

基于蒙特卡罗及博弈赋权法的地热资源潜力与适宜性评估

何怡香 丁朋朋 刘韶华 王明珠 朱磊

引用本文:

何怡香, 丁朋朋, 刘韶华, 等. 基于蒙特卡罗及博弈赋权法的地热资源潜力与适宜性评估[J]. *煤田地质与勘探*, 2025, 53(5): 176–187.

HE Yixiang, DING Pengpeng, LIU Shaohua, et al. Assessing the potential and suitability of geothermal resources using Monte Carlo simulation and game-based combination weighting method[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(5): 176–187.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.25.03.0143>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

华北赋煤区地热资源富集模式及开发利用方向

Accumulation patterns and exploitation and utilization targets of geothermal resources in the coal-bearing area in North China
煤田地质与勘探. 2024, 52(9): 14–22 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.03.0159>

基于组合赋权的加权秩和比法的底板突水危险性评价

Risk assessment of floor water inrush by weighted rank sum ratio based on combination weighting
煤田地质与勘探. 2022, 50(6): 132–137 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.21.10.0556>

歧口凹陷区新近系馆陶组热储特征及成因机制

Characteristics and genetic mechanism of geothermal reservoirs in the Neogene Guantao Formation, Qikou Sag
煤田地质与勘探. 2024, 52(1): 46–55 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.10.0603>

内蒙古中部干热岩地热资源成因机制研究

Genetic mechanisms of hot dry rock geothermal resources in central Inner Mongolia
煤田地质与勘探. 2024, 52(1): 36–45 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.10.0685>

“双碳”目标下煤田区地热资源开发利用与储能技术

Geothermal energy exploitation and storage in coal field under the dual carbon goal
煤田地质与勘探. 2023, 51(2): 1–11 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.02.0104>

废弃煤矿采空区瓦斯抽采可行性评价模型构建及应用

Construction and application of feasibility evaluation model for gas extraction in goafs of abandoned coal mines
煤田地质与勘探. 2022, 50(7): 107–117 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.21.11.0686>



移动阅读

何怡香, 丁朋朋, 刘韶华, 等. 基于蒙特卡罗及博弈赋权法的地热资源潜力与适宜性评估[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(5): 176–187. doi: [10.12363/issn.1001-1986.25.03.0143](https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.25.03.0143)
HE Yixiang, DING Pengpeng, LIU Shaohua, et al. Assessing the potential and suitability of geothermal resources using Monte Carlo simulation and game-based combination weighting method[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(5): 176–187. doi: [10.12363/issn.1001-1986.25.03.0143](https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.25.03.0143)

基于蒙特卡罗及博弈赋权法的地热资源潜力与 适宜性评估

何怡香^{1,2}, 丁朋朋^{1,2,*}, 刘韶华^{1,2}, 王明珠³, 朱磊^{1,2}

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏银川 750021; 2. 宁夏回族自治区黄河水联网数字治水重点实验室, 宁夏银川 750021; 3. 山东省地质矿产勘查开发局第二水文地质工程地质大队 (山东省鲁北地质工程勘察院), 山东德州 253000)

摘要: 【背景】砂岩孔隙型地热能是一种稳定、高效的清洁能源, 但热储层非均质性、勘探不确定性等因素使地热资源量概率评估及适宜性识别等方面仍面临重大挑战。【方法】选取鲁西北平原馆陶组地热为研究对象, 采用体积法与蒙特卡罗法开展地热资源潜力不确定性评估; 从地热资源特性、地质结构属性、社会经济 3 个方面建立砂岩热储适宜性多维度指标体系, 采用博弈组合赋权法计算指标权重, 开展地热资源适宜性定量评价, 并通过地热井空间分布对评价结果进行校验。【结果和结论】鲁西北平原馆陶组热储最大概率地热资源量为 5.68×10^{17} kJ, 折合标准煤 1.94×10^{10} t, 地热资源量为 $(4.75 \sim 6.32) \times 10^{17}$ kJ 的概率为 90%, 平均地热资源丰度为 3.35×10^{13} kJ/km²; 研究区适宜性“较好”及以上面积为 5 557 km², 占比 35.63%; 适宜性“差”区域占比最低, 仅为 14.32%; 综合资源潜力和适宜性结果, 鲁西北平原德州潜断陷为地热勘探开发首选靶区。研究成果可为重点地区地热资源勘探优化和开发目标区域识别提供技术支撑。

关键词: 地热资源; 蒙特卡罗模拟; 热储特征; 体积法; 博弈赋权法; 适宜性评价; 鲁西北平原
中图分类号: P641.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2025)05-0176-12

Assessing the potential and suitability of geothermal resources using Monte Carlo simulation and game-based combination weighting method

HE Yixiang^{1,2}, DING Pengpeng^{1,2,*}, LIU Shaohua^{1,2}, WANG Mingzhu³, ZHU Lei^{1,2}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Key Laboratory of the Internet of Water and Digital Water Governance of the Yellow River, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. The Second Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources (Lubei Geoengineering Exploration Institute), Dezhou 253000, China)

Abstract: [Background] Geothermal energy in porous sandstone reservoirs is recognized as stable, efficient clean energy. However, these reservoirs feature heterogeneity and exploration uncertainty, posing serious challenges to probabilistic resource assessment and the identification of suitability for resource development. [Methods] This study investigated the geothermal resources in the Guantao Formation within the northwest Shandong plain. Using the volumetric method and Monte Carlo simulation, this study assessed the uncertainty of the resource potential. Then, considering the characteristics of geothermal resources, the attributes of geological structures, and the social economy, this study de-

收稿日期: 2025-03-03; 接收日期: 2025-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(42307272); 宁夏自然科学基金项目(2023AAC03033, 2024AAC05027); 宁夏高等学校一流学科建设(水利工程)项目(NXYLXK2021A03)

第一作者: 何怡香, 2000 年生, 女, 广西马山人, 硕士研究生。E-mail: 12023131206@stu.nxu.edu.cn

*通信作者: 丁朋朋, 1990 年生, 男, 山东济宁人, 博士, 副教授。E-mail: pengpengd@nxu.edu.cn

© Editorial Office of Coal Geology & Exploration. OA under CC BY-NC-ND

veloped a multi-dimensional evaluation index system for the suitability of sandstone geothermal reservoirs. The weights of the evaluation indices were calculated using the game-based combination weighting method. Finally, this study conducted a quantitative suitability evaluation of the geothermal resources and verified the evaluation results based on the spatial distribution of geothermal wells. [Results and Conclusions] The results indicate that geothermal reservoirs in the Guantao Formation within the northwest Shandong plain hold maximum probabilistic geothermal resources of 5.68×10^{17} kJ, corresponding to coal equivalent of 1.94×10^{10} t. These reservoirs exhibit a 90% probability of geothermal resources of $(4.75-6.32) \times 10^{17}$ kJ and an average geothermal resource abundance of 3.35×10^{13} kJ/km². Within the study area, zones with relatively high and high suitability cover an area of 5 557 km², representing 35.63% of the total area. In contrast, zones with low suitability manifest the lowest areal proportion (merely 14.32%). The comprehensive analysis of the resource potential and suitability evaluation results reveals that the Dezhou buried fault depression in the northwest Shandong plain serves as the preferred target area for geothermal exploration and exploitation. The results of this study will provide technical support for the exploration optimization and target area identification of geothermal resources in key areas.

Keywords: geothermal resource; Monte Carlo simulation; geothermal reservoir characteristic; volumetric method; game-based combination weighting method; suitability evaluation; northwest Shandong plain

地热是一种清洁、稳定的非碳基能源,在能源结构转型与双碳目标的实现上可发挥重要作用^[1-2]。鲁西北平原地热资源丰富,以中低温地热资源居多,分布范围广^[3],区域内地热市场需求逐年增长,主要发育新近系馆陶组热储,呈高热流值(53~83 mW/m²)、高地温梯度(3.12~4.04 °C/hm)等显著的地热异常特征,热储厚度和热储温度等地热储层条件优越,拥有利于大型地热田形成的地热地质条件^[4-5],多位学者^[6-8]对鲁西北平原整体及内部典型构造单元的地温场特征和地热资源进行了系统的研究与评估,揭示该地区地热资源具有显著的地热资源富集特征。

体积法^[9]是地热开采和勘探早期阶段资源评估的主要方法,该方法在计算地热资源量时涉及热储面积、厚度、孔隙率等多个关键参数,这些参数普遍存在显著的空间异质性和测量不确定性。传统体积法采用确定性参数值进行资源量估算,未能充分反映实际不确定性,从而低估了潜在的变化范围^[10-11]。蒙特卡罗模拟^[12-14]通过随机抽样和概率分布拟合,可有效量化各参数的不确定性对地热资源量估算的影响,识别对资源量估算影响最大的关键参数,为后续勘探工作提供优化方向。例如, Li Yongyi 等^[15]采用三角分布和均匀分布模型量化参数不确定性,通过蒙特卡罗模拟方法,对广东省隆起山地的地热资源的分布、温度和流量进行了预测; Wang Zhuting 等^[16]通过三角分布和均匀分布模型量化了新近系明化镇组和馆陶组砂岩、碳酸盐岩储层的地热资源参数不确定性,结合蒙特卡罗模拟和体积法评估了渤海湾盆地的地热资源量范围及最可能值。

在地热资源开发适宜性分析方面,国内外学者主要利用地理信息系统(GIS)结合多数字数据层进行多准则决策分析^[17-18]。例如, Li Xuan 等^[19]根据研究区地热温度、地球物理学、基本地质条件 3 个方面的地热资源影响因素,建立主成分分析(principal component analysis,

PCA)与层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)结合的地理信息系统(GIS)模型,揭示了江西省地热资源分布规律,发现深大断层、岩浆岩是影响地热资源分布的主要因素; Deng Q 等^[20]综合重力、地热场和构造活动等建立地热评价指标体系,确定了山东沂沭断裂带以东地热资源的分布特征,并采用评价指标详细分析了地热资源的赋存条件; 饶松等^[21]通过钻井、地质和物探资料,系统刻画了新近系馆陶组热储平面展布特征,采用体积法和蒙特卡罗法对渤海湾盆地县级以上城市和全盆地地热资源量进行了评价,并综合热储特征圈定了地热有利区。

鲁西北平原蕴藏着丰富的地热资源储量,同时该区域化石燃料供暖导致的环境问题日益突出,迫切需要推广清洁、可再生能源,开展地热资源潜力不确定性评估与开发适宜性评价。基于此,笔者利用体积法与蒙特卡罗方法结合进行地热资源潜力评估,从地热资源特性、地质结构属性、社会经济方面构建适宜性评价指标体系,采用博弈组合赋权法和多源信息叠加法开展地热适宜性评价,并对不同适宜性级别的区域进行影响因素分析,综合确定地热资源勘探开发优势区,以期对鲁西北平原地热资源开发及区域能源结构调整提供理论支撑。

1 研究区域背景

研究区域位于山东省鲁西北砂岩热储地热开采区(图 1),面积 19 071 km²,行政区划为聊城市、德州市,属于省会经济圈,地理位置优越,交通条件便利,为地热资源的开发奠定了坚实的基础。

鲁西北平原位于华北地台东部,属于中生代断陷盆地,具有控热意义的主要断裂为齐河—广饶断裂和聊城—兰考断裂^[22-23],断裂构造均为隐伏型^[24],由埕子口—宁津、无棣、故城—馆陶、高唐、泰山—济南 5 大断陷区

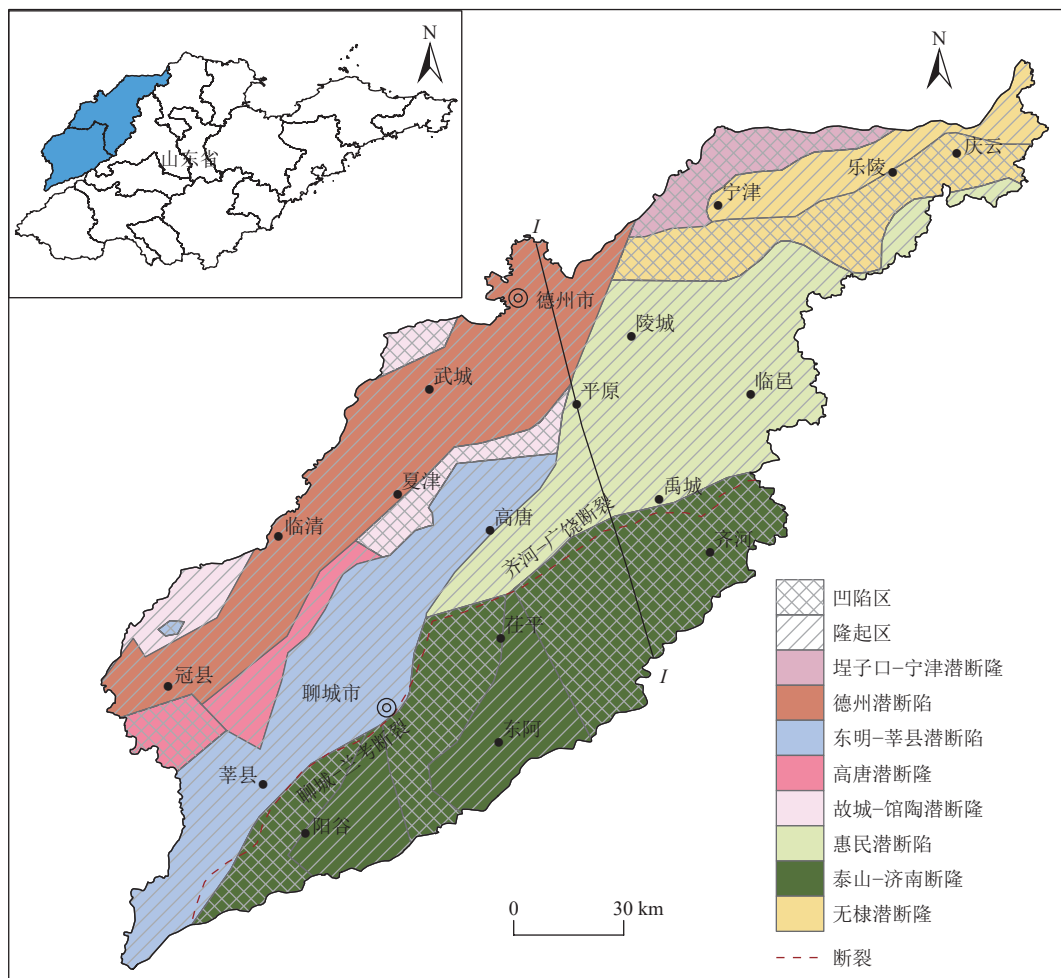


图 1 研究区位置及地质构造分区

Fig.1 Location and geological structural division of the study area

与惠民、德州、东明-莘县 3 大断陷区相间组成^[25],对地热资源的分布和富集起重要的控制作用。

鲁西北平原的地质演化自古生代至新生代经历了太古界变质岩基底形成、古近系断裂体系发育、新近系热沉降、第四系区域抬升与夷平 4 个主要阶段,为地热

资源的形成与富集奠定了重要的地质基础^[26]。新生界地层分布从老至新依次为古近系、新近系馆陶组 and 明化镇组、第四系平原组(图 2)。

研究区热储盖层为第四系和新近纪明化镇组。地热开发利用程度较高的热储层位为馆陶组砂岩热储,属

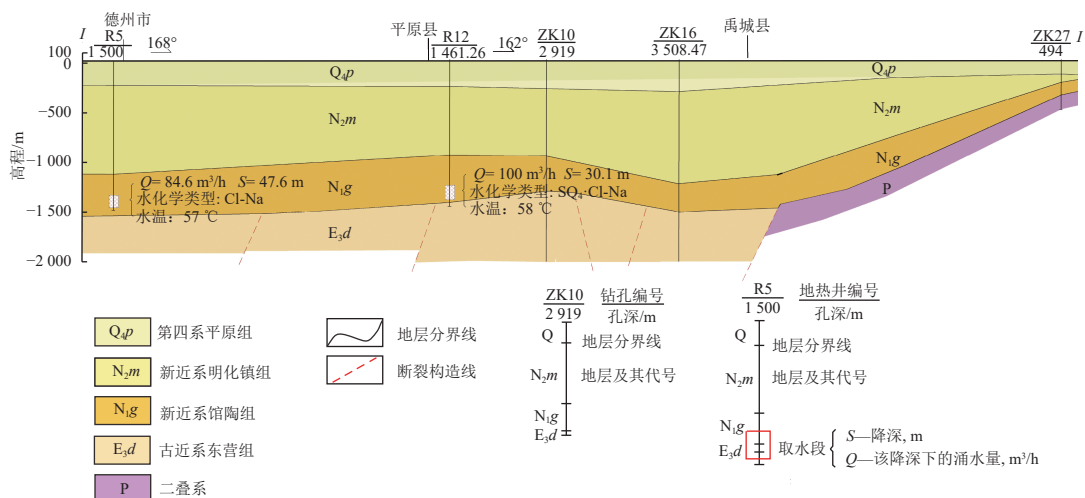


图 2 研究区地层剖面图

Fig.2 Stratigraphic section of the study area

层控型地热,热源以大地热流为主,深循环对流为辅,热储温度为 45.3~66.5 ℃。除在南部山前边缘地带缺失外,其余地区皆有分布,热储层厚度为 250~500 m。莫霍面埋深在 34 km 左右,是热储增温的主要原因。热储岩性主要为河流相、冲积扇相的砂岩和砂砾岩,孔隙率为 18%~33%。

2 研究方法

本文结合体积法与蒙特卡罗法开展研究区地热资源潜力分析;基于 GIS 多源信息空间分析技术和博弈

组合赋权法,开展鲁西北平原地热开发勘探适宜性定量评价;根据地热资源潜力和适宜性定量评价结果,综合确定地热资源优势区。

2.1 地热资源潜力不确定性评估

研究区数据相对较少,评价参数具有一定的不确定性。因此,本文采用蒙特卡罗法估计不确定的输入参数,代入体积法公式中进行计算。

蒙特卡罗法是通过一系列参数值,采用正态分布、三角形分布和均匀分布等方法估算地热资源量,计算步骤如图 3 所示。

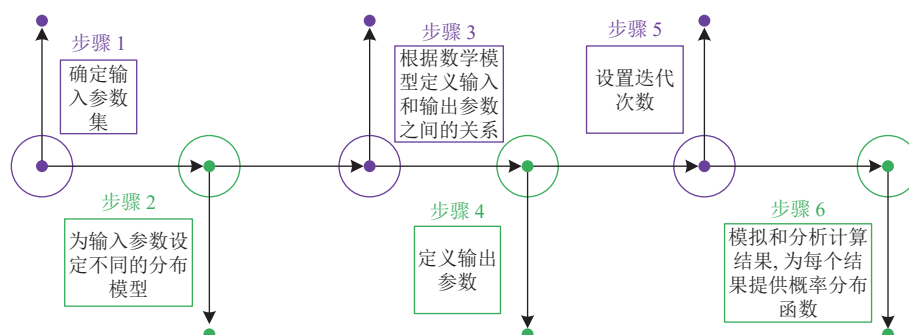


图 3 蒙特卡罗法评估地热资源潜力流程

Fig.3 Flow chart showing the geothermal resource potential assessment based on Monte Carlo simulation

热储体积法公式^[27]如下:

$$q = q_r + q_w \quad (1)$$

$$q_r = AM\rho_r c_r (1 - \phi)(t_r - t_0) \quad (2)$$

$$q_w = AM\rho_w c_w \phi(t_r - t_0) \quad (3)$$

2.2 地热资源适宜性评价

1) 评价模型

综合考虑影响地热资源勘探开发的复杂地质条件和社会经济因素,基于 GIS 多源信息叠加评价方法,建立鲁西北平原砂岩孔隙型热储适宜性评价模型,基本表达式^[28]为:

$$R = \sum_{i=1}^m f_i w_i \quad (4)$$

2) 评价指标体系

地热资源特性和地质结构属性是地热勘探开发优势区圈定的关键本底因素,而社会经济因素具有重要的驱动作用。在此基础上,本文选取地温梯度、热储厚度、人口密度等 9 个评价指标,建立砂岩孔隙型地热资源适宜性评价指标体系,如图 4 所示。

3) 评价指标权重

指标权重的确定是地热资源适宜性评价中的关键环节,其大小直接影响适宜性区域划分的准确性。本文采用基于层次分析法、熵权法及变异系数法的博弈组合赋权模型^[29]计算指标权重。通过主客观赋权方法的

融合,不仅能够有效表征各评价因子对地热资源适宜性的贡献程度,同时可显著降低主观赋权带来的不确定性,从而提高评价结果的科学性与可靠性。

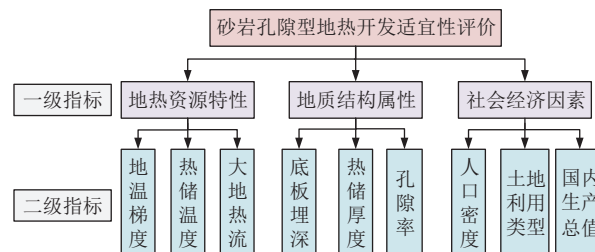


图 4 地热资源适宜性评价指标体系

Fig.4 Evaluation index system for the suitability of geothermal resource development

计算步骤如下:在计算指标权重之前,首先对指标数据进行无量纲化处理;随后,采用层次分析法确定评价指标的主观初始权重,同时利用熵权法和变异系数法计算指标的客观初始权重;在此基础上,构建权重向量集,并通过线性组合建立博弈组合模型;依据博弈论的权重集化模型理论^[30],构建综合权重优化模型,采用数值优化算法求解最优权重组合系数;最后,结合初始权重和组合系数得到评价指标的综合权重。

评价指标量纲不一致会造成不同指标的数据大小差异,影响计算结果,采用下式进行数据标准化处理。

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{ij,\min}}{x_{ij,\max} - x_{ij,\min}}, \quad 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m \quad (5)$$

层次分析法^[31]通过构建决策判断矩阵,对矩阵应用特征向量法,得到权重向量 ω ,对最大特征值的特征向量进行归一化,确定每个指标的权重。

$$B\omega = \lambda_{\max}\omega \quad (6)$$

判断矩阵的比较是两两对比,可能会前后矛盾,需对判断矩阵进行一致性检验。

$$CI = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1) \quad (7)$$

$$CR = CI/RI \quad (8)$$

熵权法是一种客观的赋权方法^[32],根据下式计算评价指标熵值及权重。

$$e_j = -h \sum_{i=1}^n (D_{ij} \ln D_{ij}) \quad (9)$$

$$W'_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{i=1}^m 1 - e_j} \quad (10)$$

变异系数法通过计算数据离散程度确定指标权重^[33]。根据以下公式,计算指标数据的均值、标准差、变异系数及权重。

$$\bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{ij} \quad (11)$$

$$S_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_{ij} - \bar{y}_j)^2} \quad (12)$$

$$V_j = \frac{S_j}{|\bar{y}_j|} \quad (13)$$

$$W''_j = \frac{V_j}{\sum_{j=1}^m V_j} \quad (14)$$

构建基础权重向量集 w_k ,对 m 个指标采用 L 种方法赋权:

$$w_k = \{w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}\} (k = 1, 2, \dots, L) \quad (15)$$

基础权重向量的任意线性组合表达式为:

$$w = \sum_{k=1}^L \alpha_k w_k^T, w_k > 0 \quad (16)$$

根据博弈论的权重集化模型理论,以 w 和 w_k 的离差极小化为目标,通过优化线性组合系数 α_k 实现最小化 w 和 w_k 偏差的目标。

$$\min \left\| \sum_{k=1}^L \alpha_k w_k^T - w^T \right\|_2, (k = 1, 2, \dots, L) \quad (17)$$

归一化处理得到的优化线性组合系数 α'_k :

$$\alpha'_k = \frac{\alpha_k}{\sum_{k=1}^L \alpha_k} \quad (18)$$

博弈论组合赋权权重 w' :

$$w' = \sum_{k=1}^L \alpha'_k w_k^T \quad (19)$$

3 结果分析

3.1 评价指标

1) 地热资源特性

研究区大地热流值、地温梯度分布分别根据中国陆域大地热流数据^[4]、物探测井通过 GIS 空间分析技术得到。研究区地温场空间分布特征使用地温梯度表征,分布为 3.12~4.04 °C/hm,平均 3.53 °C/hm(图 5a),高于地壳近似平均地温梯度(2.5 °C/hm)。大地热流值分布为 53~83 mW/m²(图 5b),平均值为 65.74 mW/m²,略低于全国大地热流平均值 67±16 mW/m²。

鲁西北平原馆陶组地温场以传导为主,地层温度随深度总体线性增加,采用下式计算热储温度。

$$t_r = t_v + G(Z - Z_0) \quad (20)$$

经计算,研究区热储温度为 45.3~66.5 °C,平均为 55.67 °C,如图 5c 所示。热储温度较高区主要分布在故城—馆陶潜断隆、高唐潜断隆、德州潜断陷,平均均超过 57 °C。

2) 地质结构属性

根据研究区钻孔数据,采用 Kriging 插值得到研究区馆陶组地热孔隙性分布、热储底板埋深、热储厚度,如图 5d—图 5f 所示。热储底板埋深为 700~1 800 m,德州潜断陷、高唐潜断隆、故城—馆陶潜断隆、惠民潜断陷底板平均埋深均超过 1 400 m;孔隙率为 18%~33%,平均为 26.60%;馆陶组热储在研究区分布范围广泛,仅在鲁中隆地带有缺失,自南向北由薄变厚,西向东由厚逐渐变薄,如图 5f 所示。

3) 社会经济条件

地热资源的开发利用与社会经济的发展有着不可分割的联系。人口密度、国内生产总值大的区域、城镇地区对地热供暖的需要较高。因此,本文选取人口密度^[34]、土地利用类型^[35]、国内生产总值(GDP)作为地热资源适宜性评价指标,空间分布如图 5g—图 5i 所示。研究区人口分布呈明显的城镇聚集特征,区域平均人口密度为 6 人/万 m²。德城区人口密度最高,达到 14 人/万 m²;其次是东昌府区(8 人/万 m²)和莘县(7 人/万 m²)。城乡建设用地面积最大(4 507 km²),占比为 23.75%。德州潜断陷、东明—莘县潜断陷以及泰山—济南断隆等构造单元的国内生产总值较高,均超过 2 800 万元/km²。

3.2 地热资源潜力评估

本文结合热储体积法和蒙特卡罗法评估鲁西北平

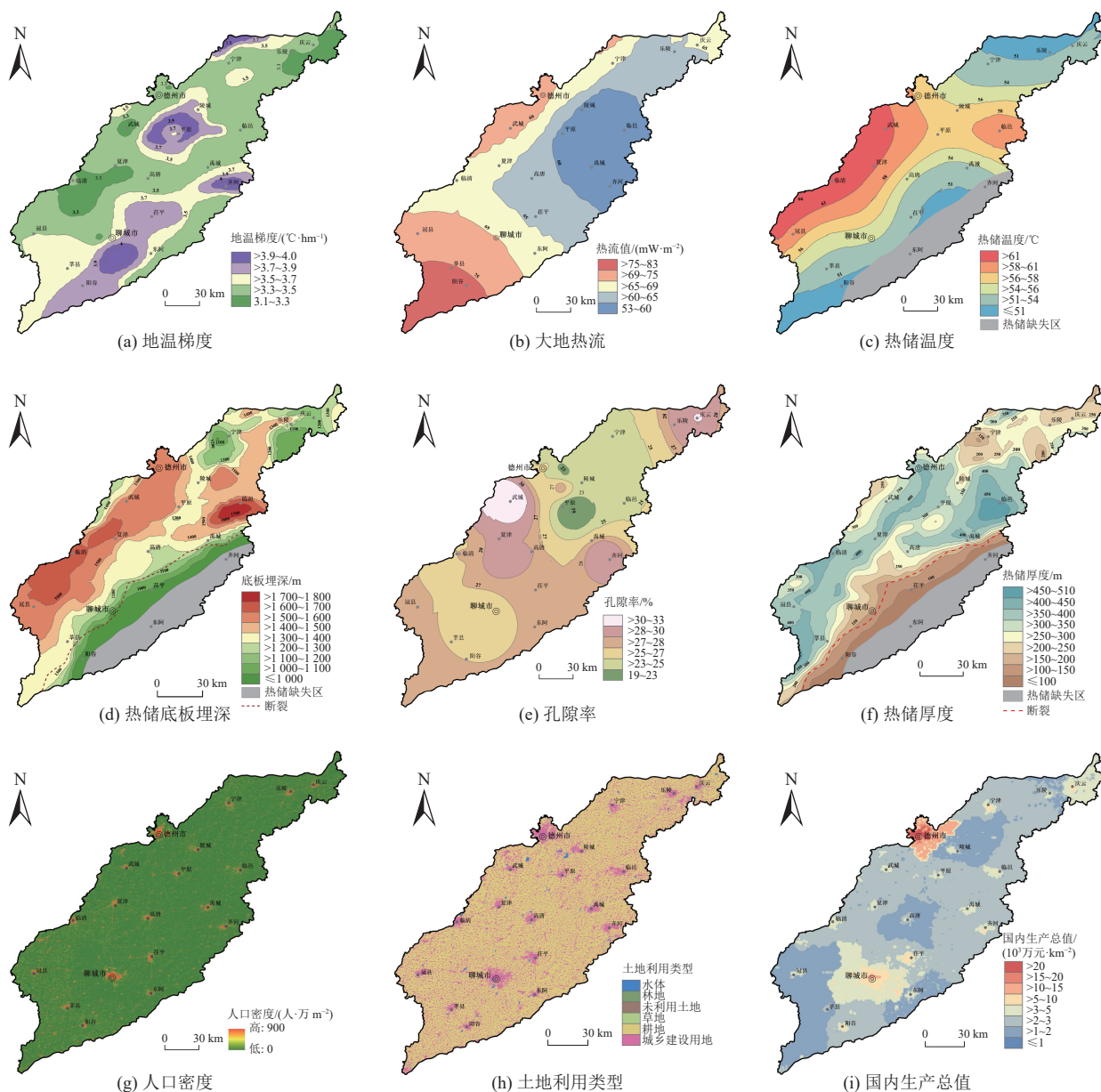


图5 地热资源适宜性评价指标分布

Fig.5 Distributions of evaluation indices for the suitability of geothermal resource development

原砂岩孔隙型地热资源潜力。参照 DZ/T 0331—2020《地热资源评价方法及估算规程》^[36], 利用 Crystal Ball 软件进行蒙特卡罗模拟, 计算地热资源量。热储面积依据研究区构造分区进行差异化取值, 热储温度、孔隙率等关键参数通过蒙特卡罗法结合三角概率分布进行量化分析, 各参数的最大值、最小值及最可能值详见表 1。

采用表 1 中的参数进行蒙特卡罗模拟, 得到研究区地热资源量频率分布和累积频率分布(图 6), 中间浅橙色表示资源量模拟在(5%, 95%)的频率分布, 即“置信区间”。研究区地热资源量有 90% 的概率为 $(4.75 \sim 6.32) \times 10^{17}$ kJ。地热资源量最小值为 4.0×10^{17} kJ, 最大值 7.15×10^{17} kJ, 平均为 5.54×10^{17} kJ, 折合标准煤 1.89×10^{13} kg。最有可能的地热资源量为 5.68×10^{17} kJ, 相当

于 1.94×10^{10} t 标准煤, 这一估算对应的概率是 4.22%。将地热资源量平均值与热储面积的比值作为平均地热资源丰度。鲁西北平原馆陶组热储平均地热资源丰度为 3.35×10^{13} kJ/km², 相当于标准煤 1.14×10^9 kg/km²。

通过对不同构造单元地热资源量分析, 德州潜断陷和惠民潜断陷的地热资源量最为丰富, 其平均值均超过 1.40×10^{17} kJ(图 7)。在 90% 的概率区间内, 德州潜断陷的地热资源量为 $(1.13 \sim 1.73) \times 10^{17}$ kJ, 而惠民潜断陷的为 $(0.89 \sim 1.96) \times 10^{17}$ kJ。此外, 德州潜断陷、高唐潜断隆以及故城—馆陶潜断隆的地热资源丰度较高, 平均值均超过 4.2×10^{13} kJ/km²。

3.3 地热资源适宜性评价

1) 指标权重

表 1 鲁西北平原馆陶组热储参数
Table 1 Parameters of geothermal reservoirs in the Guantao Formation within the northwest Shandong plain

构造单元	面积 A/km^2	热储厚度 M/m	孔隙率 $\varphi/\%$	热储温度 $t_f/^\circ\text{C}$	热储岩石密度 $\rho_r/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	热储岩石比热容 $c_r/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$
埕子口-宁津潜断隆	557	147~410(261)	24~28(25)	49~54(51)	2 104~2 623(2 530)	880~889(885)
无棣潜断隆	1 962	178~349(238)	23~32(26)	49~55(52)		879~894(884)
惠民潜断陷	3 760	151~509(353)	19~29(25)	52~60(56)		878~909(893)
故城-馆陶潜断隆	830	229~421(327)	23~32(28)	56~66(61)		867~893(881)
德州潜断陷	3 321	242~422(362)	23~33(28)	53~66(61)		861~895(881)
高唐潜断隆	694	285~422(382)	27~29(27)	54~62(57)		856~883(864)
东明-莘县潜断陷	2 857	112~461(272)	24~29(27)	45~63(55)		855~888(869)
泰山-济南断隆	2 541	69~312(115)	26~30(27)	47~57(52)		855~899(877)

注: 147~410(261)表示最小~最大值(均值), 其他同。

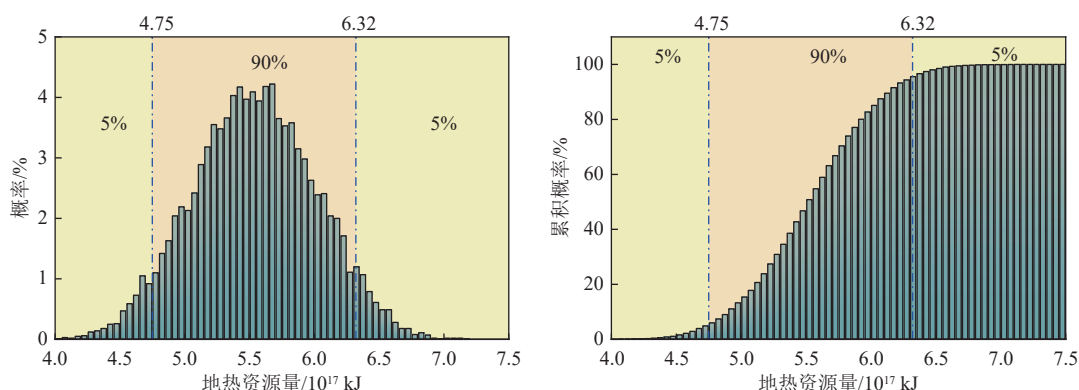


图 6 基于蒙特卡罗法的鲁西北平原馆陶组热储地热资源量估算结果

Fig.6 Geothermal resources of reservoirs in the Guantao Formation within the northwest Shandong plain estimated using Monte Carlo simulation

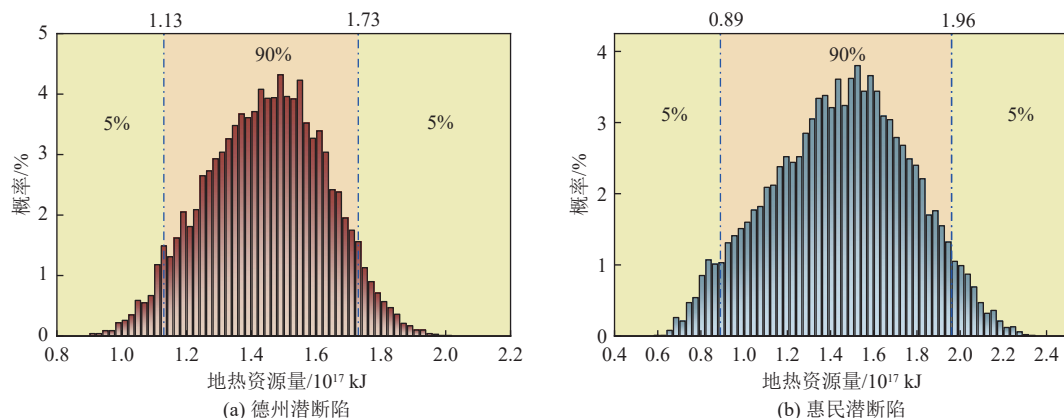


图 7 基于蒙特卡罗法地热资源量分区估算结果

Fig.7 Geothermal resources of zones estimated using Monte Carlo simulation

采用基于层次-熵权-变异系数的博弈组合赋权法计算评价指标权重。根据式(5)将各指标数据进行归一化, 利用 2.2 节中式(6)~式(19)计算指标权重, 见表 2。

2) 适宜性评价结果

基于评价指标数据和权重, 采用式(4)和 GIS 空间分析技术对鲁西北平原砂岩孔隙型地热资源进行适宜性计算。采用自然断点法将适宜性评价结果划分为好、

较好、一般、较差、差 5 个等级, 如图 8 所示。自然断点法可以根据数据固有的自然分组进行分类, 最大限度地反映数据的真实规律^[37]。

由图 8 可知, 鲁西北平原地热适宜性“好”和“较好”区域主要分布在德州潜断陷、高唐潜断隆、故城—馆陶潜断隆, 面积占比分别为 95.89%、88.16%、70.71%, 因为区域大地热流值普遍高于研究区平均值(65.74 mW/m²), 具有良好的地热背景条件, 热储温度与厚度均显著优于

表 2 评价指标权重分配
Table 2 Assigned weights of various evaluation indices

评价指标	热储温度	大地热流	热储厚度	地温梯度	土地利用类型	孔隙率	人口密度	底板埋深	GDP
权重	0.139	0.212	0.164	0.117	0.101	0.072	0.024	0.077	0.095

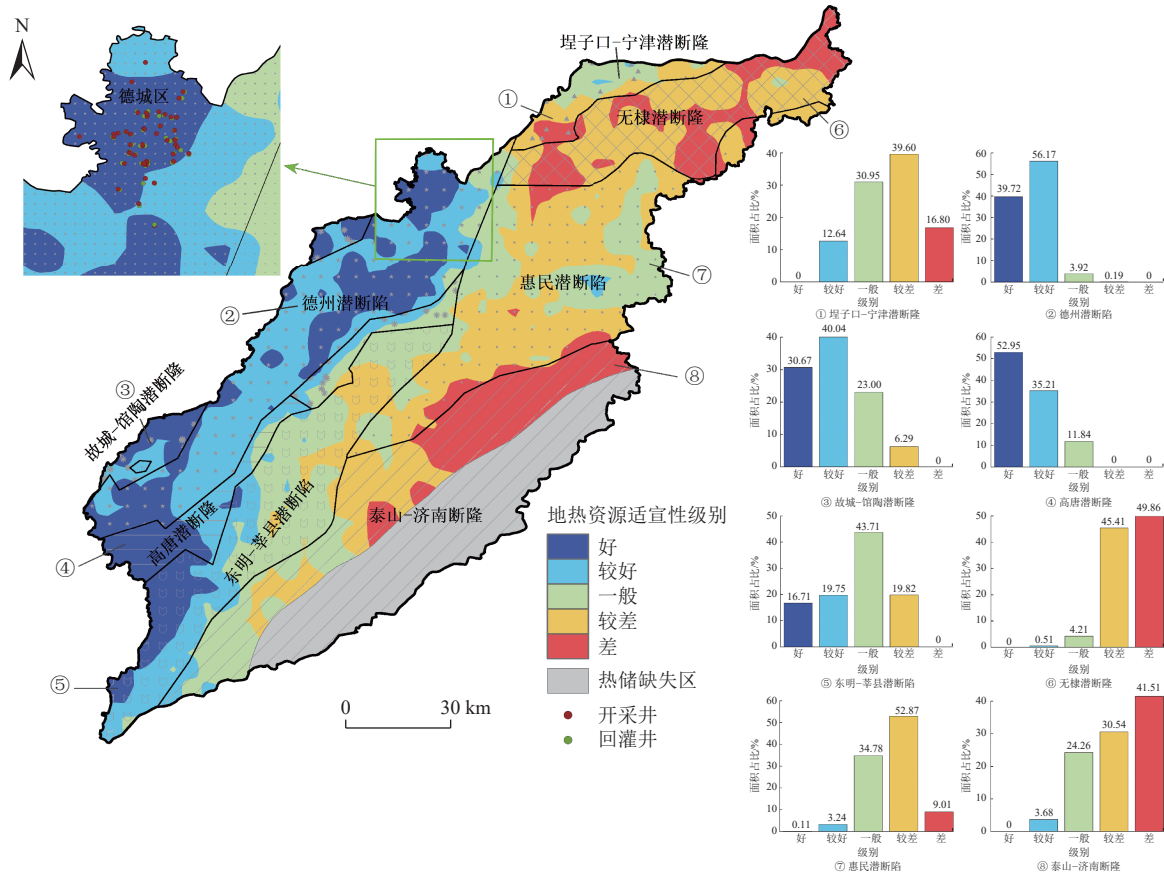


图 8 地热资源适宜性分区
Fig.8 Suitability zones of geothermal resource development

区域平均水平(55.67℃和287.6 m)。

泰山-济南断隆 41.51% 的区域被划分为“差”地热适宜区,因为该地区平均热储厚度仅为 115.22 m,是研究区内厚度最薄的区域,热储温度也较低(51.72℃)。无棣潜断隆的平均热流值(64.49 mW/m²)虽然接近研究区平均值,但 49.86% 的区域仍被划分为“差”地热适宜区,这与其热储参数(厚度 238.32 m,温度 51.83℃)显著低于区域平均水平密切相关。

研究区地热不同适宜性统计结果如图 9 所示,地热资源适宜性级别分布整体呈“两端低、中间高”的趋势。“较差”和“一般”级别合计占比超 50%,表明大部分区域的适宜性处于中等偏下水平;适宜性“较好”及以上级别覆盖面积为 5 557 km²,占比为 35.63%;适宜性“差”占比最低,仅为 14.32%(图 9),主要分布在鲁西隆起区。

3) 模型准确性评估

对评价结果的准确性评估是所采用方法的核心,其本质在于验证理论模型与现场应用场景的适用性。不同学者采用 ROC 曲线下面积等方法量化模型性能[38]。

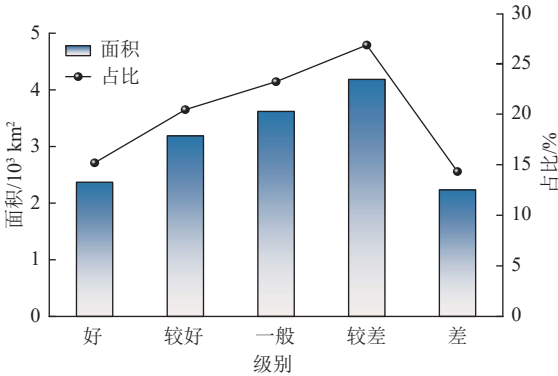


图 9 地热资源适宜性分区面积及占比
Fig.9 Areas and percentages of various suitability zones of geothermal resource development

本文选取鲁西北平原地热开发程度较高的德州市德城区为实证对象,基于其地热井空间分布特征(图 8),开展地热资源开发适宜性评价结果的实证校验。

德城区现有 95 眼地热井(回灌井 45 眼,开采井 50 眼)。91.58%(87 眼)的地热井集中分布于地热资源开发

适宜性“好”的区域,其余 8 眼(占比 8.42%, 3 眼回灌井与 5 眼开采井)分布于“较好”适宜区,其他适宜性级别区域尚未有地热井建设。通过对上述研究结果的分析,进一步验证了本研究所采用的方法在地热资源开发适宜性评价方面的有效性和适用性。

4) 地热适宜性影响因素

基于博弈组合赋权法筛选权重系数大于 0.11 的热储温度、大地热流、热储厚度及地温梯度等关键控制因子,通过空间叠加分析技术揭示不同适宜性等级的空间分异规律及参数耦合机制,其定量表征结果如图 10 所示。

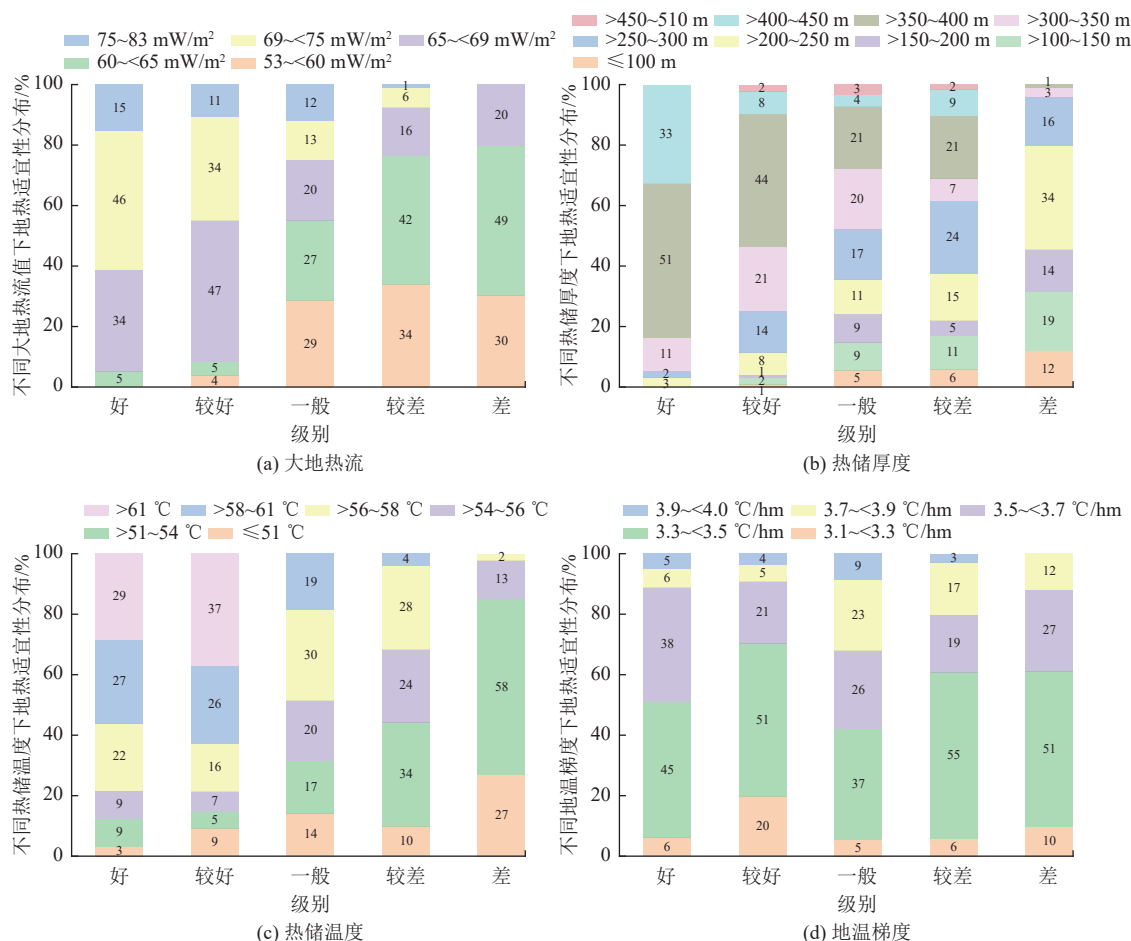


图 10 鲁西北平原不同评价指标下地热适宜性空间分布

Fig.10 Spatial distributions of various suitability zones of geothermal resource development in the northwest Shandong plain under varying evaluation indices

研究区地热资源开发适宜性呈现显著的多参数耦合控制特征: 优质资源区(适宜性“好”)集中分布于热流值(69~<75 mW/m², 占比 46%)、热储厚度(>400~450 m, 占比 33%) 与温度(>61 °C, 占比 29%) 三者的高值协同区; 而劣质资源区(适宜性“差”)则受控于热储厚度薄(>200~250 m, 占比 34%)、温度低(≤54 °C, 占比 85%) 及地温梯度异常区(3.1~<3.3 °C/hm, 适宜性“好”占比仅 6%), 且在地温梯度 3.9~<4.0 °C/hm 的高值带内未见劣质资源分布, 表明热力学参数协同效应是控制地热资源禀赋的关键机制。

3.4 综合分析

研究区资源潜力较大的区域主要分布于惠民潜断陷、德州潜断陷、东明-莘县潜断陷及无棣潜断陷 4 个构造单元。各单元平均资源总量依次为 1.45×10^{17} 、 $1.44 \times$

10^{17} 、 0.88×10^{17} 、 0.52×10^{17} kJ。就平均地热资源丰度而言, 德州潜断陷、高唐潜断陷、故城-馆陶潜断陷及惠民潜断陷呈现显著富集特征, 其中前 3 个单元平均资源丰度均超过 4.2×10^{13} kJ/km², 构成区域地热资源高值聚集区。

故城-馆陶潜断陷和高唐潜断陷的平均地热资源总量相对较低, 分别为 0.35×10^{17} 和 0.3×10^{17} kJ。然而, 其热储条件显著优于区域平均水平。这种优越的地热地质条件反映在开发适宜性评价中, 两构造单元中适宜性等级达到“较好”及以上的区域分别占 70.71% 和 88.16%。

相比之下, 惠民潜断陷虽然展现出较大的平均资源总量(1.45×10^{17} kJ), 但其主要成因在于该构造单元面积最大(较资源量相近的德州潜断陷多 439 km²), 其关键

地热参数指标相对较差,大地热流均值仅 58.34 mW/m^2 , 低于研究区均值 11%, 储层孔隙率较区域平均值低 2.15%, 具有相对致密的储层特征。这些制约因素导致其地热开发适宜性达到较好等级及以上标准的区域仅占 3.35%, 显著低于其他构造单元。

研究表明,区域地热资源禀赋与开发适宜性在空间分布上呈现显著的非耦合特征,这种空间异质性主要受控于地质构造条件、热储层物性参数及地表环境约束等多因素的综合影响。以地热资源勘探开发为出发点,地热资源优势区应具有较大的地热资源潜力和热能需求。结合地热资源潜力评估与开发适宜性分析结果,德州潜断陷构造单元在鲁西北平原馆陶组砂岩热储地热系统中具有显著优势,可作为区域地热资源开发的首选靶区。

4 结论

(1) 鲁西北平原馆陶组地热资源主要分布于德州潜断陷、惠民潜断陷、东明-莘县潜断陷、无棣潜断陷,而地热资源丰度较高的构造单元为德州潜断陷、高唐潜断陷以及故城-馆陶潜断陷的,平均值均高于 $4.2 \times 10^{13} \text{ kJ/km}^2$ 。

(2) 各指标的适宜性权重分析结果表明,在选取的 9 项指标中,大地热流、热储温度、热储厚度 3 个关键参数具有显著的主导性影响(累计权重超过 0.5),对于拟新建地热田的勘探部署具有一定的指导作用。

(3) 地热适宜性“好”和“较好”区域在德州潜断陷、高唐潜断陷、故城-馆陶潜断陷占主导地位,占比均超过 70%。地热资源适宜性级别分布整体呈“两端低、中间高”的趋势,大部分区域适宜性处于中等偏下水平,适宜性“差”区域主要分布在鲁西隆起区。

(4) 研究区地热资源开发适宜性呈多参数耦合控制特征,优质资源区集中分布于热流值、热储厚度与温度等热力学参数的高值协同区,综合地热资源潜力与开发适宜性进行综合评价,德州潜断陷构造单元具有显著的地热资源优势,是研究区最具开发潜力的优势地热富集区。

符号注释:

A 为热储面积, km^2 ; B 为判断矩阵; c_r 为热储岩石比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; c_w 为地热水的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; CI 为一致性指标; CR 为一致性比率,当 $CR < 1$ 时,则可认为满足一致性,赋权合理; D_{ij} 为评价指标比重; e_i 为熵值; f_i 为第 i 个评价指标标准化值; G 为馆陶组热储以浅深度段的平均地温梯度, $^\circ\text{C}/\text{km}$; h 为信息熵, $h = 1/\ln n$; k 为赋权方法顺序; L 为指标赋权方法个数; m 为评价指

标个数; M 为热储厚度, m ; n 为样本个数; q 为热储中储存的热量, J ; q_r 为岩石中储存的热量, J ; q_w 为水中储存的热量, J ; R 为评价单元内地热资源综合评价价值; RI 为随机一致性指标; r_{ij} 为标准化后的矩阵; S_j 为标准差; t_0 为当地年平均气温,取 13.1°C ; t_r 为热储温度, $^\circ\text{C}$; t_v 为恒温带温度, $^\circ\text{C}$; V_j 为变异系数; w_i 为第 i 个评价指标的权重; W_j' 为熵权法权重; W_j'' 为变异系数法权重; w_k 为第 k 种赋权方法的基本权重向量集; w_k^T 为基本权重向量集 w_k 的转置矩阵; w 为权重的线性组合; X_{ij} 为标准化后的指标值; x_{ij} 为原始数据集; $x_{ij,\max}$ 和 $x_{ij,\min}$ 分别为原始数据的最大和最小值; \bar{y}_j 为指标均值; y_{ij} 为原始数据矩阵; Z 为馆陶组热储的平均埋深, km ; Z_0 为恒温带深度, km ; α_k 为线性组合系数; λ_{\max} 为判断矩阵最大特征值; ρ_r 为热储岩石密度, kg/m^3 ; ρ_w 为地热水的密度, kg/m^3 ; ϕ 为孔隙率, %; ω 为特征向量。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References)

- [1] 裴发根, 何梅兴, 方慧, 等. 基于模糊数学法的松辽盆地深层地热资源潜力评价[J]. 地球科学, 2023, 48(3): 1058–1079.
PEI Fagen, HE Meixing, FANG Hui, et al. Evaluation of deep geothermal resources potential in the Songliao Basin based on the fuzzy mathematics[J]. Earth Science, 2023, 48(3): 1058–1079.
- [2] 庞忠和, 段忠丰. 华北赋煤区地热资源富集模式及开发利用方向[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(9): 14–22.
PANG Zhonghe, DUAN Zhongfeng. Accumulation patterns and exploitation and utilization targets of geothermal resources in the coal-bearing area in North China[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(9): 14–22.
- [3] 高宗军, 吴立进, 曹红. 山东省地热资源及其开发利用[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2009, 28(2): 1–7.
GAO Zongjun, WU Lijin, CAO Hong. The summarization of geothermal resources and its exploitation and utilization in Shandong Province[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2009, 28(2): 1–7.
- [4] 王一波, 刘绍文, 陈超强, 等. 中国陆域大地热流数据汇编(第五版)[J]. 地球物理学报, 2024, 67(11): 4233–4265.
WANG Yibo, LIU Shaowen, CHEN Chaoqiang, et al. Compilation of terrestrial heat flow data in continental China (5th edition)[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2024, 67(11): 4233–4265.
- [5] 赵铭海, 李晓燕, 宋明水, 等. 济阳坳陷东营组-馆陶组地热资源评价[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(4): 1–5.
ZHAO Minghai, LI Xiaoyan, SONG Mingshui, et al. Research on geothermal resources assessment of the Guantao–Dongying Formation in Jiyang depression[J]. Petroleum Geology and Recovery

- Efficiency, 2015, 22(4): 1–5.
- [6] 朱喜, 张庆莲, 刘彦广. 基于热储法的鲁西平原地热资源评价[J]. 地质科技情报, 2016, 35(4): 172–177.
ZHU Xi, ZHANG Qinglian, LIU Yanguang. Evaluation of the geothermal resources in the plain of west Shandong Province[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(4): 172–177.
- [7] 康凤新, 郑婷婷, 史猛, 等. 山东省地热资源赋存规律及其富集机制[J]. 地学前缘, 2024, 31(6): 67–94.
KANG Fengxin, ZHENG Tingting, SHI Meng, et al. Occurrence rules and enrichment mechanism of geothermal resources in Shandong Province[J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31(6): 67–94.
- [8] 康凤新, 赵季初, 黄迅, 等. 华北盆地梁村古潜山岩溶热储聚热机制及资源潜力[J]. 地球科学, 2023, 48(3): 1080–1092.
KANG Fengxin, ZHAO Jichu, HUANG Xun, et al. Heat accumulation mechanism and resources potential of the Karst geothermal reservoir in Liangcun buried uplift of Linqing depression[J]. Earth Science, 2023, 48(3): 1080–1092.
- [9] 朱喜, 王贵玲, 马峰, 等. 雄安新区地热资源潜力评价[J]. 地球科学, 2023, 48(3): 1093–1106.
ZHU Xi, WANG Guiling, MA Feng, et al. Evaluation of geothermal resources of the Xiong'an New Area[J]. Earth Science, 2023, 48(3): 1093–1106.
- [10] WITTER J B, TRAINOR-GUITTON W J, SILER D L. Uncertainty and risk evaluation during the exploration stage of geothermal development: A review[J]. *Geothermics*, 2019, 78: 233–242.
- [11] TIAN Baoqing, KONG Yanlong, GONG Yulie, et al. An improved volumetric method of geothermal resources assessment for shallow ground combining geophysical data[J]. *Renewable Energy*, 2020, 145: 2306–2315.
- [12] PALACIOS A, KOON-KOON R, MIRANDA-FLORES G, et al. A Monte Carlo-based approach for the evaluation of Mexico's geothermal potential[J]. *Renewable Energy*, 2024, 223: 120006.
- [13] ELMASRY A, MOHALLEL S A, MADANI A, et al. Geothermal groundwater study and its energetic potential assessment in Abu Gharadig Basin, North Western Desert, Egypt[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2023, 202: 104925.
- [14] WANG Yibo, WANG Lijuan, BAI Yang, et al. Assessment of geothermal resources in the north Jiangsu Basin, East China, using Monte Carlo simulation[J]. *Energies*, 2021, 14(2): 259.
- [15] LI Yongyi, LONG Xiting, LU Jun. Evaluation of geothermal resources potential in the uplifted mountain of Guangdong Province using the Monte Carlo simulation[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 11: 1233026.
- [16] WANG Zhuting, JIANG Guangzheng, ZHANG Chao, et al. Estimating geothermal resources in Bohai Bay Basin, Eastern China, using Monte Carlo simulation[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(12): 355.
- [17] ZAHER M A, ELBARBARY S, EL-SHAHAT A, et al. Geothermal resources in Egypt integrated with GIS-based analysis[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2018, 365: 1–12.
- [18] CAMBAZOĞLU S, YAL G P, EKER A M, et al. Geothermal resource assessment of the Gediz Graben utilizing TOPSIS methodology[J]. *Geothermics*, 2019, 80: 92–102.
- [19] LI Xuan, HUANG Changsheng, CHEN Wei, et al. GIS model for geothermal advantageous target selection[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 6024.
- [20] DENG Q, JIANG A, TONG Z, et al. Evaluation of favourable hot dry rock areas in the east of the Yishu fault zone in China[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2021, 68(2): 245–261.
- [21] 饶松, 肖红平, 王朱亭, 等. 渤海湾盆地馆陶组热储特征与地热资源评价[J]. *天然气工业*, 2023, 43(5): 141–152.
RAO Song, XIAO Hongping, WANG Zhuting, et al. Geothermal reservoir characteristics and geothermal resource evaluation of Guantao Formation in the Bohai Bay Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(5): 141–152.
- [22] 宋前进, 王刚, 许一川, 等. 深层地热能开发及其对地热水流场的影响: 以兰考县深层地热能开发为例[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(2): 184–193.
SONG Qianjin, WANG Gang, XU Yichuan, et al. Development of deep geothermal energy and its influence on geothermal water flow field: Taking the development of deep geothermal energy in Lankao County for an example[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(2): 184–193.
- [23] 崔洋, 康凤新, 钟振楠, 等. 鲁西北平原地热热源机制的气体同位素约束[J]. *地球学报*, 2023, 44(1): 93–106.
CUI Yang, KANG Fengxin, ZHONG Zhennan, et al. Gas isotope constraints on the geothermal heat source mechanism in northwest Shandong Plain[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2023, 44(1): 93–106.
- [24] 于磊, 张健, 高玲举, 等. 鲁西隆起重磁异常特征及其构造活动性分析[J]. *地震学报*, 2017, 39(5): 694–707.
YU Lei, ZHANG Jian, GAO Lingju, et al. Gravity-magnetic anomalies and tectonic activities in Luxi uplift[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2017, 39(5): 694–707.
- [25] 杨询昌, 康凤新, 王学鹏, 等. 砂岩孔隙热储地温场水化学场特征及地热水富集机理: 鲁北馆陶组热储典型案例[J]. *地质学报*, 2019, 93(3): 738–750.
YANG Xunchang, KANG Fengxin, WANG Xuepeng, et al. Hydrochemical features of geothermal reservoir geotemperature field in sandstone porosity and enrichment mechanism of geothermal water: A case study of geothermal reservoir of Guantao Formation in the Lubei[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(3): 738–750.
- [26] 张保建, 刘福义, 高宗军, 等. 鲁西北地区理疗热矿水的形成条件及找矿靶区[J]. *中国地质*, 2015, 42(4): 1170–1178.
ZHANG Baojian, LIU Fuyi, GAO Zongjun, et al. Formation conditions and prospecting targets of physiotherapy geothermal mineral water in northwest Shandong Province[J]. *Geology in China*, 2015, 42(4): 1170–1178.
- [27] 张源, 万志军, 胡淞博, 等. 矿井岩溶热储三维地质建模及地热资源潜力评价[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(8): 3571–3579.
ZHANG Yuan, WAN Zhijun, HU Songbo, et al. 3D geological modeling of mine Karst geothermal reservoir and geothermal resources evaluation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(8): 3571–3579.
- [28] YALCIN M, KALAYCIOĞLU S, BASARAN C, et al. Explora-

- tion of potential geothermal fields using GIS-based entropy method: A case study of the Sandikli[J]. *Renewable Energy*, 2024, 237: 121719.
- [29] 冯世进, 徐熠, 杨俊毅, 等. 基于集对-组合赋权的填埋场失稳风险评价方法[J]. *岩土力学*, 2024, 45(7): 2129–2139.
- FENG Shijin, XU Yi, YANG Junyi, et al. Risk assessment of land-fill instability based on set pair-combination weighting[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024, 45(7): 2129–2139.
- [30] LAI Chengguang, CHEN Xiaohong, CHEN Xiaoyu, et al. A fuzzy comprehensive evaluation model for flood risk based on the combination weight of game theory[J]. *Natural Hazards*, 2015, 77(2): 1243–1259.
- [31] AL GARNI H Z, AWASTHI A. Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia[J]. *Applied Energy*, 2017, 206: 1225–1240.
- [32] QIAN Yurong, JEON G. Weight assignment using entropy[J]. *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*, 2016, 11(1): 353–362.
- [33] 陈红光, 李晓宁, 李晨洋. 基于变异系数熵权法的水资源系统恢复力评价: 以黑龙江省 2007–2016 年水资源情况为例[J]. *生态经济*, 2021, 37(1): 179–184.
- CHEN Hongguang, LI Xiaoning, LI Chenyang. Resilience evaluation of water resource system based on coefficient of variation-entropy weight method: A case study of water resources in Heilongjiang Province from 2007 to 2016[J]. *Ecological Economy*, 2021, 37(1): 179–184.
- [34] CHEN Yuehong, XU Congcong, GE Yong, et al. A 100 m gridded population dataset of China's seventh census using ensemble learning and big geospatial data[J]. *Earth System Science Data*, 2024, 16(8): 3705–3718.
- [35] YANG Jie, HUANG Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907–3925.
- [36] 中华人民共和国自然资源部. 地热资源评价方法及估算规程: DZ/T 0331—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [37] ZENG Taorui, JIN Bijing, GLADE T, et al. Assessing the imperative of conditioning factor grading in machine learning-based landslide susceptibility modeling: A critical inquiry[J]. *CATENA*, 2024, 236: 107732.
- [38] 黄钦, 谭翠, 杨波. 基于 XGBoost 算法的亚热带地区生态旅游适宜性评价方法研究[J]. *地球信息科学学报*, 2024, 26(2): 303–317.
- HUANG Qin, TAN Cui, YANG Bo. Research on the evaluation method of ecotourism suitability in subtropical regions based on XGBoost algorithm[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2024, 26(2): 303–317.

(责任编辑 周建军)