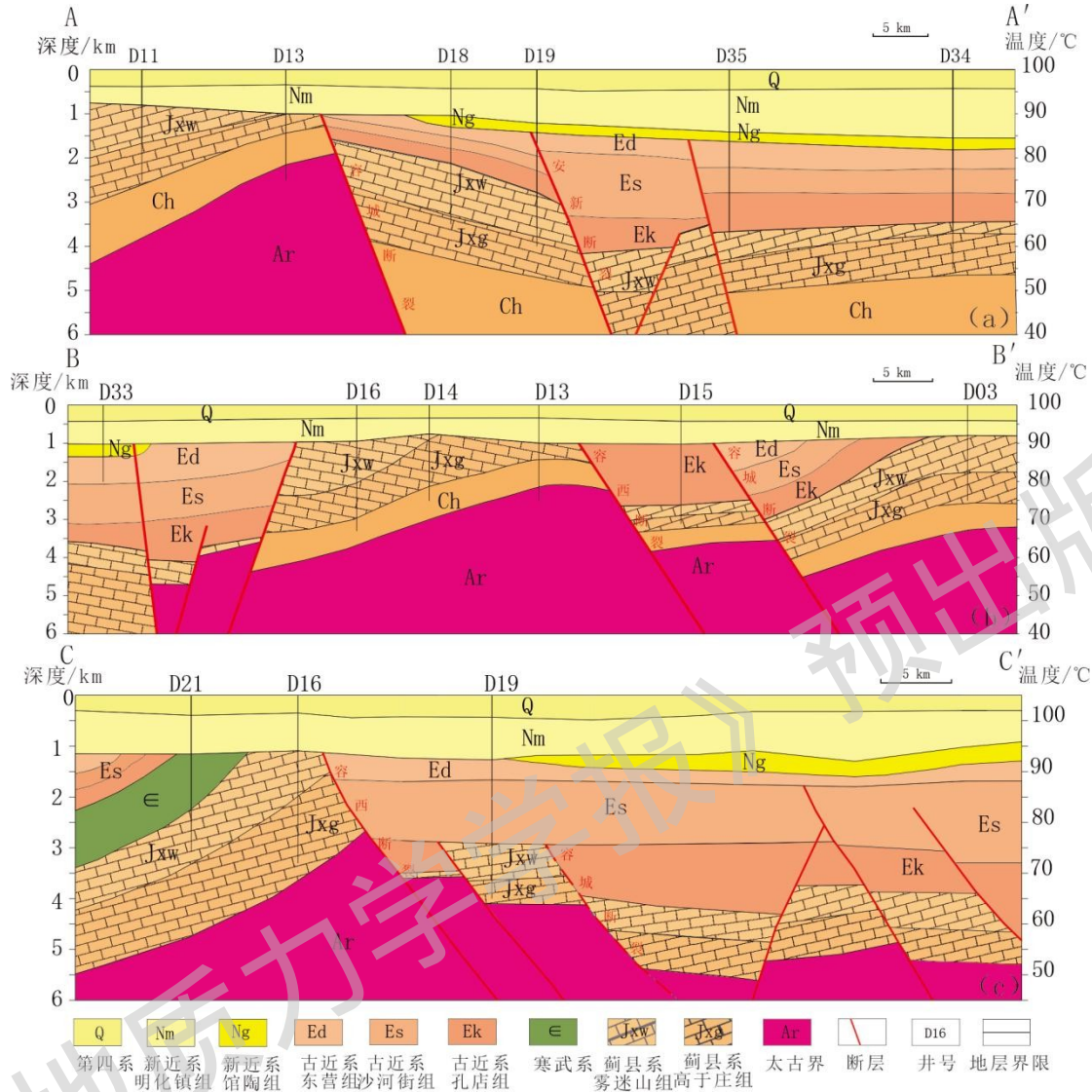


图2 雄安新区地热地质剖面图

Fig. 2 Geothermal geological cross-sections in Xiong'an New Area

雄安新区主要发育地层包括新生界（第四系、新近系和古近系）、古生界（寒武系）、中元古界（蓟县系和长城系）以及太古界（变质结晶基底；图3）。其中，新生界沉积岩层以陆相碎屑岩为主，古生界和中元古界沉积岩层以海相碳酸盐岩为主。

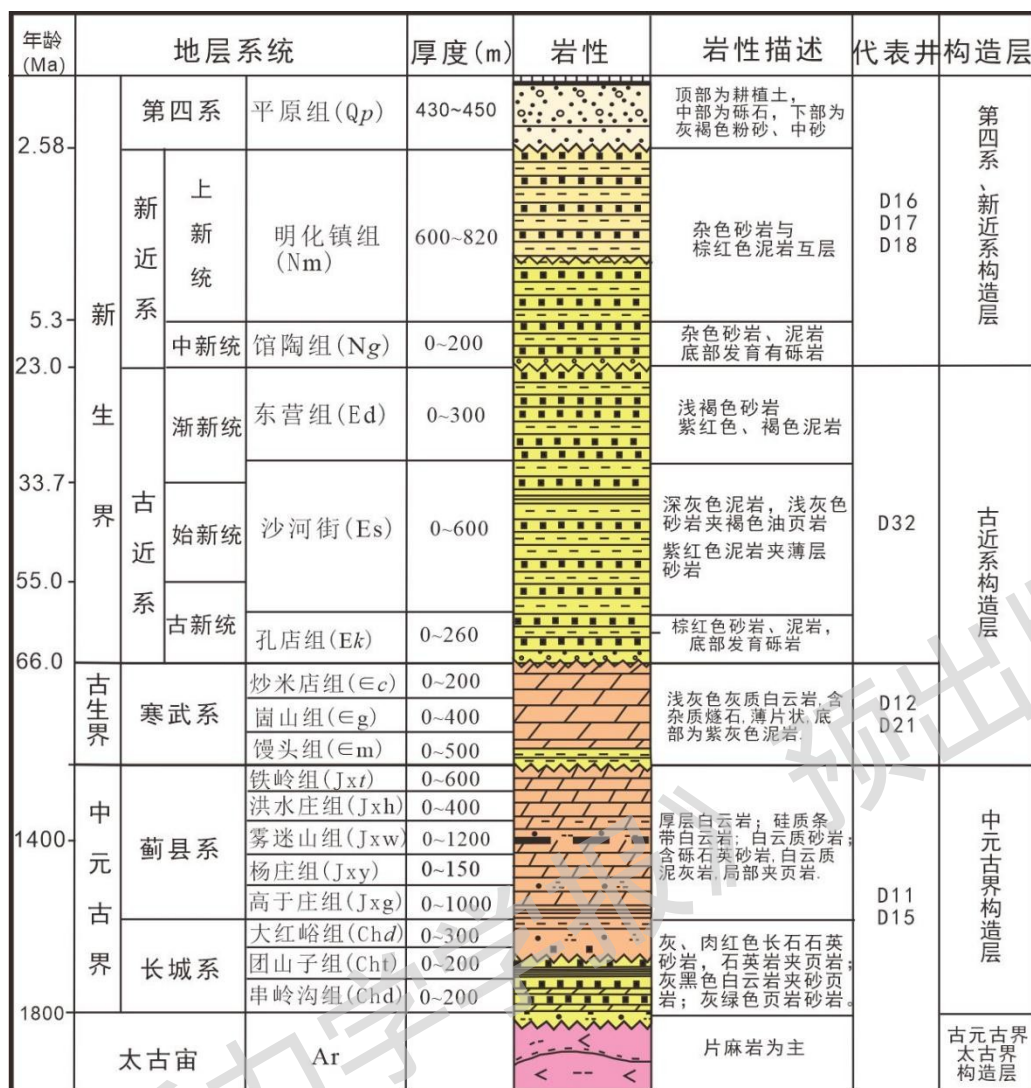


图3 雄安新区地层柱状图

Fig. 3 Generalized stratigraphic column of Xiong'an New Area

雄安新区发育的热储层主要包括浅部新近系明化镇组、馆陶组砂岩孔隙热储层，以及深部古生界、中元古界碳酸盐岩岩溶裂隙型热储层。目前，明化镇组热储作为后备水源禁止开采；古生界仅在该区西北部徐水凹陷有小范围揭露，热储面积较小且产能有限；蓟县系碳酸盐岩裂隙型热储则为主力热储层（吴爱民等，2018；王朱亭等，2019；王思琪等，2021；马岩等，2022；戴明刚等，2023）。

馆陶组 (Ng) 在冀中拗陷的凸起区未发育。以牛东断裂和徐水断裂为界，西北侧的容城凸起和牛驼镇凸起缺失该组地层，其他地区则普遍发育。D15 井揭露表明，2 个凸起间的斜坡带也局部发育该地层，厚度约 500 m。岩性以砂砾岩、砂岩为主，沉积厚度 200~893 m，在霸县凹陷内沉积厚度最大。热储层砂厚比 30~50%，孔隙度约 30%。热储温度为 40~80℃，涌水量 40~75 m³/h，矿化度 0.45~1.68 mg/L，水化学类型为 Cl-Na 型和 Cl-HCO₃-Na 型，pH 值为 7.3~9.7，是雄安新区孔隙型热储的主要层位。

中元古界蓟县系主要包括雾迷山组 (Jxw) 和高于庄组 (Chg)，在凹陷区的局部沉积铁岭组、洪水庄组等地层，但揭露的厚度普遍较薄。雾迷山组和高于庄组碳酸盐岩为最具开发潜力的热储层。除容城断裂附近外，雾迷山组全区普遍发育，主要岩性为含燧石条带白云岩和巨厚叠层石白云岩，沉积厚度变化较大，揭露厚度 0~2500 m；在部分凸

起顶部与上覆新近系明化镇组呈不整合接触，其他区域多与古近系沙河街组或孔店组呈不整合接触。热储中部温度为 83~110℃，涌水量为 25~250m³/h，溶解性总固体 2.8~3.0g/L，pH 值为 6.23~8.12，水化学类型以 Cl-Na 型为主。高于庄组发育情况与雾迷山组类似，除容城断裂附近外皆有分布，岩性为白云岩，裂隙分段发育，最厚处约 1500 m。热储中部温度为 83~123℃，涌水量为 10.7~120 m³/h，矿化度 1.4~3.7 g/L，pH 值 6.73~8.63，水化学类型以 Cl-Na 型为主。由于雾迷山组和高于庄组间并无明显标识，且岩性特征相似、水力关系密切，通常将两者视为同一套地热水层。

1.2 地温场特征

根据近年来雄安新区典型的地热井测温曲线（图 4），分析地温场垂向分布特征，具体钻孔位置见图 1。在 200 m 以浅，地层温度受到地形、浅表地下水流动等浅表因素的影响，温度波动相对较大。当深度大于 200 m 后，地层温度随着深度线性增大，热量传递以热传导为主。进入基岩地层后，地层温度表现出明显的均一化，地温梯度明显减小，地温曲线出现拐点。个别地热井因深部岩溶非均质性，存在测温曲线局部异常：如 D13 井在 1200 m 深度附近温度骤减后又恢复，D18 在 2200~2600 m 深度处温度出现倒转。分析认为，这主要是受断裂导水或者地层破碎带高渗性的影响，热量传输以热对流为主，造成温度波动较大（Pang et al., 2018；马峰等，2020，2022，2026）。

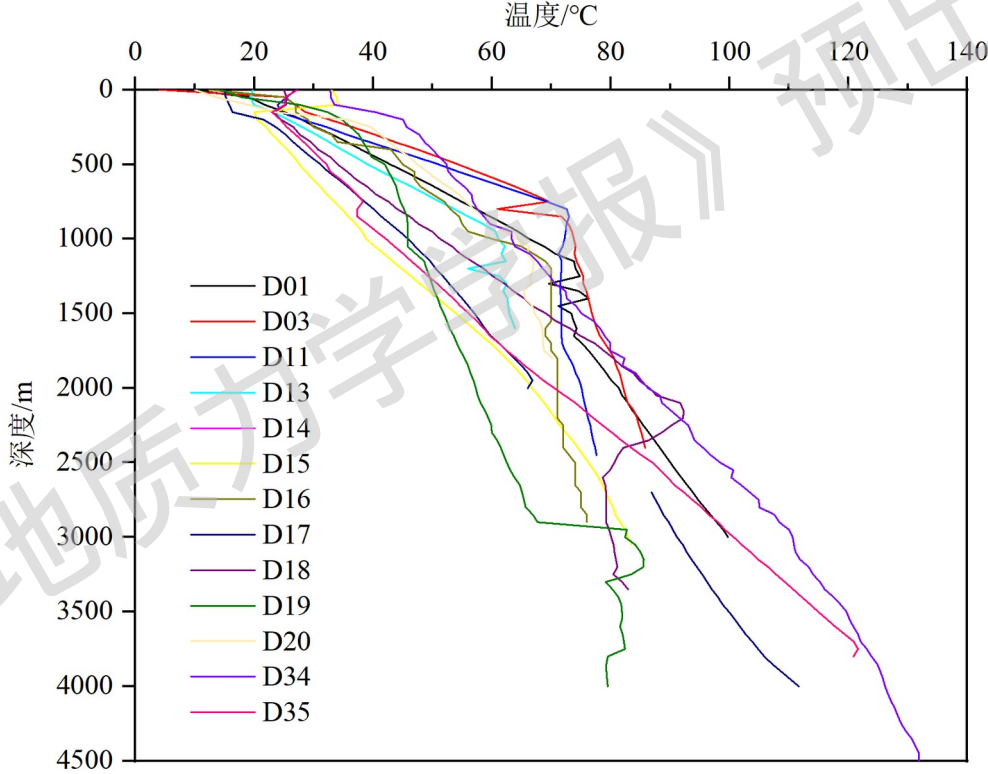


图 4 雄安新区地热勘探井稳态测温曲线

Fig. 4 Static temperature logs of geothermal exploration wells in Xiong'an New Area

雄安新区是河北省地温场异常最为显著的区域。在平面展布上，地温异常呈明显的东北向带状分布，与区域构造线方向高度吻合。高温中心多依附于牛驼镇凸起、容城凸起等构造高部位的一侧，尤其在潜山顶部的碳酸盐岩裸露区，常表现为“孤岛状”高温异常。空间分布特征表现为：中南部安新一带地温梯度相对较低，而北部及东部，尤其是雄县东南部至牛驼镇凸起轴部，地温梯度显著增高，构成了最主要的高焓热储区。在垂向上，地温场表现出显著的“浅部构造控热、深部对流控热”特征。浅部地层中，温

度等值线与基底凸起范围高度相关；但随着深度增加，等值线与基底构造的几何形态相关性逐渐减弱。这一现象表明，在深部（ $>1500\text{ m}$ ）的高温高压环境下，热对流作用逐渐取代热传导成为主导机制，热储层分布广泛且连通性好，使得同一深度平面上的温度场趋于均一化，为规模化、大区块集中开发提供了稳定的热源基础。

雄安新区地处华北盆地西部，受新生代以来岩浆活动与华北克拉通破坏影响，岩石圈显著减薄，区内岩石圈厚度普遍小于 100 km ，导致地幔热流升高。已有研究显示，渤海湾盆地整体大地热流值介于 $60\sim 65\text{ mW/m}^2$ ，而雄安新区所在的冀中坳陷中北部为高热流异常区，高热流（最高 $>100\text{ mW/m}^2$ ）集中分布于牛驼镇凸起、容城凸起等蓟县系顶面埋深较浅的构造高部位。浅埋藏与高热导率物性使深部热量快速传导至基岩顶部，同时在岩溶热储高孔渗水热对流作用下，加热上覆沉积砂岩层，形成高地温梯度；低热流区则分布于高阳低凸起、凸起间洼槽等凹陷带，其热流值在 $52\sim 68\text{ mW/m}^2$ 。

雄安新区温度场及热流分布主要受三重因素控制：①克拉通破坏引发岩石圈热状态剧变，地幔热流显著升高；②新生代沉积阶段形成的致密泥砂岩盖层充当“保温毯”，盖层厚度越小，热量越易在近地表聚集；③热储层风化裂隙特征调控水热对流，白云岩风化剥蚀强烈的顶部热储，因水动力条件好、流体对流增强，地温梯度显著降低，局部储层段甚至出现近零或负值。

1.3 开发利用情况

雄安新区将地热定位为供热体系的重要基荷之一，强调勘查评价先行、开发与保护并重、回灌硬约束与动态监测闭环。截至 2025 年底，已建成地热能供热能力 $945\times 10^4\text{ m}^2$ ，约占该区域城镇集中供热面积的 39.8%。在容东、容西、启动区、雄东、昝岗等新建片区近年采暖季运行中，地热供热占比进一步提升，其中启动区、容东片区突破 40%，部分片区地热供能占比接近 100%。

在利用方式上，雄安新区地热供能逐步推进集中式规模化及“地热+”的利用模式。地热供热形态从传统的单个小区配建一个地热站，逐步向片区级综合能源站转变。以容东片区为例，已建成片区级“能源站+若干供热卫星站+热力站”的三级树状热网，并以中深层水热型地热作为主要基础热源，辅以燃气或市政换热进行安全调峰与极寒冗余，形成“地热基荷+可调峰”的耦合结构。目前，新建片区投运能源站十余座，配套中深层地热井数十口、浅层地热井数千口，并与燃气调峰耦合，形成“地热+燃气”多能互补的综合供热结构。

2 雄安新区地热勘查开发理论技术创新

雄安新区地处华北盆地中部，深部构造条件复杂。以往研究多侧重盆地整体，认为中、新生代拉张构造与岩浆活动控制了热源形成，局部以热传导与热对流二元模式为主（Chen et al., 1994）。近年来的整装勘查成果表明，地壳深部稳定热流在向上传导过程中的“热折射”和“热对流”共同导致了热量在浅表部再分配，这主要受岩石热导率差异及盆地尺度地下水循环的共同制约。热流由低热导率的凹陷区向高热导率的浅埋潜山区汇聚，同时地下水经深循环加热后沿断裂上涌，形成了地温等值线与古潜山得“镜像”关系（熊亮萍和张菊明，1988）。

针对上述特征，有学者创新提出了“构造演化控热与热聚敛”理论，确立了“幔源为主，浅埋基底、高导储层传热，水循环聚热”的热聚敛模式及“潜山演化，断裂、裂隙控热”的构造控热机制，深化了坳陷聚热与对流贡献的量化等科学认识，并首次探获深部蓟县系高于庄组热储第二空间（周训等，2010；王贵玲等，2021；朱喜等，

2021)。

地热系统受控于“源-储-盖-通”四位一体的聚热机制。以深部地壳热传导为基础热背景，在区域凹凸相间的构造形态控制下，凸起区浅部地热资源丰度高，而凹陷区因沉积盖层厚、保温性好，深部地热资源更为富集；古潜山热储层在高热导率、高孔渗发育的条件下，层内热对流作用明显，温度分布趋于均一化，地温梯度在热储层段下降明显，这是岩层热量快速传导并叠加对流传热作用的结果。文中提出的雄安新区四元聚热机制，可概括为深部热传导供热、深大断裂作通道、构造格局控贫富、层内对流均热场。

2.1 古潜山“优势流传热”理论

2.1.1 理论认识

华北古潜山热储受控于复杂的岩性物性、空间格架及构造演化，其传热过程呈现多机制耦合特征。针对雄安新区地热成因机制，文章从“冷壳热幔”热结构识别与优势流传热机理 2 个维度展开论述（Furlong and Chapman, 2013；王贵玲等，2017，2020；朱喜等，2023）。“优势流传热”本质上是热量在岩石热物性差异下形成的热能传导驱动力与在岩石孔隙度差异下形成的流体对流驱动力双重作用下，热能在储层局部形成的优势热流通道及热量聚集区，这些热量聚集区在古潜山内呈局部层状与带状分布，形成了地热开发的“甜点区”。

(1) “冷壳”型热结构

雄安新区沉积盖层的放射性生热受岩性与沉积环境双重制约，且基本不受深部热传导及构造热事件的显著影响。通过对全区地层生热率（ A ）与热导率（ K ）的系统测试与分层统计（表 1），构建了自元古代至新生代完整的岩石热物性参数体系。

结果表明，雄安新区沉积层平均生热率为 $0.74\sim1.24\ \mu\text{W}/\text{m}^3$ ，未超过中国大陆地区的地壳放射性生热上限 $1.3\mu\text{W}/\text{m}^3$ 。利用“回剥法”计算的华北盆地冀中坳陷现今地壳热流为 $20\ \text{mW}/\text{m}^2$ ，地壳热流占地表热流的 29.5%。整个华北盆地古潜山热储的热源中，壳源热流总体低于 $30\ \text{mW}/\text{m}^2$ ，与区域主要由低放射性生热率的沉积岩、变质岩形成的岩性结构有关。以雄安新区 4000 m 钻孔的生热率计算结果来看，平均生热率为 $0.56\ \mu\text{W}/\text{m}^3$ 。其中，覆盖层为新近系和古近系砂岩、泥岩，生热率为 $0.37\sim1.81\ \mu\text{W}/\text{m}^3$ ；进入中元古界碳酸盐岩热储层后，生热率明显降低，平均值仅为 $0.29\ \mu\text{W}/\text{m}^3$ ，局部由于中生代时期侵入岩脉的发育，生热率超过 $1\ \mu\text{W}/\text{m}^3$ ；太古代变质岩基底的生热率为 $0.44\sim0.83\ \mu\text{W}/\text{m}^3$ 。因此，华北古潜山沉积环境下具有“冷壳”型热结构特征（Wang et al., 2019；王贵玲等，2024）。

表 1 雄安新区主要地层生热率和热导率

Table. 1. Radiogenic heat production and thermal conductivity of the main stratigraphic formations in Xiong'an New Area

地层代号	地质时代	岩性组成/%		生热率 $A/(\mu\text{W}/\text{m}^3)$	热导率 $K/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
Q+N	第四系+新近系	砂岩	30	1.17	1.907
		粉砂岩	20		
		泥岩	50		
E	古近系	砂岩	30	1.16	2.315
		粉砂岩	23		
		泥岩	45		
		陆相白云岩	2		
Mz+Pz	中生界+古生	砂岩	6	1.06	3.395

	界	粉砂岩	2		
		泥岩	6		
		灰岩	50		
		海相白云岩	25		
		海相碎屑岩	11		
Jx	蓟县系	海相碎屑岩	5	0.46	5.109
		海相白云岩	95		
Ch	长城系	海相碎屑岩	30	0.94	3.838
		海相白云岩	70		

（2）非线性传热特征

基于热力学定律与热量守恒原理，雄安新区所在的华北地区深部地热传热呈现出显著的非线性特征，其主控机制可归纳为以下 2 个层面。一是地质结构非均质性导致的热传递非线性。受华北克拉通破坏影响，地壳厚度在空间上呈现显著差异，叠加沉积环境的时空演变，致使元古界以浅的盖层与储层厚度发生剧烈变化。在构造活动强烈的区域，2 km 范围内储层厚度可增大约 20 倍，盖层与储层界面的埋深差可达 2000 m 以上。这种地质结构的强非均质性，导致即使在单一地层内部，其物性与热物性（如生热率、热导率）在横向与纵向上也存在显著差异，从而打破了传统的一维稳态热传导模式，使得区域热传递在三维空间下呈现复杂的非线性特征。二是构造-水文耦合主导的局部热对流。在深大断裂发育区，构造活动对热场的改造作用占据主导地位。地球化学示踪与钻探验证表明，区域断裂与次级断裂构成了地下水深循环通道：源自太行山隆起区的冷水沿断裂下渗，循环深度超过 4000 m，并在牛驼镇、容城等凸起潜山处汇聚、加热，形成温度超过 130 °C 的局部高温异常（朱喜等，2021）。

此外，潜山顶部强风化带及高渗性白云岩储层中发育的裂隙网络，诱发了强烈的层内地下水热对流。在储层尺度上，热对流的传热效率远高于热传导。这种强烈的对流作用不仅重塑了局部地温场，还起到了“热均质化”的作用，使得同一储层内的温度场趋于高度均一。这一机制解释了为何在深部地热系统中，热传导模型往往低估了实际温度分布，而必须将流体对流作为核心变量纳入考量。

2.1.2 勘查实践

基于上述优势传热理论与“构造-热聚敛”模式指导，近年来雄安新区地热整装勘查取得显著突破，多口探采结合井的实测数据有力验证了“凸起优势传导控热、储层内部对流聚热”的机理认识。

（1）高产能地热井证实热源供给充足

位于研究区高阳地热田高阳低凸体的 D35 井，井深 3853 m，孔口水温 108.9 °C，汽水混合流量达 250 m³/h，初步估算单井采热可满足 50×10⁴ m² 建筑面积的供暖需求。该井位于深埋岩溶及构造凸起聚热甜点区，具有优势流传热特征。在高阳凸起实施的 D34 井，井深 4517 m，井口温度 123.4 °C，井底温度高达 131.9 °C，汽水混合流量 142 m³/h。这两口井的实施，证实了雄安新区深部热储具备稳定的高温热源与充足的流体供给。

（2）储盖层“传导-对流”复合传热模式

位于容城凸起中心的 D14 井，其测温曲线清晰地揭示了垂向传热机制的转化特征（图 4）。上部盖层段表现为典型的传导型地温场，地温梯度为 3.68 °C/100 m，反映了巨厚沉积盖层的保温效应。中部主储层段对应高热导率高孔渗的蓟县系碳酸盐岩热储，地温梯度仅为 0.65 °C/100 m。地温梯度的急剧降低与温度的快速抬升，是强烈热对流作用的直接证据，

表明流体循环有效均一化了储层温度。下部潜在储层段为长城系长石英砂岩段，地温梯度回升至 2.18 °C/100 m，明显高于 D13 井太古界基底段的地温梯度 1.86 °C/100 m，这表明深部长城系地层存在弱水热对流特征，具备潜在的勘查开发能力。

(3) 断裂控热与层内对流机制

位于容城-牛驼镇地热田中南部的 D18 井，其温度剖面呈现典型的“温度倒转”特征，最高温度 93.1 °C 出现在 2120~2300 m 的高孔隙率发育段，而非井底。这一现象证实了构造-水文耦合对热场的改造作用。该井位于北东向容城断裂东侧约 1 km 的构造转换带，邻近 2 条切穿基底的正断层，为深部导热导水提供了通道。测井资料显示，2120~3500 m 井段共发育岩溶裂隙带 115 处，累计厚度 353 m。高孔隙段形成了优势传热通道，诱发了强烈的层内对流，使得热量在裂隙发育段聚集，导致温度峰值上移。此外，抽水试验曲线显示的典型水-汽二相混合特征，进一步验证了该区深部热储具有活跃的水热活动（岳高凡等，2021）。

以雄安新区典型地热剖面为例（图 5），受上述控热机制的制约，过 D16、D17、D18 容城凸起及牛北斜坡的剖面上在 1550m 存在热流平衡线，热流平衡线以上，潜山顶部温度要高于拗陷区同一深度的温度，地温场与潜山形态呈一致的“上凸”状，热量由潜山顶部向凹陷区“折射”；在热流平衡线以下，潜山凸起深部温度要低于拗陷区同一深度的温度，热量由凹陷区向潜山顶部“折射”。

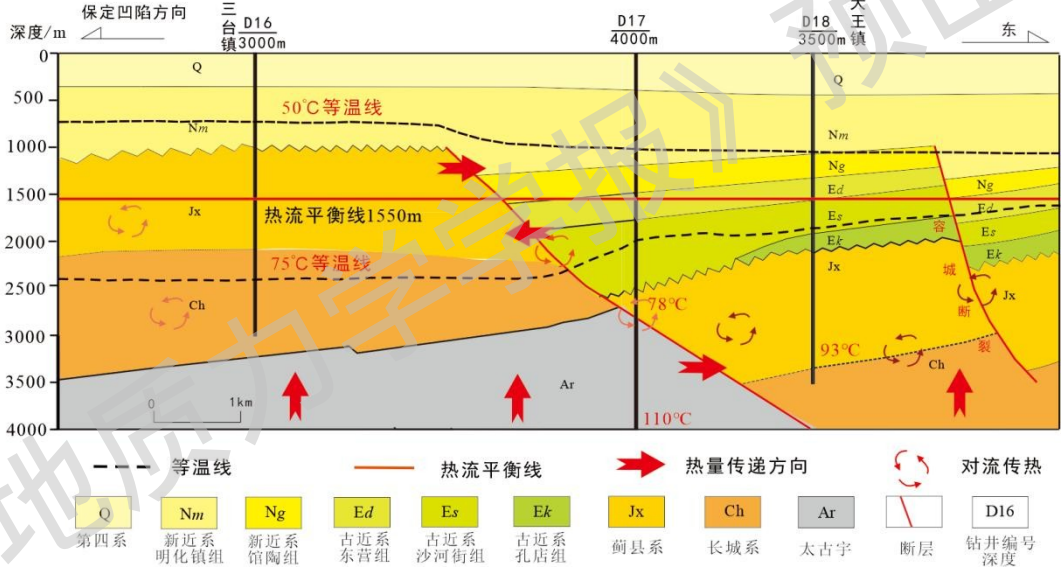


图 5 古潜山热储热量传递示意图

Fig.5 Schematic diagram of heat transfer in buried-hill geothermal reservoir

2.2 采灌均衡评价方法

2.2.1 方法创新

中国地热资源评价方法体系经历了从静态储量估算向动态可采量评价、从单一热储计算向采灌均衡约束下可持续性评价的重要转型。早期《地热资源评价方法》（DZ 40—85）（中华人民共和国地质矿产部，1985）初步建立了热储法、自然放热量推算法及水热均衡法的技术框架。随着水热型地热资源开发强度加大，《地热资源地质勘查规范》（GB/T 11615—2010）（中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会，2011）进一步规范化了地表热流量法、解析模型法及数值模拟法等流程。然而，针对雄安新区这类以碳酸盐岩为热储、大规模采灌均衡开发为特征的地区，传统方

法难以精准刻画回灌引发的热突破风险及流场变化（赵佳怡等，2020；Caulk et al., 2023；戴明刚，2025）。

为此，此次研究在传统热储法的基础上，创新性引入了“热突破”理论与“回灌条件下单井开采权益保护半径”概念，构建了适用于雄安新区深层地热资源的评价方法。该方法综合考虑了回灌率、采灌井间热交换效率、热储温度衰减及边界热补给等因素，能够更真实地反映采灌协同条件下的资源可持续开发潜力（Gringarten and Sauty, 1975；Portier et al., 2020）。文中采用的主要计算公式见公式（1）—公式（4）。

（1）地热资源量计算，采用热储法计算，公式如下：

$$Q = \rho_r C_r (1 - \Phi) V (T_1 - T_0) + \rho_w C_w q_w (T_1 - T_0) \quad (1)$$

式中， Q —地热资源量，kJ； C_r 、 C_w —分别为热储岩石比热和水的比热，kJ/kg·°C； ρ_r 、 ρ_w —分别为热储岩石密度和水的密度，kg/m³； Φ —热储岩石孔隙率（或裂隙率）； q_w —流体储量，包括容积储量和弹性储量，m³； T_1 —热储温度，°C； T_0 —恒温层温度，°C，取15°C； V —热储体积，m³。

（2）地热流体储存量计算，包括容积储存量与弹性储存量两部分，公式如下：

$$Q_{\text{储}} = \phi V + SA(h_c - h) \quad (2)$$

式中， $Q_{\text{储}}$ —地热流体储存量，m³； S —弹性释放系数； h_c —平均承压水头标高，m； h —平均热储顶面标高，m； A —评价热储面积，m²；其他变量含义同上。

（3）地热流体可开采量计算，采用采灌均衡法计算。该指标是评价地热资源丰富与否的最重要的参数，文中采用采灌均衡法进行计算。计算动态资源量的约束条件为：①设定100 a作为地热资源可持续利用的时间尺度；②水温百年最大下降量定为2°C，水位埋深百年最大下降量50 m。按采灌均衡条件下开采100 a，消耗15%的地热储量，根据热量平衡计算影响半径，确定允许开采量，公式如下：

$$R = \sqrt{1 - \alpha\beta} \times \sqrt{\frac{tf Q_{\text{抽}}}{0.15 H \pi}} f = \frac{\rho_w C_w}{\rho_e C_e} \alpha = \frac{Q_{\text{回灌}}}{Q_{\text{抽}}} \beta = \frac{T_2 - T_0}{T_1 - T_0}$$

$$Q_{\text{允}} = \frac{AQ}{\pi R^2} = \frac{0.15 AH}{(1 - \alpha\beta) tf} \quad (3)$$

式中， R —采灌均衡条件下的影响半径，m； t —时间，取100 a； $Q_{\text{抽}}$ —水位降深时20 m的单井涌水量，m³/d； $Q_{\text{回灌}}$ —回灌量，m³/d； T_2 —回灌温度，取25°C； T_0 —恒温层温度，°C； $Q_{\text{允}}$ —采灌均衡条件下允许开采量，m³/d； A —评价热储面积，m²； H —热储层厚度，m； ρ_e —热储中岩石和水的密度，kg/m³； C_e —热储中岩石和水的比热，kJ/kg·°C； α —回灌率； β 、 f —无量纲参数；其他变量含义同上。

（4）地热流体可开采热量计算公式如下：

$$Q_p = Q_{\text{wk}} C_w \rho_w (T_1 - T_0) \quad (4)$$

式中， Q_p —地热流体可开采热量，kJ/d； Q_{wk} —地热流体可开采量，m³/d； C_w —地热流体的比热，kJ/kg·°C； ρ_w —地热流体的密度，kg/m³； T_1 —热储温度，°C； T_0 —恒温层温度，°C。

2.2.2 方法应用

基于蓟县系厚度、顶板埋深、热储中部温度、单井涌水量、水位埋深及热储地热流体矿化度等要素等值线进行评价分区，共分成61个分区块。计算参数选取上，容城地热田和牛驼镇地热田评价深度为4000 m；高阳地热田由于盖层厚度较大，蓟县系热储埋深一般大于3500 m，考虑实际开采条件，评价深度定为4500 m。

经计算，雄安新区蓟县系碳酸盐岩热储地热资源量为5086.16×10¹⁶ J，地热流体存储量为95.6×10⁸ m³，采灌均衡条件下热储地热流体可开采量为88.24×10⁴ m³/d，地热流体可开采热量为8.84×10¹⁶ J/a，折合标准煤301.8×10⁴ t/a，可供暖面积2.8437×10⁸ m²。科学规范开发

深部地热资源，有助于构建雄安新区清洁低碳、安全高效的能源体系，为能源结构绿色低碳转型提供重要支撑（余鸣潇等，2023）。

2.3 广域电磁技术

2.3.1 技术创新

广域电磁法（Wide-field Electromagnetic Method, WFEM）是一种频率域有源（可控源）电磁测深方法。该方法继承了传统可控源音频大地电磁法（CSAMT）使用人工场源克服场源随机性的优点，从场的统一性出发，保留了传统卡尼亚视电阻率公式中忽略的高次项，将“近区”“过渡区”和“远区”有机统一起来，定义了广域视电阻率，改善了非远区的畸变效应，使测深能在不局限远区的广大区域进行，显著增强了探测深度。此外，广域电磁法采用多频伪随机信号发射，而不是常规 CSAMT 的变频发射，一次发射可完成多个主频成分的测量，压制由变频引起的随机噪声影响，显著提高了野外勘探效率与精度（何继善，2020；He et al., 2020；Hu et al., 2024）。

WFEM 利用地偶极子探测电场，利用磁天线感应磁场。当在均匀半空间表面使用水平电偶极子作为发射源时，由一对接地电极形成的电流源作为场源，测量平行于供电电极方向的水平电场分量 E_x 。两电极之间的电场 E_x 和电位差 (M, N) 分别为：

$$E_x = \frac{IdL\rho}{2\pi r^3} [3\cos^2\varphi - 2 + e^{-ikr}(1+ikr)] \quad (5)$$

$$\Delta V_{MN} = E_x \times MN = \frac{IdL\rho}{2\pi r^3} F_{E-E_x}(ikr) \times MN \quad (6)$$

式中， I —电流强度； dL —电偶极子源的长度； i —纯虚数； r —发射与接受的距离，即观测点到偶极子中心的距离； φ —电偶极子源方向与从源中点到接受点的矢量直径方向之间的夹角； ΔV_{MN} — M 和 N 两个极点之间电压差； ρ —大地电阻率； k —均匀半空间中的波数； MN —两个电极之间的记录（ M 和 N ）。上面两式代入，可得：

$$\rho = K_{E-E_x} \frac{\Delta V_{MN}}{I} \frac{1}{F_{E-E_x}(ikr)} \quad (7)$$

$$F_{E-E_x}(ikr) = 3\cos^2\varphi - 2 + e^{-ikr}(1+ikr) \text{ and } K_{E-E_x} = \frac{2\pi r^3}{dL \times MN} \quad (8)$$

式中， $F_{E-E_x}(ikr)$ —由频率、磁导率、地电阻率、传输距离等因素组成得复函数，反映了电磁效应在地下的传播特性，称为“电磁效应系数”。 K_{E-E_x} —只与极距相关的系数，在广域电磁测深中提取电阻率时称为“装置系数”。

可以看出，与传统方法相比，WFEM 严格推导电磁波方程，充分考虑全部信息，并采用迭代法计算视电阻率参数，实现了全息电磁勘探。

2.3.2 技术应用

2018 年，雄安新区容城地热田勘查首次采用了 WFEM 对热储顶面进行识别。蓟县系热储顶部作为古潜山的风化壳，在多数区域具有高孔渗、高含水的特征。由于含水热储与相对“干”围岩之间存在可识别的电阻率差异，频率域有源电磁测深在地热构造识别上有天然适配性；而 WFEM 的深部覆盖能力与对过渡区的容忍度，使其在追踪埋深较大、受断裂控制的有利含水构造时具备比较优势。

WFEM 勘探深度大、精度高，在雄安新区寻找埋深较大的热水储层构造时，具有精度高、成本低等优势。测线横跨容城地凸起—容城断裂—淀北洼槽，穿越主要导热构造。从结果来看，广域电磁法对主要地层与构造单元识别较为清晰，与测线穿越容城凸起，淀北

洼槽、牛驼镇凸起 3 个次级构造单元相符。凸起区的有利区主要为相对低阻区；洼槽区基底埋深大，约 2500~4500 m，有利靶区位于控洼断裂附近。容城凸起与牛驼镇凸起基底两阻率存在明显差异，可能与 2 个场源参与计算有关。该技术为淀北洼槽 D15 井的部署提供了依据，该井在设计深度 3000 m 内揭露了蓟县系热储层（图 6）。

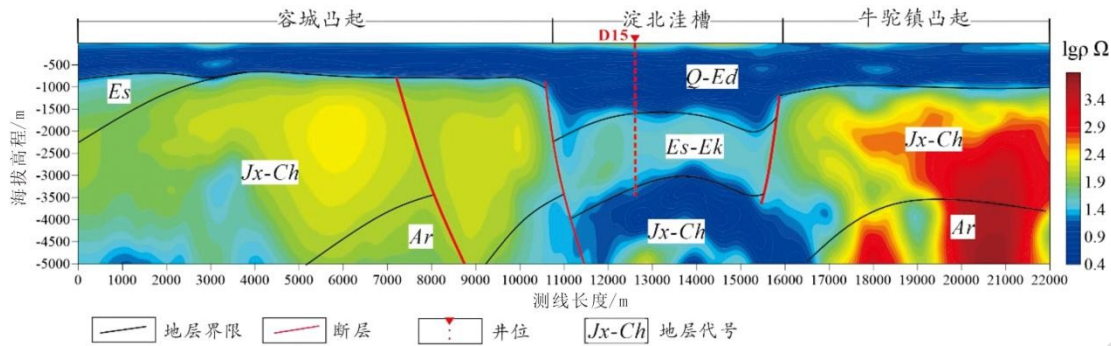


图 6 雄安新区晾马台乡广域电磁测线反演电阻率图

Fig. 6 Inverted resistivity section of a wide-field electromagnetic survey line in Liangmatai, Xiong'an New Area

2.4 高效取芯钻探技术

2.4.1 技术创新

针对古潜山蓟县系雾迷山组顶部风化壳破碎、岩芯采取率低的难题，提出了小径先导探孔钻进工艺。通常，雾迷山组热储层上部的井身结构多为 $\Phi 311$ mm 口径以上的大口径井筒；钻进顶部风化壳过程中，如果遇到较大型空洞裂隙，极易发生井内泥浆瞬时漏失，并筒失稳坍塌等重大事故。采用小径先导探孔钻进工艺，在临近雾迷山组顶部风化壳时，更换 $\Phi 152$ mm 的小直径钻具，先以小径打探，摸清漏失层埋深及漏失程度，对泥浆体系进行调整，再实施扩孔成井施工，避免井内恶性坍塌事故的发生。同时，针对蓟县系雾迷山组岩芯完整性问题，采用孕囊金刚石取芯钻具可大幅度提高钻探取芯率。雾迷山组储层以硅质条带白云岩为主，软硬互层，裂隙发育、破碎漏失特征典型。常规大口径取芯普遍存在冲蚀散芯、卡堵掉芯、钻头耗损大、取芯率低的痛点，围绕钻柱组合、取芯钻具结构、钻头体系、钻井泥浆及钻进工艺参数等方面，形成了成套且具有针对性的取芯钻探技术（樊腊生等，2020）。

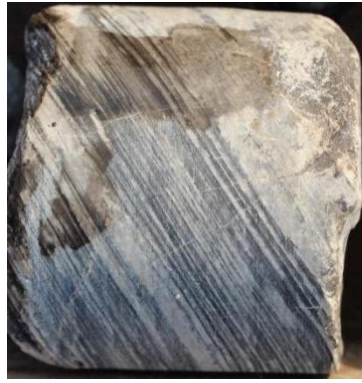
钻遇地层软硬交错时，大口径取芯钻头切削面积较大，切削齿与岩石接触交变受力，易导致 PDC 取芯钻头崩齿，快速磨损失效。以 $\Phi 152$ mm 单动双管取芯钻具为核心，采用孕囊金刚石取芯钻头，在结构尺寸允许的情况下尽量加大取芯钻头的内径，减小钻头的切削面积。连接近满眼钻具串，依照如下顺序连接钻具：取芯钻头+下扩孔器+取芯管+变径接头+粗径钻具钻铤+ $\Phi 127$ mm 钻杆。图 7 中为相对坚硬的燧石白云岩采用改取芯技术所获取的岩芯，设备取芯管长度以 5~6 m 为宜（图 7）。



$\Phi 152$ mm 取芯钻具



Φ152 mm 取芯钻头底部



燧石白云岩

图 7 Φ152 mm 单动双管取芯钻具及取芯样品

Fig. 7 Φ152 mm single-tube double-barrel coring tool and retrieved core samples

2.4.2 技术应用

D11、D12、D13、D15、D19、D22 井的施工均采用了上述钻进成井工艺和取芯技术。取芯钻进时注意控制钻进参数，以“中低钻压、中低转速、小泵量”为原则，确保底部取芯钻具运动平稳、不跳动。6 口地热勘探井总取芯进尺为 315.16 m，获取岩芯长度为 268.03 m，整体岩芯采取率达到 85.06%，明显提升了钻探取芯率（表 2）。

表 2 雄安新区施工 6 口地热勘探井取芯情况统计

Table. 2. Statistics of coring operations for six geothermal exploration wells in Xiong'an New Area

序号	井号	取芯进尺/m	岩芯长度/m	平均岩芯采取率/%
1	D11	59.38	50.32	84.74
2	D12	67.33	58.30	86.59
3	D13	50.51	41.85	82.85
4	D15	49.44	43.56	88.10
5	D16	52.33	42.76	81.71
6	D22	36.17	31.24	86.37

2.5 增产改造技术

2.5.1 技术创新

近年来，雄安新区开展了大量的储层增产改造理论与现场试验，逐步形成了针对碳酸盐岩地热储层酸化压裂、加砂压裂、定向造缝、近井酸化解堵等一系列成熟改造技术（马峰等，2022；原若溪等，2022；岳高凡，2022）。

当前主流的增产改造技术以力-化耦合作用为核心，改造机理结合了岩石断裂力学、流体动力学与酸岩反应动力学等。加砂压裂通过注入高压流体增大孔隙压力，当满足拉张破坏准则或剪切破坏准则时，会在岩石基质中产生人工裂缝或者延展天然微裂缝，进而构建裂缝网络；随后向裂隙空间注入陶粒、石英等高强度支撑剂，借助颗粒骨架分担地层闭合压力，抑制裂缝回弹闭合，形成长期稳定的高导流渗流通道（图 8a、8b）。基质酸化属于近井地带修复技术，依靠酸液的对流扩散作用渗入储层孔隙及裂隙，溶蚀钻井固相残渣次生结垢等堵塞介质，恢复地层原生渗流能力；该工艺不突破岩石破裂压力，作用半径通常小于 1 m。酸化压裂是深部低渗碳酸盐岩储层的主力改造工艺，融合了水力造缝与化学溶蚀双重作用：除水力作用造缝外，盐酸会与碳酸盐矿物发生化学反应，在裂缝壁面形成非均匀蚀刻形貌，借助凹凸形貌维持裂缝支撑状态，使其在地层闭合应力作用下依然保持

一定的导流能力（图 8c、8d）。酸压改造受多重因素影响，各参数作用机制错综复杂。研究表明，加大酸液浓度、延长反应接触时间虽可增强溶蚀反应强度，但过量酸蚀会弱化裂隙面支撑结构，致使裂隙在高闭合应力下发生闭合，最终使得储层导流能力衰减。定向造缝技术主要依托水力喷射等工艺，根据伯努利流体方程，利用高速射流形成负压引射效应实现定向造缝；与酸化工艺复合后，能够改善单一酸压滤失量大、裂缝延伸受限的问题，是深部碳酸盐岩储层精细化改造的重要配套技术。此外，通过前置液注入、多级交替注入稠化酸与乳化酸等技术体系形成深度酸压，可有效延缓酸岩反应、抑制酸液滤失，显著提升酸液有效作用距离。

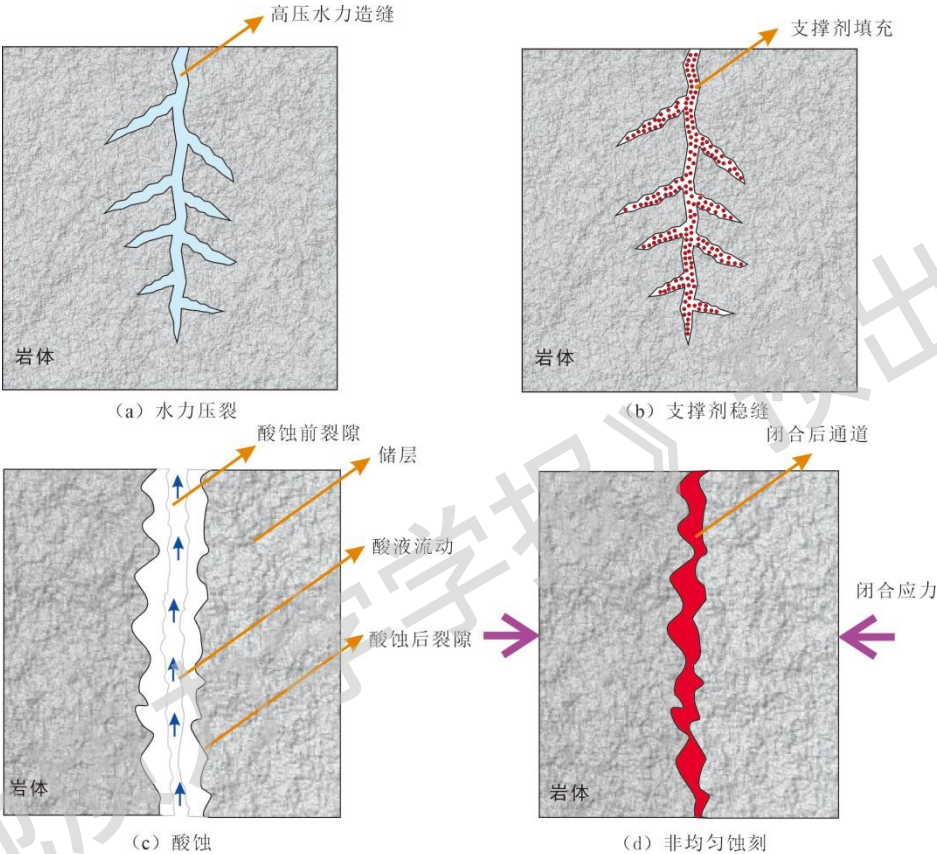


图 8 水力压裂和酸蚀改造的增产改造机理

Fig. 8 Mechanisms of reservoir stimulation by hydraulic fracturing and acid etching

2.5.2 技术应用

D22 井揭露了深部低渗热储层，目的层位为 3024~3174 m 的高于庄组白云岩。储层整体致密低渗，且受前期钻井泥浆侵入影响，近井地带裂隙闭合，原生渗流通道几乎完全失效。改造前该井产能较低，单井涌水量仅 4.72 m³/h，单位涌水量仅 0.024 m³/(h·m)，无法满足地热开发利用需求。针对该井储层特征，采用水力喷射+酸化压裂的组合工艺，分上、下两段低渗透层进行定向精准射孔，通过高压设备交替注入 15%盐酸溶液与专用胶液，实现分段造缝和分段溶蚀改造。模拟结果显示，改造后下层储层的裂缝有效水平延伸长度约 72 m，超过了常规酸压改造的作用范围。改造后该井产能实现跨越式提升，单井涌水量增至 44.10 m³/h，单位产能提升 8 倍以上；同时，地热流体温度从 60.0℃升至 66.5℃，既解决了热储产能低下的问题，又提升了地热资源品质。

综合现场试验与应用成效，雄安新区现已构建起一套碳酸盐岩热储增产改造技术方案，

实现了不同埋深、不同渗透率储层的改造应用。深部低渗的储层，以酸化压裂为主，酸液与碳酸盐矿物的反应特性，使酸化技术在碳酸盐岩热储层中优势突出；与水力喷射技术的结合，则有效弥补了常规酸化压裂的裂缝延伸距离小、作用范围有限的不足。深部中渗的储层，以加砂水力压裂为主，成本相对更低，作用效果显著且长期稳定。对中浅层雾迷山组岩溶储层，可采用基质酸化、小型压裂等轻量化改造，重点解除近井地带的污染堵塞。雄安新区地热储层增产改造成效突出，为同类型中深层碳酸盐岩地热资源开发提供了可推广的技术模式。

2.6 远程供热技术

中国北方盆地型地热资源虽具备储量丰富、分布集中等优势，但其资源禀赋与能源消费中心存在显著的逆向分布特征，即“资源富集区负荷小、负荷中心资源匮乏”的空间错位矛盾。这一结构性瓶颈严重制约了地热能的基地化与规模化开发。为突破这一限制，近年来以“跨域集输”为核心理念的创新模式应运而生：在地热富集区实施“集中开采、同层回灌”，依托长距离、大温差市政热网，将低品位热能转化为高品位热能并高效输配至数十千米外的核心负荷区，从而实现地热资源在空间维度上的优化配置与价值最大化（Van Dam et al., 2022）。

2.6.1 技术创新

传统“一井一站、就地消纳”的分散式开发范式，受限于生态红线约束、城市规划布局及单井产能衰减，本质上将地热视为局域性点状资源。该模式不仅难以释放高产热储的规模效应，更易诱发局部过量开采导致的水位降落漏斗与地面沉降。为打破这一困局，借鉴电力系统“特高压输电”思路，构建了“集中开采-远程输送-分散配热”的跨域集输体系，其核心技术突破体现在以下3个方面。

（1）在资源端建立群井协同采灌与热储工程。研发了基于数值模拟的井位优化布置与采灌方案设计软件，创立了地下-地上一体化协同采热技术。该模式攻克了传统对井采灌中因温差波及体积不均引发的“热突破”（短路）及“死区”残留难题，形成了群井规模化采灌新范式，显著提升了地下热储的动用效率与可持续开发能力。

（2）在管网端实现超大温差输热。针对长距离输配的能耗与成本难题，探索相变储热等高效载热方式，通过提升供回水温差，大幅降低管网初投资与循环泵耗。同时，研发兼具低成本与高性能的纳米改性保温材料及耐腐蚀管材，并开发集成光纤传感与自诊断功能的智能管道系统，实现对管道健康状态的实时监测与早期泄漏预警。

（3）在调控端构建智慧供热与多能互补系统。构建了涵盖气象感知、负荷预测、多能耦合的智慧供热平台，实现了从热源到热用户的全过程数字化管控。通过引入大数据算法优化调度策略，保障了跨域输配系统在变工况下的稳定性与经济性，解决了地热负荷波动性与城市用热连续性之间的矛盾。

2.6.2 技术应用

雄县早在雄安新区设立前就已通过中石化绿源等企业的持续开发，建立起以基岩碳酸盐岩岩溶热储为对象的多井群开采-同层回灌体系。设立后，这套实践被整体升级为规划先导、统一标准、统一监管的现代能源工程，全区在地热资源勘查评价基础上划定可采区与保护区，所有新井必须配套等量回灌，实施“取热不取水”的闭路循环，地热流体在首站换热后即回注地下，确保水位不降、地面不沉、水质不污。近年来，结合该区地热资源分布特征及城市规划，在地下-地上一体化开发的框架下，形成了跨区域的“集采-集输-集灌”模式。井群多布设在启动区外围、乡镇与农田下方的热储有利带，经换热站提取热量后，二次侧热水汇入市政供热管网（或专用供热干线），再分配到安置房社区、公共建筑与产业园区。这里“跨域”的跨越，首先是地质空间上从古潜山热储带到城市功能区的数十千米级输配，其次是管理形态上从分散的民间小锅炉、散户地热井转向统一特许经

营、统一回灌监管、统一热网调度。

目前，已构建深部热储“集采-集输-集灌”规模化开采新模式（图 11），并建立了群井采热示范，满足了高铁片区 160 MW 基础负荷，年节约折合标准煤 $3.3 \times 10^4 \text{ t}$ ，减排二氧化碳 $8 \times 10^4 \text{ t}$ 。在雄东片区建成了 6 km 范围热能的稳定高效输送工程，实现了地热能开发“异地取热”和“化零为整”的新突破，为深部热能开发利用提供了新模式。

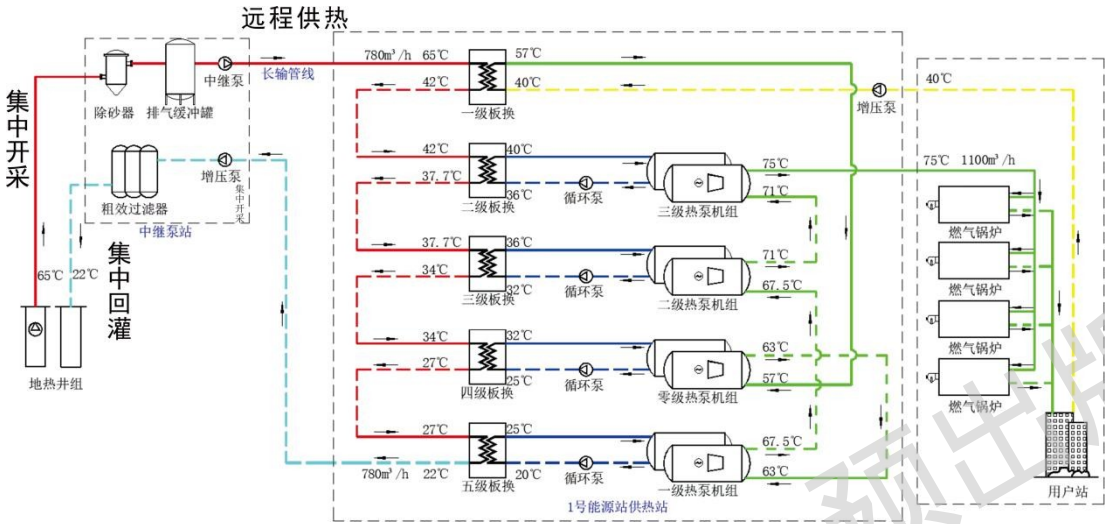


图 9 集中开采-低耗传输-低品位区集中回灌-全流程开发调控技术

Fig. 9 Technology framework for centralized production, low-energy-consumption transmission, centralized reinjection in low-grade areas, and whole-process development regulation

3 雄安新区地热勘探开发展望

3.1 深部热储空间具备探测开发潜力

2018 年以前，雄安新区尚未开展系统的地热田整装勘查，对高于庄组的研究尤为薄弱，其热储特征、单井产能也并未明确。经过全区系统的勘查部署，区内揭露高于庄组地层的地热勘探井共 15 口，占勘探井总数的 48%；其中 13 口在雾迷山组及以上终孔。除容城断裂附近的 XK03-1、XK02-1、D13、D17 井揭露太古宇外，其余钻井仍有较大可能加深至高于庄组（图 10）。

表 3 雄安新区高于庄组热储厚度及单井产能

Table 3 Thickness of the Gaoyuzhuang Formation geothermal reservoir and individual well productivity in Xiong'an New Area

井号	构造位置	高于庄组厚度/m	单井产能/(m^3/h)	井底温度/($^{\circ}\text{C}$)
D01	牛驼镇凸起中部	493.5	119.3	64.1
D02		1125.0	10.7	65.5
D03		743.1	44.1	68.2
D05		994.3	-	-
D06	牛驼镇凸起北部	914.4	-	-
D16	容城凸起中部	925.2	171.4	69.6
D11		850.8	125.0	71.0
D14		1240.0	68.8	59.6
D22		1556.2	44.1	70.3

D19	容城凸起南部	261.8	47.3	80.1
D20	容城凸起东部	88.0	83.2	71.0
D18		174.0	120.0	93.3
D34	高阳低凸起中部	814.4	94.5	123.4

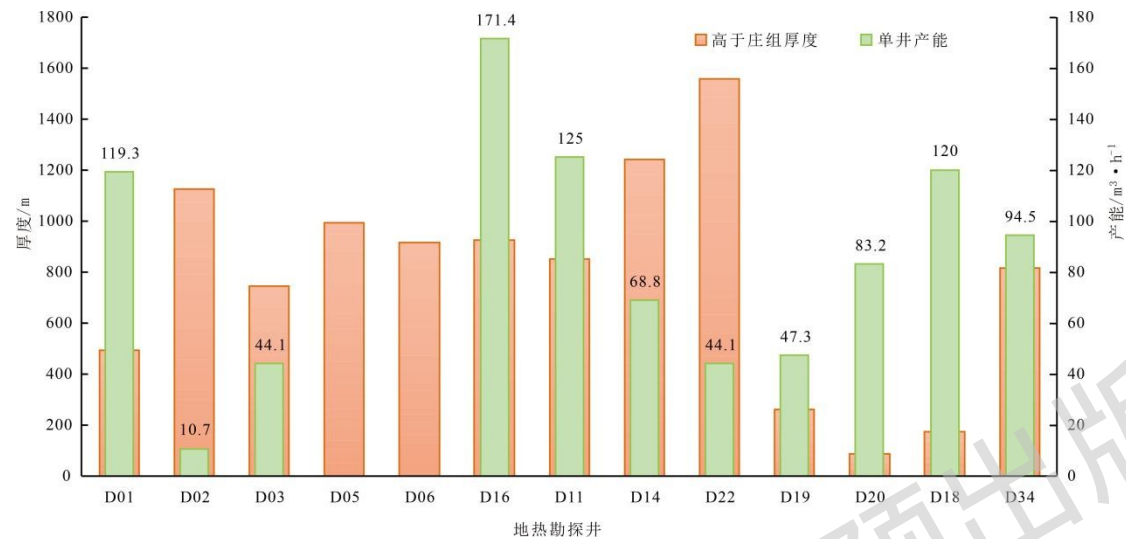


图 10 雄安新区典型地热井高于庄组热储的厚度及产能

Fig. 10 Thickness and productivity of the Gaoyuzhuang Formation geothermal wells in a representative geothermal well in Xiong'an New Area

勘探结果表明，除容城凸起东部靠近容城断裂一带外，全区高于庄组普遍较厚，容城凸起中部揭露热储厚度 1556.2 m（未揭穿），南部揭露厚度 261.8 m（未穿）。顶板埋深在凸起周边差异较大，凸起顶部与洼槽区厚度埋深相差可超过 1000 m。热储单井产能区域差异明显，全区为 10.7~171.4 m³/h，受储厚比、裂隙度影响明显，凸起顶部揭露的高于庄组岩性为白云岩，泥质含量少，裂隙发育段多、厚度大。高于庄组热储温度普遍较高，凸起顶部约 60℃，凸起两侧及高阳低凸起等埋深较大区域，温度最高可达 120℃以上。

高于庄组具备高产能热储的流量、温度等基础条件，且埋藏深度适中。热储增产改造试验也表明，高于庄组裂隙不发育段也可以通过压裂增产改造沟通周边裂隙较发育的区域改造后产能稳定，具备规模化开发利用潜力。

3.2 推进地热规模化数智化综合开发

随着雄安新区地热开发管理逐步走向“数智化”，已形成地热资源“源-网-站-户”全链条数字化管理体系。依托物联网与 5G 技术，将全区所有地热开采井、回灌井、专用监测井及末端用户纳入统一的能源互联网平台，打破数据孤岛，实现“产能-输配-用能”数据的实时交互与双向互动。通过部署高精度传感器，对深部热储及地热开发进行实时探测监测，实现对地下水位、水温、流量等参数的动态监测，构建地热田数字孪生体，为资源科学调度与可持续开发提供坚实的数据底座。

深度融合人工智能（AI）与云计算技术，推动地热勘探开发由“经验驱动”向“算法驱动”转型。利用机器学习算法分析历史开采数据与实时回灌能力，动态优化采灌井群的轮换策略，解决热突破与热储压力下降难题；建立热负荷精准预测模型，自动调节换热站输出参数，实现“热力平衡、精准供热”，大幅降低运行成本与管网热损。

紧密结合雄安新区资源禀赋与城市规划，构建“深浅结合、梯级利用、多能互补”的产业生态。以起步区、容东、雄东高铁、安新及雄县片区为核心，建立规模化地热集

中供暖片区，确立地热作为区域基础负荷能源的地位；科学布局温泉康养、现代农业（温室种植、水产养殖）等梯级利用产业链，实现从高温供暖到中低温洗浴、种植的全链条热能利用，提升单位热能经济价值。在确保采灌均衡的前提下，适当突破行政区划限制，进行地热资源的跨区域空间调配，形成可复制、可推广的规模化开发范式。

3.3 探索“地热+”及地热储能

构建雄安新区以“供暖+供冷+工业用热”为支柱的“地热+”综合利用体系，实现多能互补的区域能源生态。在民生领域，依托中深层地热与浅层地源热泵，全面推进建筑冷热联供，推广“集中供暖、分散制冷”模式，发挥地热全天候稳定优势，缓解夏季电力调峰压力。在工业与农业领域，将热能高产区地热导入近旁工业园区、农业烘干及现代温室，实现从民生配套到生产要素的价值跃升。在能源结构上，将地热纳入“中心站-卫星站”体系，实施“地热+燃气+光伏+电能”深度融合，通过智慧能源管理系统实现多种能源时空协同，打造可复制的“雄安标准”。

充分发挥深部碳酸盐岩热储的储能功能，将夏季余热、风光弃电及低谷电力转化为地下热能库存，用于冬季基荷供热或极寒期调峰，从根本上化解可再生能源的时空错配问题。目前，容城领秀城已完成中深层含水层储热现场试验，将风电与夏季余热注入地下储存，冬季提取利用，储热效率超过 80%，可为约 $28 \times 10^4 \text{ m}^2$ 建筑提供 100% 可再生能源供暖，验证了“风光电-热-地下储能-稳定供热”的技术闭环。未来，将地热储能节点全面接入雄安新区能源数字孪生平台，实现与电网调峰、热网调度及用户侧需求响应的联合优化。

4 结束语

（1）近年来，雄安新区的地热勘探开发取得明显进展，在勘查深度上超过了 4500 m，揭露了最高地热流体温度达 123.4℃、最大产能 250m³/h 的地热井；开发利用逐步走向规模化、高效化模式，有力支撑了该区清洁能源的规划开发。

（2）地热成因认识进一步细化，形成了古潜山“优势流传热”理论，揭示了“凸起传导控热、储层对流聚热”的非线性传热机制，阐明了凸起浅部聚热、凹陷深部保热的空间分异规律，实现了深部热储的找矿突破。评价理论方法进一步提升，建立了采灌均衡条件下地热可采资源量评价方法，综合考虑回灌率、采灌井间热交换效率、热储温度衰减等因素，提升了资源评价结果对地热规划开发的指导作用。

（3）在勘探开发技术上，结合雄安新区古潜山热储的特点，试验了广域电磁法，指导了容城凸起与牛驼镇凸起之间坳陷区的勘探孔部署；研发了基于小径先导与孕镶金刚石取芯的高效钻探技术，将破碎地层岩芯采取率提升至 80% 以上；创新形成了水力喷射与酸化压裂复合增产技术，有效解决了深部低渗储层难压开、连通差的难题，单井产能提升 8 倍以上；提出了“集采-集输-集灌”的跨域开发新模式，突破了地热资源与负荷中心逆向分布的空间制约。

（4）对雄安新区未来的地热勘探开发进行了展望，提出将重点关注深部高于庄组热储空间的探测与增强开发、地热规模化数智化的综合开发技术，以及拓展“地热+”多能互补与地热储能技术等，逐步推进该区地热资源的高效可持续开发。

利益冲突声明：本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests: All authors declare no conflict of interests.

References

CAULK R A, GHOREISHI-MADISEH S A, AMIRI H, 2023. Seasonal borehole thermal energy storage (BTES) and aquifer thermal energy storage (ATES): recent advances and techno-economic barriers[J]. *Energy*, 263: 125812.

CHEN M X, WANG J Y, DENG X, 1994. Geothermal resources in China: formation characteristics and potential assessment[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese with English abstract)

CUI Y, ZHU C Q, QIU N S, et al., 2019. Radioactive heat production and terrestrial heat flow in the Xiong'an Area, North China[J]. *Energies*, 12(24): 4608.

DAI M G, SUN P G, LEI H F, et al., 2023. Spatial distribution characteristics of strata and main thermal reservoirs and geothermal water resource potential in Xiong'an New Area[J]. *Chinese Journal of Geology*, 58(2): 412-437. (in Chinese with English abstract)

DAI M G, 2025. Analysis on influencing factors for calculation of thermal breakthrough spacing between pumping well and recharging well: a case study in Xiong'an New Area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 99(4): 1409-1426. (in Chinese with English abstract)

FAN L S, JIA X F, WANG G L, et al., 2020. Drilling practice of D03 geothermal exploration well in Xiong'an New Area[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 47(10): 13-22. (in Chinese with English abstract)

FURLONG K P, CHAPMAN D S, 2013. Heat flow, heat generation, and the thermal state of the lithosphere[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 41: 385-410.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2011. Geologic exploration standard of geothermal resources: GB/T 11615-2010[S]. Beijing: Standards Press of China. (in Chinese)

GRINGARTEN A C, SAUTY J P, 1975. A theoretical study of heat extraction from an aquifer by means of a down-hole heat exchanger or a water circulation well[C]//Proceedings of the 2nd United Nations symposium on the development and use of geothermal resources. San Francisco, USA: Lawrence Berkeley Laboratory: 405-415.

GUO S S, ZHU C Q, QIU N S, et al., 2019. Present geothermal characteristics and influencing factors in the Xiong'an New Area, North China[J]. *Energies*, 12(20): 3884.

HE D F, SHAN S Q, ZHANG Y Y, et al., 2018. 3-D geologic architecture of Xiong'an New Area: constraints from seismic reflection data[J]. *Science China Earth Sciences*, 61(8): 1007-1022.

HE J S, 2020. New research progress in theory and application of wide field electromagnetic method[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 44(5): 985-990. (in Chinese with English abstract)

HU Y, BANKS J, BU X, et al., 2024. Digital twin for geothermal systems: concepts, enabling technologies and emerging applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189: 114078.

KAYA E, ZARROUK S J, O'SULLIVAN M J, 2024. Reinjection in geothermal fields: a global review and classification[J]. *Geothermics*, 109: 102692.

LI J, ZENG H H, LU X Y, et al., 2024. Application of wide-field electromagnetic

method for favorable target optimization in the Heishan granite geothermal area of Yunnan Province[J]. *Natural Gas Industry B*, 11(1): 74-82.

MA F, WANG G L, ZHANG W, et al., 2020. Structure of geothermal reservoirs and resource potential in the Rongcheng geothermal field in Xiong'an New Area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 1981-1990. (in Chinese with English abstract)

MA F, WANG G L, ZHU X, et al., 2022. Experimental study of the enhanced stimulation of a deep carbonate thermal reservoir in the Xiong'an New Area[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 44(10): 1789-1798. (in Chinese with English abstract)

MA Y, ZHANG B J, YAN J K, et al., 2022. Deep geothermal reservoir structure detection and geothermal well optimization technology in Xiongan New Area[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 43(5): 699-710. (in Chinese with English abstract)

MA F, WANG G L, YU M X, et al., 2026. Geothermal reservoir property and productivity of deep carbonate in Xiong'an New Area, China[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 41(1): 1-13. (in Chinese with English abstract)

Ministry of Geology and Mineral Resources of the People's Republic of China, 1985. Method for geothermal resource evaluation: DZ 40-85[S]. Beijing: Standards Press of China. (in Chinese)

PANG J M, PANG Z H, LV M, et al., 2018. Geochemical and isotopic characteristics of fluids in the Niutuozen geothermal field, North China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 77(1): 12.

PORTIER S, VUATAZ G, BURNOL A, et al., 2020. Chemical and physical processes during geothermal fluids reinjection: impacts on reservoir properties and sustainability—a review[J]. *Geothermics*, 88: 101865.

VAN DAM R P, BAKKER M, SOMMER W T, et al., 2022. Long-term performance of aquifer thermal energy storage (ATES): field data and model-based interpretation[J]. *Journal of Hydrology*, 612: 128283.

WANG G L, ZHANG W, LIANG J Y, et al., 2017. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(4): 449-459. (in Chinese with English abstract)

WANG G L, GAO J, ZHANG B J, et al., 2020. Study on the thermal storage characteristics of the Wumishan Formation and huge capacity geothermal well parameters in the Gaoyang low uplift area of Xiong'an New Area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 1970-1980. (in Chinese with English abstract)

WANG G L, LIN W J, 2020. Main hydro-geothermal systems and their genetic models in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 1923-1937. (in Chinese with English abstract)

WANG G L, YUE G F, LIN W J, et al., 2024. Deep carbonate geothermal reservoir production enhancement technology in North China Plain[J]. *Earth Science*, 49(4): 1470-1486. (in Chinese with English abstract)

WANG J Y, HU S B, PANG Z H, et al., 2012. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China[J]. *Science & Technology Review*, 30(32): 25-31. (in Chinese with English abstract)

WANG S Q, ZHANG B J, LI Y Y, et al., 2021. Heat accumulation mechanism of deep ancient buried hill in the northeast of Gaoyang geothermal field, Xiong'an New

Area[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 40(3): 12-21. (in Chinese with English abstract)

WANG Z T, JIANG G Z, ZHANG C, et al., 2019. Thermal regime of the lithosphere and geothermal potential in Xiong'an New Area[J]. Energy Exploration & Exploitation, 37(2): 787-810.

WANG Z T, ZHANG C, JIANG G Z, et al., 2019. Present-day geothermal field of Xiong'an New Area and its heat source mechanism[J]. Chinese Journal of Geophysics, 62(11): 4313-4322. (in Chinese with English abstract)

WU A M, MA F, WANG G L, et al., 2018. A study of deep-seated karst geothermal reservoir exploration and huge capacity geothermal well parameters in Xiong'an New Area[J]. Acta Geoscientica Sinica, 39(5): 523-532. (in Chinese with English abstract)

XIONG L P, ZHANG J M, 1988. Relationship between geothermal gradient and the relief of basement rock in North China Plain[J]. Acta Geophysica Sinica, 31(2): 146-155. (in Chinese with English abstract)

YANG M H, LIU C Y, SUN D S, et al., 2002. Extensional tectonic system and its deep-seated setting of Jizhong Basin, China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 26(2): 113-120. (in Chinese with English abstract)

YU M X, MA F, WANG G L, et al., 2023. Characteristics and evaluation of geothermal resources in the Rongdong Area of Xiong'an New Area[J]. Acta Geoscientica Sinica, 44(1): 180-190. (in Chinese with English abstract)

YUAN R X, MA F, ZHANG W, et al., 2022. Application of geothermal reservoir modification technologies and prospective[J]. Science & Technology Review, 40(20): 52-64. (in Chinese with English abstract)

YUE G F, WANG G L, MA F, et al., 2021. Evaluation of fault slip probability of geothermal large-scale development: a case study of deep karst geothermal reservoir in Xiong'an New Area[J]. Geology in China, 48(5): 1382-1391. (in Chinese with English abstract)

YUE G F, 2022. Study on the acidizing mechanisms of fractured carbonate hydrothermal reservoir of Gaoyuzhuang Formation in Xiong'an New Area[D]. Wuhan: China University of Geosciences. (in Chinese with English abstract)

ZHAO J Y, ZHANG W, MA F, et al., 2020. Geochemical characteristics of the geothermal fluid in the Rongcheng geothermal field, Xiong'an New Area[J]. Acta Geologica Sinica, 94(7): 1991-2001. (in Chinese with English abstract)

ZHOU X, JIN X M, LIANG S H, et al., 2010. Monograph on groundwater science[M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese with English abstract)

ZHU X, WANG G L, MA F, et al., 2021. Hydrogeochemistry of geothermal waters from Taihang Mountain-Xiong'an New Area and its indicating significance[J]. Earth Science, 46(7): 2594-2608. (in Chinese with English abstract)

ZHU X, WANG G L, MA F, et al., 2023. Evaluation of geothermal resources of the Xiong'an New Area[J]. Earth Science, 48(3): 1093-1106. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

陈墨香, 汪集旻, 邓孝, 1994. 中国地热资源: 形成特点和潜力评估[M]. 北京:

科学出版社.

戴明刚, 孙彭光, 雷海飞, 等, 2023. 雄安新区地层及主要热储空间结构特征与地热水资源潜力[J]. 地质科学, 58 (2): 412-437.

戴明刚, 2025. 地热水开发采灌井热突破距离计算影响因素研究: 以雄安新区为例[J]. 地质学报, 99 (4): 1409-1426.

樊腊生, 贾小丰, 王贵玲, 等, 2020. 雄安新区 D03 地热勘探井钻探施工实践[J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 47 (10): 13-22.

何登发, 单帅奇, 张煜颖, 等, 2018. 雄安新区的三维地质结构: 来自反射地震资料的约束[J]. 中国科学: 地球科学, 48 (9): 1207-1222.

何继善, 2020. 广域电磁法理论及应用研究的新进展[J]. 物探与化探, 44 (5): 985-990.

马峰, 王贵玲, 张薇, 等, 2020. 雄安新区容城地热田热储空间结构及资源潜力[J]. 地质学报, 94 (7): 1981-1990.

马峰, 王贵玲, 朱喜, 等, 2022. 雄安新区深部碳酸盐岩热储强化增产试验研究[J]. 工程科学学报, 44 (10): 1789-1798.

马峰, 王贵玲, 余鸣潇, 等, 2026. 雄安新区容城地热田碳酸盐岩热储物性特征与产能分析[J]. 地质找矿论丛, 41 (1): 1-13.

马岩, 张保健, 闫金凯, 等, 2022. 雄安新区深部储热构造探测研究与地热井优选技术[J]. 地球学报, 43 (5): 699-710.

王贵玲, 张薇, 梁继运, 等, 2017. 中国地热资源潜力评价[J]. 地球学报, 38 (4): 449-459.

王贵玲, 高俊, 张保健, 等, 2020. 雄安新区高阳低凸起区雾迷山组热储特征与高产能地热井参数研究[J]. 地质学报, 94 (7): 1970-1980.

王贵玲, 蔺文静, 2020. 我国主要水热型地热系统形成机制与成因模式[J]. 地质学报, 94 (7): 1923-1937.

王贵玲, 岳高凡, 蔺文静, 等, 2024. 华北平原典型深部碳酸盐岩热储增产改造技术[J]. 地球科学, 49 (4): 1470-1486.

汪集旸, 胡圣标, 庞忠和, 等, 2012. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. 科技导报, 30 (32): 25-31.

王思琪, 张保健, 李燕燕, 等, 2021. 雄安新区高阳地热田东北部深部古潜山聚热机制[J]. 地质科技通报, 40 (3): 12-21.

王朱亭, 张超, 姜光政, 等, 2019. 雄安新区现今地温场特征及成因机制[J]. 地球物理学报, 62 (11): 4313-4322.

吴爱民, 马峰, 王贵玲, 等, 2018. 雄安新区深部岩溶热储探测与高产能地热井参数研究[J]. 地球学报, 39 (5): 523-532.

熊亮萍, 张菊明, 1988. 华北平原区地温梯度与基底构造形态的关系[J]. 地球物理学报, 31 (2): 146-155.

杨明慧, 刘池阳, 孙冬胜, 等, 2002. 冀中坳陷的伸展构造系统及其构造背景[J]. 大地构造与成矿学, 26 (2): 113-120.

余鸣潇, 马峰, 王贵玲, 等, 2023. 雄安新区容东片区地热资源赋存特征及潜力评价[J]. 地球学报, 44 (1): 180-190.

原若溪, 马峰, 张薇, 等, 2022. 地热储层改造技术研究进展[J]. 科技导报, 40 (20): 52-64.

岳高凡, 王贵玲, 马峰, 等, 2021. 地热规模化开发断层滑动概率评估: 以雄安

新区深部岩溶热储为例[J]. 中国地质, 48 (5): 1382-1391.

岳高凡, 2022. 雄安新区高于庄组裂缝型碳酸盐岩热储酸化改造机理研究[D]. 武汉: 中国地质大学.

赵佳怡, 张薇, 马峰, 等, 2020. 雄安新区容城地热田地热流体化学特征[J]. 地质学报, 94 (7): 1991-2001.

中国地质调查局, 2020a. 雄安新区地热清洁能源调查报告[R]. 石家庄: 中国地质科学院水文地质环境地质研究所.

中国地质调查局, 2020b. 雄安新区地热清洁能源调查报告[R]. 保定: 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心.

中国地质调查局, 2020c. 雄安新区地热清洁能源调查报告[R]. 北京: 中国地质科学院.

中华人民共和国地质矿产部, 1985. 地热资源评价方法: DZ 40-85[S]. 北京: 中国标准出版社.

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2011. 地热资源地质勘查规范: GB/T 11615-2010[S]. 北京: 中国标准出版社.

周训, 金晓媚, 梁四海, 等, 2010. 地下水科学专论[M]. 北京: 地质出版社.

朱喜, 王贵玲, 马峰, 等, 2021. 太行山-雄安新区蓟县系含水层水文地球化学特征及意义[J]. 地球科学, 46 (7): 2594-2608.

朱喜, 王贵玲, 马峰, 等, 2023. 雄安新区地热资源潜力评价[J]. 地球科学, 48 (3): 1093-1106.