

引用格式:邹彦荣,高小荣,王鹏涛,等.关中盆地砂岩热储地热潜力不确定性评估及开发靶区优选[J].油气藏评价与开发,XXXX,XX(X):
Zou Yanrong, Gao Xiaorong, Wang Pengtao, et al. Uncertainty evaluation of geothermal resources potential of sandstone geothermal reservoir in
Guanzhong basin and study on optimization of development target area[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, XXXX, XX(X):

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.20260075

关中盆地砂岩热储地热潜力不确定性评估及 开发靶区优选

邹彦荣^{1,2}, 高小荣^{1,2}, 王鹏涛^{1,2,3,4}, 毕胜山^{3,4}, 孙彩霞^{1,2}, 李红岩^{1,2,4}, 赵雅琪⁵, 丁朋朋⁵, 张海雄⁶, 刘建强⁷

(1. 中石化绿源地热能开发有限公司, 陕西 咸阳 721000; 2. 陕西省“四主体一联合”地热能校企联合研究中心, 陕西 咸阳 721000; 3. 西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710049; 4. 西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049; 5. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021; 6. 中石化新星江苏华东新能源开发有限责任公司, 江苏 南京 210000; 7. 陕西省水工环地质调查中心, 陕西 西安 710000)

摘要: 关中盆地位属中低温传导性地热田, 因其良好的地热储层成为陕西省中部地区主要的热储资源。高效合理地开采地热资源可为能源转型和“双碳”目标发挥重要作用。以关中盆地研究对象, 采用体积法与蒙特卡罗法对研究区地热资源潜力进行定量分析; 基于物性条件、传热特性和区位优势, 构建了灰色关联-CRITIC-变异系数-投影寻踪相结合的博弈组合赋权模型, 开展研究区地热资源优势区分析; 综合地热资源潜力及优势区评价等级确定关中盆地地热资源开发靶区。结果表明: 研究区新近系热储最大概率资源量为 82.5×10^{18} kJ, 平均地热资源丰度为 38.4×10^{14} kJ/km² (相当于 13.11×10^7 t/km² 标准煤); 蒲城凸起的平均地热资源量最大, 西安凹陷的平均地热资源丰度最高; 人口密度和国内生产总值是优势区划分的关键主导参数, 权重占比分别为 31.3% 和 29.9%; 研究区地热开发优势区“较好”及以上区域面积为 2 978.72 km² (占比 13.78%), 且“好”与“较好”等级区域主要集中于西安凹陷、咸礼凸起及固市凹陷; 优势区评价结果整体可信度较高, 其中固市凹陷和咸礼凸起评价结果最为稳定; 综合资源潜力与开发优势区评价结果显示, 西安凹陷与固市凹陷构造单元优势显著, 是研究区内最具开发潜力靶区。研究结果可为关中盆地地热资源的规模化开发与靶区优选提供科学依据, 助力区域能源结构优化与碳减排目标实现。

关键词: 关中盆地; 地热资源潜力; 不确定性评估; 优势区识别; 博弈组合赋权

中图分类号: TE01

文献标识码: A

Uncertainty evaluation of geothermal resources potential of sandstone geothermal reservoir in Guanzhong basin and study on optimization of development target area

Zou Yanrong^{1,2}, Gao Xiaorong^{1,2}, Wang Pengtao^{1,2,3,4}, Bi Shengshan^{3,4}, Sun Caixia^{1,2}, Li Hongyan^{1,2,4}, Zhao Yaqi⁵, Ding Pengpeng⁵, Zhang Haixiong⁶, Liu Jianqiang⁷

(1. Sinopec Green Energy Geothermal Development Co., Ltd, Xianyang 721000, Shanxi, China; 2. Shaanxi Province 'Four Subjects and One Union' Geothermal Energy University-Enterprise Joint Research Center, Xianyang 721000, Shaanxi, China; 3. MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering; 4. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 5. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 6. Sinopec Xinxing Jiangsu Huadong New Energy Co., LTD., Nanjing, Jiangsu 210000, China; 7. Shaanxi Provincial Water Conservancy, Engineering and Environmental Geology Survey Center, Xi'an, Shaanxi 710000, China)

Abstract: Being a geothermal field with medium-low temperature conductivity, Guanzhong Basin has become the main geothermal reservoir resource in central Shaanxi Province because of its good geothermal reservoir. Efficient and reasonable exploitation of geothermal resources can play an important role in energy transformation and the goal of “double carbon”. In this paper, Guanzhong basin is taken as the research

收稿日期: 2026-06-01。

第一作者简介: 邹彦荣 (1979—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事地热能勘探开发利用技术及回灌技术工作。地址: 陕西省咸阳市秦都区中华西路4号, 邮政编码: 721000。E-mail: direzyr@163.com

通信作者简介: 王鹏涛 (1989—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事地热能勘探开发利用技术、高效取热技术、回灌技术及储能技术工作。地址: 陕西省咸阳市秦都区中华西路4号, 邮政编码: 721000。E-mail: wangpengtao@stu.xjtu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金青年项目“储层时空非均质性对砂岩热储多场耦合过程影响机理与开发模式优化”(42307272); 四川省重点研发计划项目“中深层地热能高效取热关键技术研究及应用”(2023YFS0355); 陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目“中深层地热能高效取热关键技术研究与应用‘科学家+工程师’”(2023KXJ-018); 陕西省青年科技新星项目“中深层地热能高效取热关键技术研究与应用”(2024ZC-KJXX-074)。

object, and the geothermal resource potential in the research area is quantitatively analyzed by volume method and Monte Carlo. Based on the physical conditions, heat transfer characteristics and location conditions, the game combination weighting model of grey correlation, criticality, coefficient of variation and projection pursuit is constructed, and the dominant area of geothermal resources in the study area is analyzed. The target area of geothermal resources development in Guanzhong basin is determined by comprehensive evaluation grade of geothermal resources potential and dominant areas. The results show that the maximum probability resource of Neogene thermal storage in the study area is 82.5×10^{18} kJ, and the average geothermal resource abundance is 38.4×10^{14} kJ/km² (equivalent to 13.11×10^7 t/km² standard coal). The average amount of geothermal resources in Pucheng uplift is the largest, and the average abundance of geothermal resources in Xi'an sag is the highest. Population density and gross domestic product are the key dominant parameters for the division of advantage areas, with the weight ratios of 31.3% and 29.9%, respectively. The area of "good" and above geothermal development dominant area in the study area is 2978.72 km² (accounting for 13.78%), and the "good" and above grade areas are mainly concentrated in Xi'an sag, Xianli uplift and Gushi sag. The overall reliability of the evaluation results of dominant areas is high, among which Gushi sag and Xianli uplift are the most stable. Based on the comprehensive evaluation results of resource potential and development advantage areas, Xi'an sag and Gushi sag have significant advantages in structural units and are the most potential targets in the study area. The research can provide a scientific basis for the large-scale development of geothermal resources and the selection of optimal targets in the Guanzhong Basin, thereby contributing to the optimization of the regional energy structure and the achievement of carbon emission reduction goals.

Keywords: Geothermal resource potential; uncertainty evaluation; identification of dominant areas; game combination empowerment; Guanzhong basin

由于全球温室气体排放攀升,气候变化加剧与能源需求增长,因此环境与能源问题面临挑战^[1]。发展砂岩热储地热能既是降低化石能源依赖与运维成本的关键举措,也是缓解环境负荷、推动能源绿色转型的重要路径^[2-3]。地热能的开发潜力受场地条件制约,其水文地质、地热地质特征的差异直接影响工程的经济可行性^[4]。关中盆地作为“关中平原城市群”核心区域,面临能源优化与碳减排的迫切需求,其广泛发育的新近系砂岩热储虽属中低温系统,但紧邻城市用能负荷中心的区位优势使其成为地热规模化开发的优选对象^[5]。

现有成果已就储层特征、有利层段及局部资源量开展研究^[6-7],但多采用体积法、热流量法估算关中盆地中深层与浅层地热资源量^[8-9],明确了区域中低温资源禀赋与壳幔导热对流耦合成因,初步完成了开采有利层段优选。然而,确定性方法受限于储层参数空间变异及地质模型简化,估算结果波动较大且无法量化不确定性。基于随机抽样与统计分析的蒙特卡罗模拟法为处理地热资源评价中参数的不确定性提供了有效手段^[10-13]。例如,何怡香等^[14]针对鲁西北平原采用体积法与蒙特卡罗法开展地热资源的不确定性评估;Wang等^[15]运用蒙特卡罗法量化评价参数的不确定性,分析了苏北盆地浅部砂岩与深部碳酸盐岩热储的资源量区间及均值。

关中盆地地热资源评价^[16-17]主要侧重于浅层低温能或局部区块,对资源禀赋与社会经济需求双因素的耦合量化评价较少。基于地理信息系统与多源数字数据层的集成应用,已成为地热开发优势区分析日趋成熟的研究路径^[18-21]。例如,Li等^[22]构建了南通市开环与闭环系统适宜性评价体系,采用熵权法、TOPSIS法确定指标权重和划分潜力等级;饶松等^[23]基于地理信息系统,整合钻

井、地质等数据,分析渤海湾盆地地热资源特征并进行优势区评价。

基于此,采用体积法与蒙特卡罗方法评估地热资源潜力的不确定性;从热储物性条件、传热特性及区位条件三方面构建地热开发优势区评价指标体系;运用灰色关联-CRITIC-变异系数-投影寻踪相结合的博弈组合赋权模型,开展地热优势区定量评价及影响因素分析,采用信息熵对评价结果的不确定性进行量化分析,综合确定关中盆地地热资源开发首选靶区,为研究区地热开发与能源结构优化提供理论依据。

1 研究区概况

关中盆地位于陕西省中部,西起宝鸡,东至潼关,面积约 2.0×10^4 km²。构造上北接鄂尔多斯地块,南依秦岭褶皱带,东靠山西隆起带,西连六盘山弧形断裂带,呈三面环山、向东敞开格局。地势西高东低,发育黄土台塬、河谷阶地、山前洪积平原等地貌。盆地属新生代断陷盆地,自西向东可划分为6个断块构造单元(两凹四凸),如图1所示。新生代以来,关中盆地经历强烈沉陷,堆积了古近系、新近系及第四系巨厚沉积物(图2)。盆地地层厚度由西向东逐渐变薄,张家坡组地层埋深由西向东呈西浅东深,蓝田—灞河组和高陵群地层埋深呈西深东浅。

高陵群以相对粗粒的冲积扇、扇三角洲以及河流相沉积为主,北部缓坡三角洲及河流相较发育,南部断陷强烈,冲积扇、扇三角洲相对发育,中心湖泊以浅湖环境为主,渗透系数介于0.07~0.88 m/d,平均厚度和孔隙率分别为347.6 m和20.8%,砂层厚度介于10~150 m,砂厚比平均为15%。蓝田—灞河组以河流三角洲和湖相沉积为

主,山前发育冲积扇,均以三角洲、河流相为主,为主要开采层段,平均厚度为818.2 m,砂层厚度介于142~418 m,平均砂厚比为30.8%,渗透系数介于0.22~0.50 m/d,平均孔隙率为24%。张家坡组以河流三角洲和湖相沉积为

主,西安凹陷、固市凹陷为主要湖相沉积区,盆地南北两侧过渡为湖泊相,西部以河流相为主,中东部为湖相,平均厚度为224.6 m,砂厚比介于6.64%~51.6%,平均渗透系数和孔隙率分别为0.31 m/d和26%。

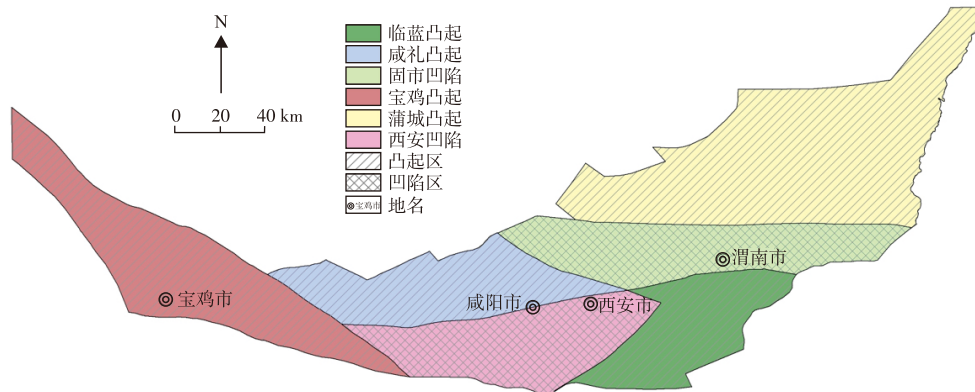


图1 研究区位置及构造分布

Fig. 1 Location and structural distribution of the study area

盆地优质砂体主要分布在渭北断裂、口镇—关山断裂以南,至余下一铁炉子断裂以北,整体呈南厚北薄、东厚西薄分布。储集空间为孔隙型热储,以原生粒间孔隙为主,孔隙裂隙发育,为地热流体提供良好的储集与运移空间,地层快速堆积、未充分压实,胶结疏松,整体为半成岩状态。盆地的砂岩储层地热水主要来自秦岭和北山的补给,区域大地热流值介于60~80 mW/m²,其中临潼—西安—咸阳—武功一带构成热流高值区。大地热流分布特征与莫霍面起伏密切相关,盆地莫霍面埋深介于30~35 km,处于华北莫霍面隆起背景之上。地温梯度介于3~6 °C/hm,高值区集中分布于秦岭山前及渭河断层两翼。

2 研究方法

2.1 地热资源潜力不确定性评估

研究区空间覆盖范围广,数据分布不均,评价参数具有不确定性。因此,采用蒙特卡罗法处理不确定输入参数,并将其代入体积法公式开展资源量计算。通过为输入参数配置正态分布、三角形分布或均匀分布等概率模型,在明确输入、输出转换关系的基础上,设定迭代次数进行大量模拟计算,最终对输出结果进行统计分析并生成概率分布函数,实现不确定性的量化表征。

热储体积法^[24]公式为:

$$Q = AM\rho_r c_r (1 - \phi)(T_r - T_0) + AM\rho_w c_w \phi(T_w - T_0) \quad (1)$$

式中: Q 为热储中储存的热量,单位J; ρ_r 为热储密度,单位kg/m³; c_r 为热储比热,单位J/(kg·°C); ρ_w 为地热水的密

度,单位kg/m³; c_w 为地热水的比热容,单位J/(kg·°C); A 为热储面积,单位km²; M 为热储厚度,单位m; ϕ 为孔隙度,%; T_r 为热储温度,单位°C; T_w 为地热水的热储温度,单位°C; T_0 为当地年平均气温,单位°C。

2.2 地热资源优势区评价

1) 评价模型

综合考虑地质条件与区位条件,基于地理信息系统(GIS)多源信息叠加评价方法^[25],建立热储优势区评价模型:

$$P = \sum_{i=1}^m f_i w_i \quad (2)$$

式中: P 为评价单元地热资源综合评价价值; m 为评价指标个数; i 为评价指标序号; f_i 为第*i*个评价指标标准化值; w_i 为第*i*个评价指标的权重。

2) 评价指标体系

热储物性条件和传热特性是地热勘探开发优势区圈定的关键本底因素,而区位条件具有重要的驱动作用。取地温梯度、热储厚度、人口密度等11个评价指标,建立了关中盆地砂岩热储优势区评价指标体系,如图3所示。

3) 评价指标权重

构建了灰色关联-CRITIC-变异系数-投影寻踪相结合的博弈组合赋权模型,并计算评价指标权重。首先对原始数据进行无量纲化处理,通过灰色关联法、CRITIC法、变异系数法及投影寻踪模型分别计算初始客观权重。在此基础上构建权重向量集,通过线性组合建立博弈组合模型^[26]。依据博弈论权重集化模型理论^[27],建立综合权重优化模型并求解最优组合系数,得到各评价指标的综合权重。

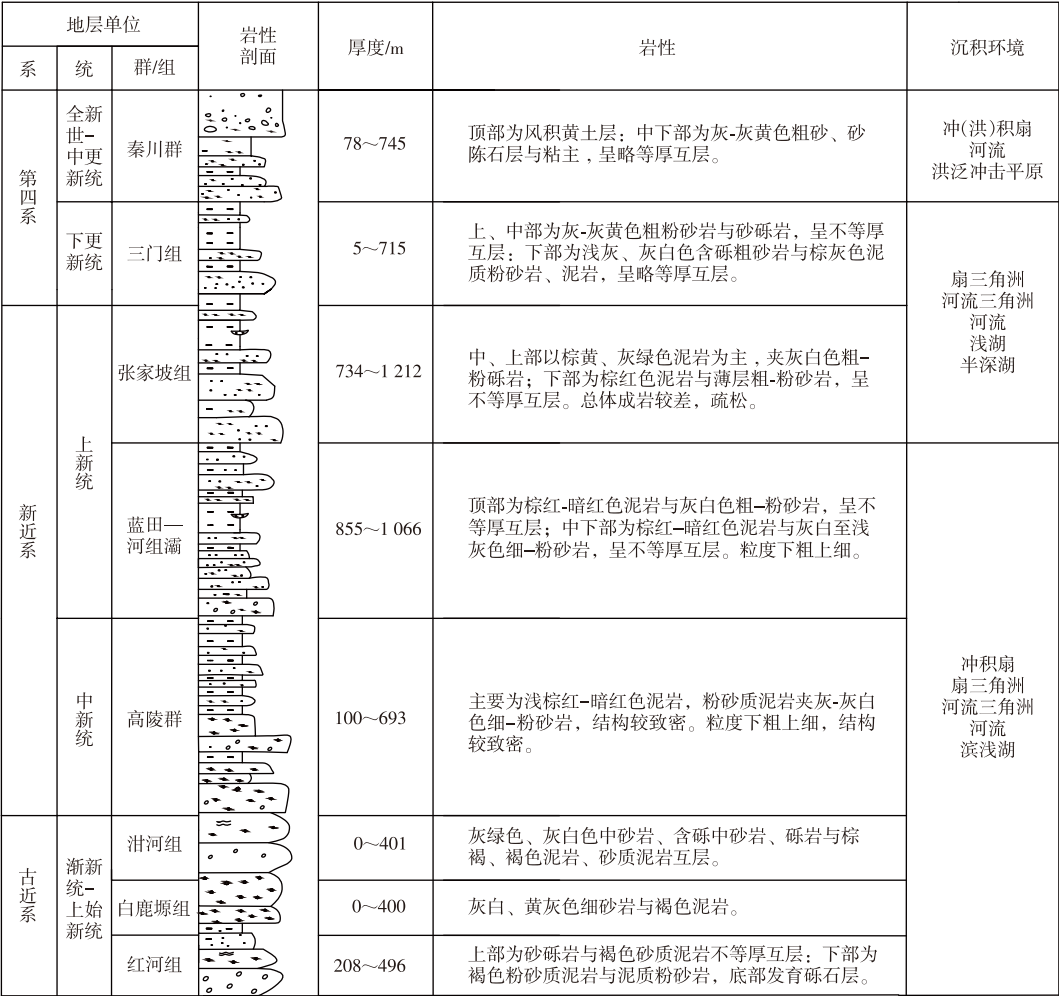


图2 研究区地层综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive histogram of strata in the study area

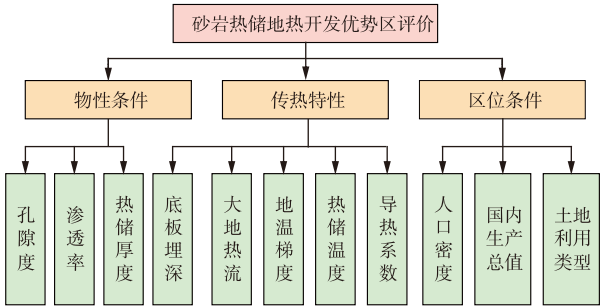


图3 砂岩热储优势区评价指标体系

Fig. 3 Evaluation index system of sandstone geothermal reservoir advantage area

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,采用式(3)进行数据标准化处理。

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - (x_{ij})_{\min}}{(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}}, 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m \quad (3)$$

式中: x_{ij} 为原始数据集; n 为样本个数; $(x_{ij})_{\max}$ 和 $(x_{ij})_{\min}$ 分别为原始数据的最大值和最小值。

灰色关联法^[28]通过灰色关联度来表征两组事物的几何接近程度,计算步骤如下:

求各序列的初值像:

$$X'_i(j) = \frac{X_i(j)}{X_i(1)} \quad (4)$$

求关联系数:

$$\gamma_j(i) = \frac{j_{\min} i_{\min} |X'_0(j) - X'_i(j)| + \rho j_{\max} i_{\max} |X'_0(j) - X'_i(j)|}{|X'_0(j) - X'_i(j)| + \rho j_{\max} i_{\max} |X'_0(j) - X'_i(j)|} \quad (5)$$

计算关联度:

$$\gamma_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_j(i), (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

计算权重:

$$W_j = \gamma_j / \sum_{j=1}^m \gamma_j \quad (7)$$

式中: i 为评价对象序号; j 为评价指标序号; n 为评价对象个数; m 为评价指标个数; ρ 为分辨系数; $X'_i(j)$ 为初值化处理第*i*个评价对象中第*j*项指标的值; $X_i(j)$ 为第*i*个评价对象中第*j*项指标的实测值; $j_{\min} i_{\min} |X'_0(j) - X'_i(j)|$

为两级最小值; $j_{\max} i_{\max} |X'_0(j) - X'_i(j)|$ 为两级最大值; $X'_0(j)$ 为参考序列; $\gamma_j(i)$ 为关联系数; γ_j 为关联度; W_j 为灰色关联法权重。

CRITIC 法^[29]考虑指标的对比强度和冲突性,分别用标准差与指标间的相关性表示。数据标准化处理后计算对比强度:

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)^2} \quad (8)$$

计算信息量:

$$G_j = \sigma_j \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (9)$$

归一化处理得到权重:

$$W'_j = G_j / \sum_{j=1}^m G_j \quad (10)$$

式中: σ_j 为标准差; X_{ij} 为指标的监测值; $\bar{X}_j$ 为第 j 个指标的算术平均值; r_{ij} 为标准化后的矩阵; G_j 为指标 j 的总信息量; W'_j 为 CRITIC 法权重。

变异系数法^[30]通过计算数据离散程度确定指标权重。根据式(11)一式(14),计算指标数据的均值、标准差、变异系数及权重:

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

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

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

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

式中: $\bar{y}_j$ 为第 j 项指标的均值; y_{ij} 为原始数据矩阵; S_j 为标准差; V_j 为变异系数; W''_j 为变异系数法权重。

投影寻踪模型^[31]采用优化算法实现高维数据向低维空间的投影转换,获取能够最大限度揭示原始数据特征结构的投影方向,该方向向量即表征各指标权重。

首先,进行数据正向化与无量纲处理,构造投影指标函数:

$$z_i = \sum_{j=1}^m a_j X_{ij}, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

采用优化算法求解,最大化投影函数 $Q(a)$ 求得最优解 a^* :

$$\begin{cases} \text{Max: } Q(a) = S_z D_z \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^m a_j^2 = 1, a_j > 0 \\ S_z = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2} \\ D_z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (R - r_{ij}) f(R - r_{ij}) \end{cases} \quad (16)$$

归一化得到各指标权重:

$$W'''_j = \frac{a_j^*}{\sum_{j=1}^m a_j^*} \quad (17)$$

式中: z_i 为一维投影值; a^* 为 $Q(a)$ 达到最大时的最优投影方向向量; a_j^* 为第 j 个评价指标在最优投影方向向量 a^* 上的投影方向系数; a_j 为待求的投影方向向量; S_z 为投影值的标准差; $\bar{z}$ 为投影值 z_i 的均值; D_z 为投影值的局部密度; R 为局部密度的窗口半径; r_{ij} 为第 i 个与第 j 个投影值之间的距离; $f(R - r_{ij})$ 为单位阶跃函数; $Q(a)$ 为构造的投影指标函数; W'''_j 为投影寻踪模型权重; $s.t.$ 为约束条件。

构建基础权重向量集 w_k ,对 m 个指标采用 L 种方法赋权:

$$w_k = \{w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}\} (k = 1, 2, \dots, L) \quad (18)$$

基础权重向量的任意线性组合表达式为:

$$w = \sum_{k=1}^L \alpha_k w_k^T, w_k > 0 \quad (19)$$

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。

$$\min \left\| \sum_{k=1}^L \alpha_k w_k^T - w_k^T \right\|_2, (k = 1, 2, \dots, L) \quad (20)$$

归一化处理得到的优化组合系数 α'_k :

$$\alpha'_k = \alpha_k / \sum_{k=1}^L \alpha_k \quad (21)$$

博弈论组合赋权权重 w' :

$$w' = \sum_{k=1}^L \alpha'_k w_k^T \quad (22)$$

式中: w_k 为第 k 种赋权方法的基本权重向量集; w 为权重的线性组合; α_k 为线性组合系数; w_k^T 为基本权重向量集 w_k 的转置矩阵。

3 结果分析

3.1 评价指标

1) 热储物性条件

基于研究区钻孔数据,充分考虑新近系砂岩储层物性参数在沉积相带控制下随距离衰减的地质连续性特征,采用反距离插值得到研究区新近系孔隙度、渗透率、热储厚度和热储底板埋深的空间分布,如图 4a—图 4d 所示。

研究区渗透率介于 $(57.03 \sim 987.68) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均

为 $420.19 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 孔隙度分布介于 14%~34%, 平均为 24.08%, 如图 4a—图 4b 所示; 热储厚度自北向南由厚变薄, 自西向东中间厚两边薄, 如图 4c 所示; 热储底板埋深为 840.00~3 805.51 m, 其中固市凹陷、西安凹陷、蒲城凸起起底板平均埋深均超过 2 500 m。

2) 热储传热特性

研究区大地热流值、地温梯度分布值分别由中国大陆大地热流数据^[32]、物探测井资料(通过 GIS 空间分析)得到。研究区地温场空间分布特征使用地温梯度表征, 介于 2.05~5.13 °C/hm, 平均值为 3.17 °C/hm(图 4f), 高于

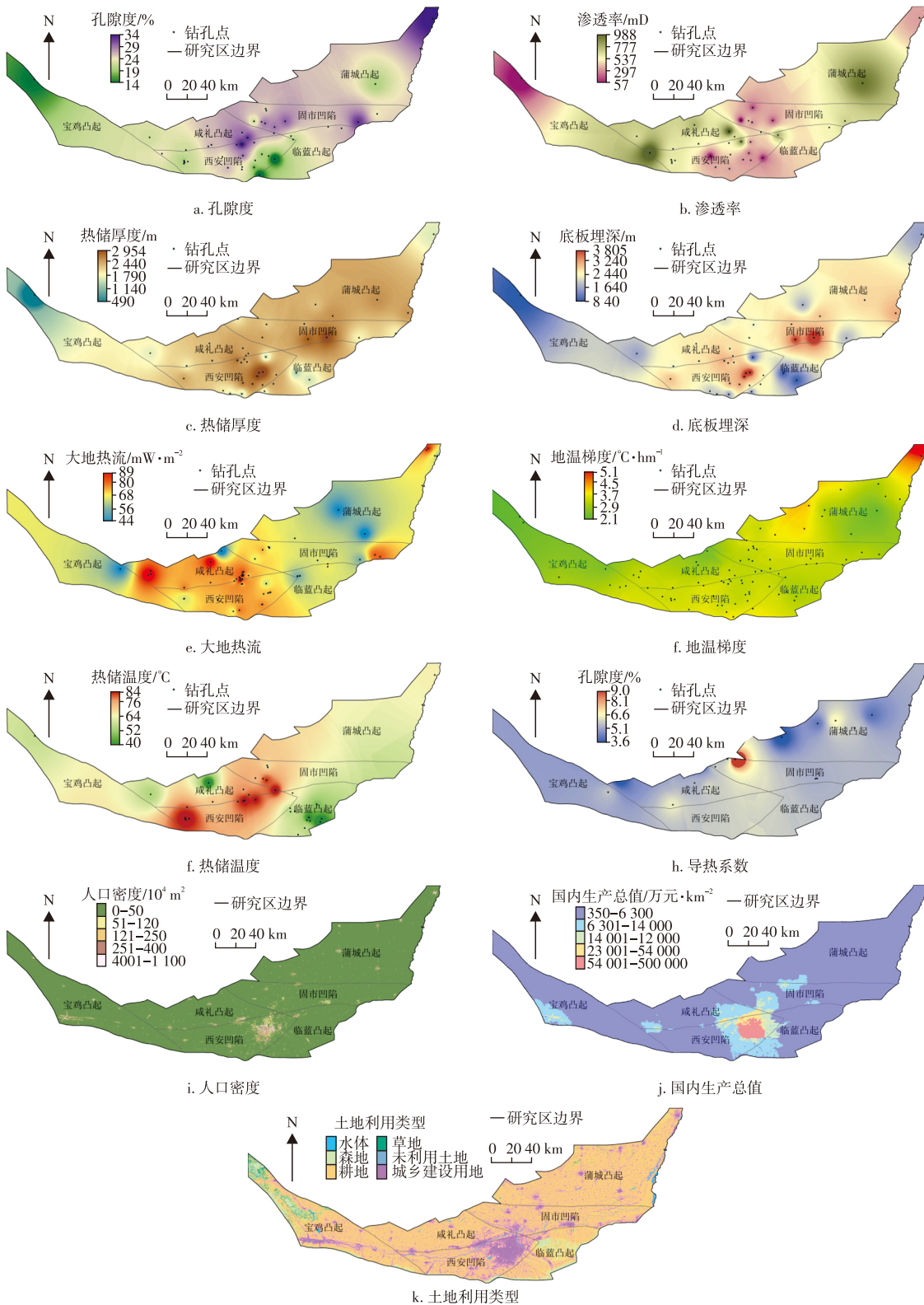


图 4 地热资源优势区评价指标

Fig. 4 Evaluation index of geothermal resource advantage area

地壳近似平均地温梯度^[33](2.50 °C/hm);大地热流值介于 43.85~88.65 mW/m²(图 4e),平均值为 66.72 mW/m²,略低于全国大地热流平均值。

关中盆地新近系地温场以传导为主,地层温度随深度总体线性增加而增加。由于多数钻孔缺乏稳态连续测温数据,研究依据各钻孔实测地温梯度或区域平均地温梯度,采用式(23)计算热储温度。研究区热储温度介于 40~84 °C,平均值为 64 °C,如图 4g 所示。热储温度较高区主要分布在西安凹陷、固市凹陷和咸礼凸起,平均值均超过 64 °C。

$$T_r = T_v + G(Z - Z_0)$$

(23)

式中: T_r 为热储温度,单位°C; T_v 为恒温带温度,单位°C; G 为新近系热储以浅深的平均地温梯度,单位°C/hm; Z 为新近系热储的平均埋深,单位m; Z_0 为恒温带深度,单位m。

导热系数是表征热量运输能力的核心热物性参数。研究区砂岩热储层导热系数为 3.63~9.05 W/(m·K),平均值为 5.35 W/(m·K),较高区主要位于关中盆地中部及蒲城凸起,如图 4h 所示。

3)热储区位条件

地热资源的开发利用与区位条件的发展有着不可分割的联系。人口密度较高区域、国内生产总值规模较大

区域及城镇集中区域,对地热供暖服务的需求普遍处于较高水平。选取人口密度^[34]、国内生产总值(GDP)、土地利用类型^[35]作为地热资源优势区评价区位条件指标,如图 4i—图 4k 所示。

研究区每个 100 m×100 m 网格的人口数量介于 0~1 093 人,平均每网格 9 人。中国生产总值平均为 5 828.44 万元/km²,西安凹陷、咸礼凸起与固市凹陷 3 个区域的国内生产总值水平相对突出,平均值均超过 3 700 万元/km²。土地利用类型中,耕地面积(16 979 km²)占比最大,占总面积的 77.41%。

3.2 地热资源潜力评估

以国家地质矿产行业标准《地热资源评价方法及估算规程》(DZ/T 0331-2020)为依据^[36],采用蒙特卡罗法对研究区地热资源量进行不确定性评估。热储面积依据研究区构造分区进行差异化取值,其余参数经空间插值后提取研究区空间统计边界,确定最大值、最小值及最可能值。由于各参数具有明确的数值边界且样本数量有限,通过蒙特卡罗法结合三角概率分布进行量化分析。其中,热储总厚度、孔隙度、热储岩石密度、热储岩石比热容插值数据分别基于 41 口井的测井解释数据和 28 口井的岩心测试数据,热储温度基于 34 个钻孔的地温梯度,经式(23)计算得到,热储参数取值结果详见表 1。

表 1 关中盆地新近系热储参数
Table 1 Neogene thermal reservoir parameters in Guanzhong Basin

构造单元	面积/km ²	热储总厚度/m	孔隙率/%	热储温度/°C	热储岩石密度/(kg/m ³)	热储岩石比热容/[J/(kg·°C)]
蒲城凸起	6 828	1 045~1 987	20~34	56~71	2 690~2 851	830~870
宝鸡凸起	3 987	490~1 712	16~24	56~79	2 674~2 810	849~860
固市凹陷	3 146	1 293~2 591	22~32	55~84	2 682~2 878	850~900
咸礼凸起	2 683	1 105~2 139	22~33	42~84	2 671~2 825	847~895
临蓝凸起	2 174	832~2 456	14~30	40~72	1 967~2 738	860~877
西安凹陷	2 798	926~2 953	14~34	57~83	1 920~2 761	854~878

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 5),中间浅蓝色表示资源量模拟在(5%,95%)的频率分布,即“置信区间”。研究区地热资源总量有 90%的概率为(69.91~96.87)×10¹⁸ kJ,地热资源量最小值为 56.31×10¹⁸ kJ,最大值为 115.94×10¹⁸ kJ。最有可能的地热资源量为 82.50×10¹⁸ kJ,相当于 28.16×10¹¹ t 标准煤。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。关中盆地新近系热储平均地热资源丰度为 38.40×10¹⁴ kJ/km²,相当于标准煤 13.11×10⁷ t/km²。

通过对不同构造单元地热资源量分析(图 6),蒲城凸起地热资源量最为丰富,平均值为 26.53×10¹⁸ kJ(图 6a),其次为固市凹陷。在 90%的概率区间内,蒲城凸

起的地热资源量为(19.15~34.57)×10¹⁸ kJ,固市凹陷为(11.05~21.13)×10¹⁸ kJ。临蓝凸起平均地热资源量最少,仅为 6.89×10¹⁸ kJ。西安凹陷和固市凹陷地热资源丰度较高,分别为 52.9×10¹⁴、49.6×10¹⁴ kJ/km²;宝鸡凸起地热资源丰度最小,为 21.7×10¹⁴ kJ/km²(图 7)。

3.3 地热资源优势区评价

1)指标权重

采用博弈组合赋权法计算评价指标权重,如图 8 所示。人口密度(占比 31.3%)和 GDP(占比 29.9%)是影响优势区划分的主导因素。热储物性参数如导热系数、热储温度、大地热流、地温梯度、热储厚度及孔隙度的权重差异较小,各指标权重介于 3.1%~4.8%,合计占比约

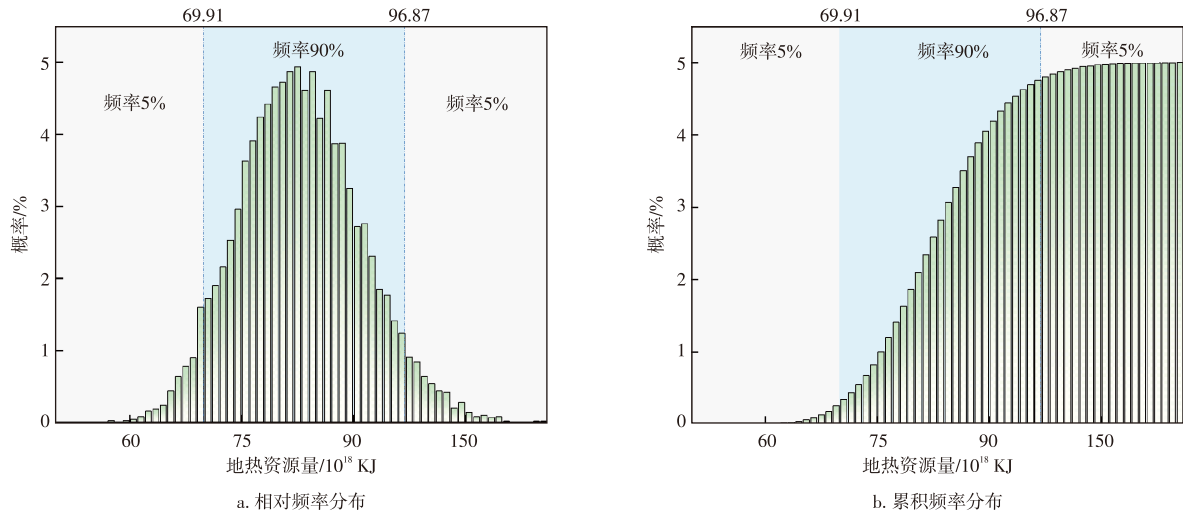


图5 基于蒙特卡罗法的关中盆地热储地热资源量估算结果

Fig. 5 Estimation results of geothermal resources in Guanzhong Basin based on Monte Carlo method

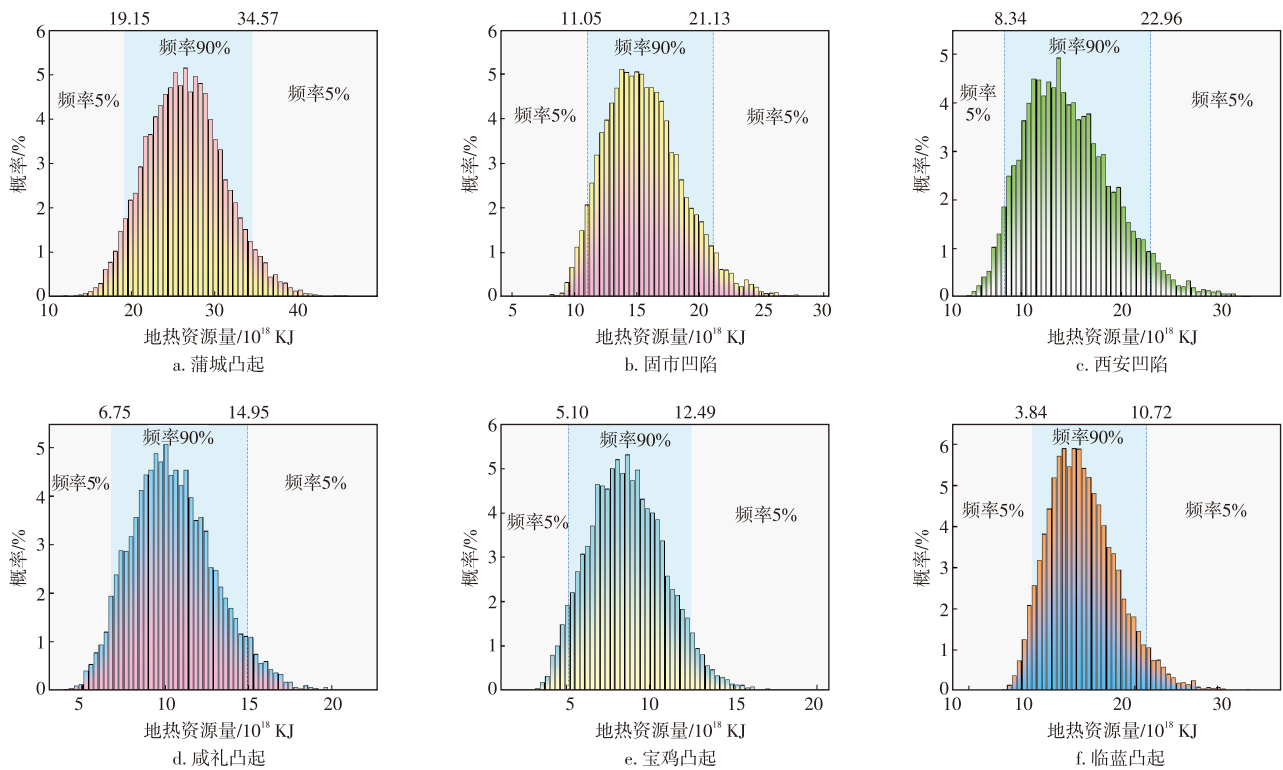


图6 基于蒙特卡罗法地热资源量分区估算结果

Fig. 6 Estimation results of geothermal resources partition based on Monte Carlo method

24.7%,表明地质条件对优势区评价具有基础性贡献,但各因子影响力相对均衡。

2) 指标相关性分析

采用皮尔逊相关系数^[37]对各评价指标进行相关性分析。根据以下计算公式得到评价指标相关性热图(图9):

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \bar{X}}{s_X} \right) \left(\frac{Y_i - \bar{Y}}{s_Y} \right) \quad (24)$$

式中: r 为皮尔逊相关系数, $|r|>0.7$ 为强相关, $0.3<|r|\leq 0.7$

为中等相关, $|r|\leq 0.3$ 为弱相关; n 为样本数量; X_i 为变量 X 的第 i 个观测值; $\bar{X}$ 为变量 X 的样本平均值; Y_i 为变量 Y 的第 i 个观测值; $\bar{Y}$ 为变量 Y 的样本平均值; s_X 为变量 X 样本标准差; s_Y 为变量 Y 样本标准差。

由图9可知,热储温度与多项热储参数具有强正相关性,如热储厚度、渗透率、地温梯度、孔隙度等。热储厚度与渗透率、孔隙度具有很强的正相关性,渗透率与孔隙度、导热系数、热储底板埋深具有很强的正相关性,孔隙度与导热系数、热储底板埋深具有很强的正相关性,导热系数与热储底板埋深具有很强的正相关性。

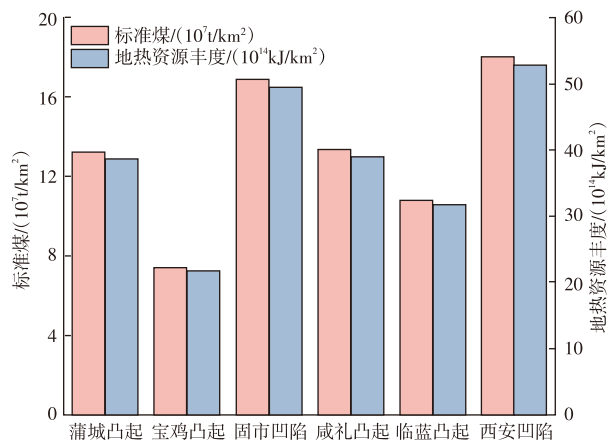


图7 不同构造单元地热资源丰度与标准煤分布

Fig. 7 Geothermal resource abundance and standard coal distribution in different tectonic units

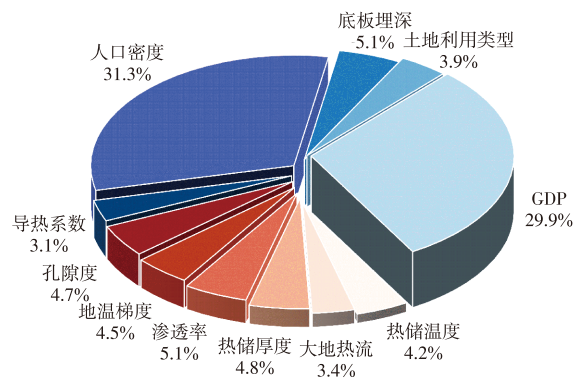


图8 评价指标权重

Fig. 8 Evaluation index weight

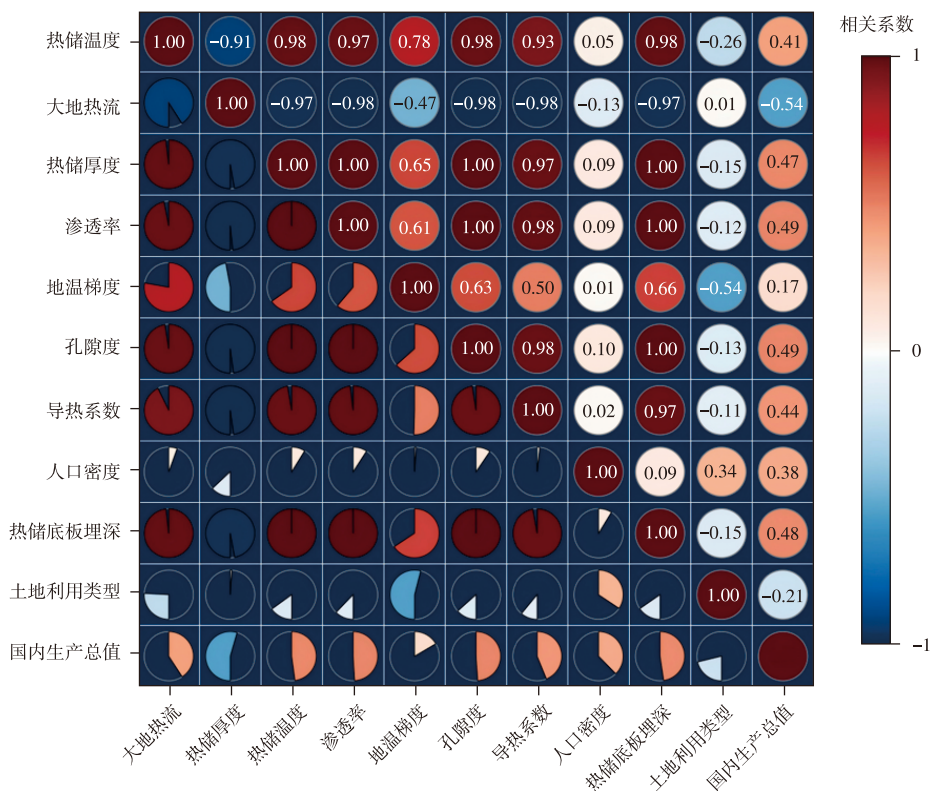


图9 评价指标皮尔逊相关系数热力图

Fig. 9 Evaluation index Pearson correlation coefficient heat map

热储温度与导热系数相关系数为0.93,高导热系数的砂岩储层能够高效汲取热量,使储层热量供给充足,热储温度较高;热储厚度与热储底板埋深相关系数为1,热储厚度越大储存的地热资源越多,储层所处深度增加,底板埋深越大;孔隙度与渗透率相关系数为1,孔隙度高储层蕴藏的地热资源越多,渗透率高地热资源在储层中的传输能力越强,二者构成地热资源储存与运转的有利通道。热储温度与大地热流具有很强的负相关性,大地热流与热储厚度、渗透率、孔隙度等具有很强的负相关性。导热系数高,储层内部地温梯度会较低,地热

资源聚集和储存的能力差,对形成高温的热储不利。

3)优势区评价结果

基于评价指标数据和权重,采用式(4)和GIS空间分析技术对关中盆地砂岩孔隙型地热资源进行优势区计算。采用自然断点法将优势区评价结果划分为好、较好、一般、较差、差5个等级,如图10所示。

由图10可知,关中盆地地热优势区“好”和“较好”区域主要分布在西安凹陷、咸礼凸起、固市凹陷,面积占比分别为48.75%、27.87%、15.88%,上述区域的大地热流值与导热系数,分别为66.72 mW/m²和5.35 W/(m·K),普遍

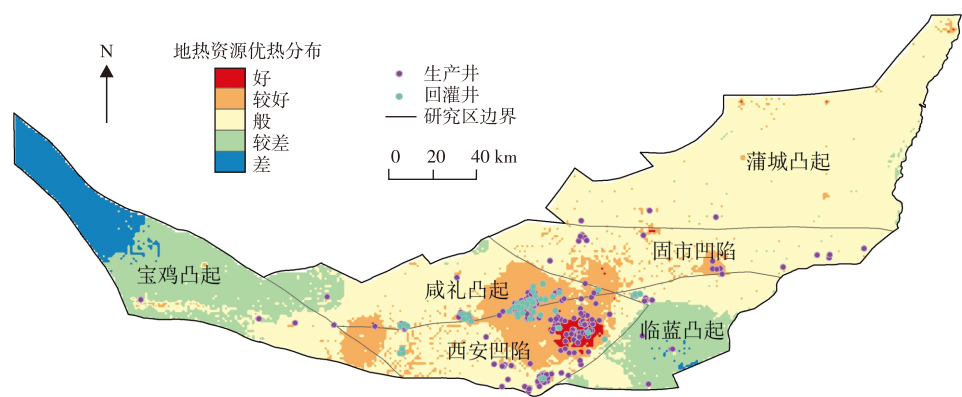


图10 地热资源优势区分区及地热井的空间分布

Fig. 10 The spatial distribution of geothermal resource advantage area and geothermal well

高于研究区的平均水平,具备优良的地热背景条件;同时,这些区域的热储温度与热储底板埋深指标,分别为63.71℃和2 358.08 m,也明显优于研究区的平均参数。

宝鸡凸起76.76%的区域被划分为“较差”和“差”地热开发优势区。因为该地区平均热储厚度仅为1 083.03 m,是研究区厚度最薄的区域,热储温度也处于较低水平(62.15℃)。临蓝凸起的平均热流值(65.83 mW/m²)虽然接近研究区平均值(66.72 mW/m²),但56.60%的区域仍被划分为“较差”和“差”地热开发优势区,这与其热储参数显著低于区域平均水平密切相关。

通过对各项评价指标的分析可知,研究区地热资源开发优势区评价结果受多类指标共同调控。优势区等级为“好”的优质资源区,在空间上集中分布于热储厚度、热储底板埋深和国内生产总值的高值叠加区域;而优势区等级为“差”的劣质资源区,则主要受热储厚度较薄(490~944 m)、渗透率偏低[(57~254)×10⁻³ μm²]、热储底板埋深较浅(840~1 515 m)的影响。热力学参数与区位条件的协同效应是调控研究区地热资源开发优势区的关键。

势区处于中等水平;“较好”及“好”级别占比为13.78%;“较差”和“差”级别占比为22.35%,主要分布在宝鸡凸起和临蓝凸起区域。

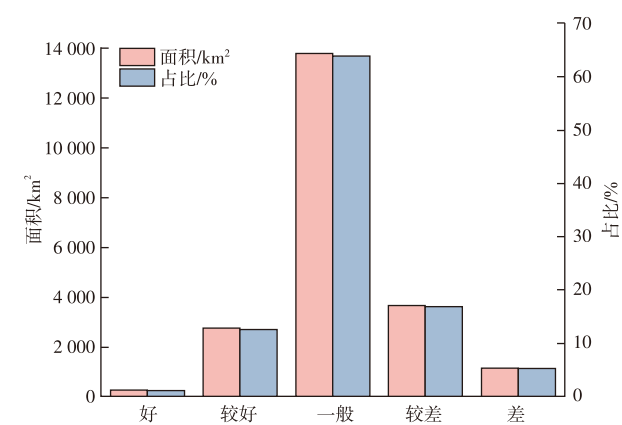


图11 不同地热资源优势区面积分布

Fig. 11 Area distribution of different geothermal resources dominant areas

4)模型准确性评估

为了评价结果的可靠性,基于研究区384眼地热井的实测井口水温开展验证分析。将地热井井口水温的分布划分为(0,45]℃(低温井口水温)、(45,90]℃(中温井口水温)和(90,137]℃(高温井口水温)。基于地热开发优势区评价结果和地热井的空间分布进行匹配,分析不同地热优势区级别的井口水温区间分布特征,如图12所示。

研究区14.58%(56眼)的地热井集中分布在地热资源开发优势区“好”的区域,59.11%(227眼)的地热井分布在地热开发优势区“较好”的区域,24.74%(95眼)的地热井分布在“一般”优势区,1.56%(6眼)的地热井分布在“较差”优势区,“差”区域尚未建设地热井。

高温井口水温井(90~137℃)仅在“好”“较好”“一般”3个优势区分布,且在“好”等级占比最高(37.5%);45~90℃作为中温井口水温区间,在4个优势区等级中

表2 地热优势区结果统计						
Table 2 Statistical table of geothermal advantage area results						
面积占比/%						评价等级
宝鸡凸起	固市凹陷	临蓝凸起	蒲城凸起	西安凹陷	咸礼凸起	
0	0.18	0	0.06	7.57	0.30	好
4.86	15.71	1.01	1.50	41.19	27.50	较好
18.38	83.79	42.38	97.71	50.07	58.73	一般
48.73	0.33	55.32	0.72	1.17	13.40	较差
28.03	0	1.28	0	0	0	差

研究区地热不同优势区统计结果如图11所示。地热资源优势区级别分布整体呈“两端低、中间高”的趋势。优势区“一般”级别占比为63.87%,表明大部分区域的优

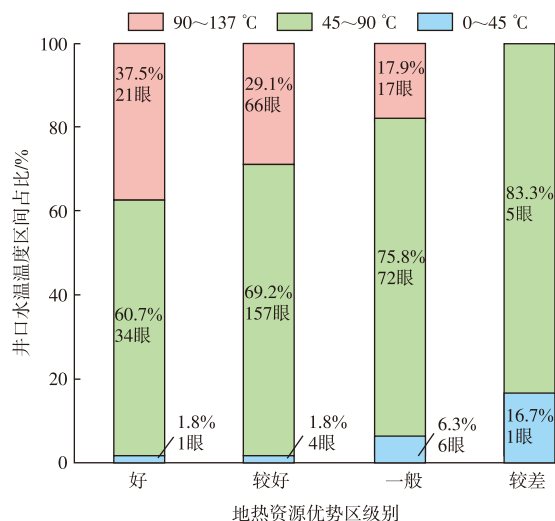


图 12 不同地热优势区级别的井口水温区间分布

Fig. 12 interval distribution of wellhead water temperature under different geothermal dominant area levels

均为占比最高的温度段,在“好”“较好”“一般”等级占比均超过 60%,是研究区地热资源开发利用的核心温度区间,在“较差”等级的占比虽较高,但对应井数仅为 5 眼,占研究区总井数的 1.3%;而在井口水温 0~45 °C 的区间,地热井在优势区“较差”等级的占比最高。本研究提出的方法能够有效识别关中盆地的地热开发利用优势区,可为区域地热资源勘探开发策略的制定提供理论依据。

5) 地热优势区评价的不确定性分析

为检验优势区评价结果的可靠性,基于信息熵^[38]对评价过程中的不确定性进行量化分析。信息熵值越低,表示评价结果的不确定性越小,可信度越高。采用极差归一化方法将各评价单元的优势区评价结果线性映射到 [0, 1] 区间,得到各评价单元的信息熵,计算公式如下:

$$p_{ik} = \frac{x'_{ik}}{\sum_{k=1}^l x'_{ik}} \quad (25)$$

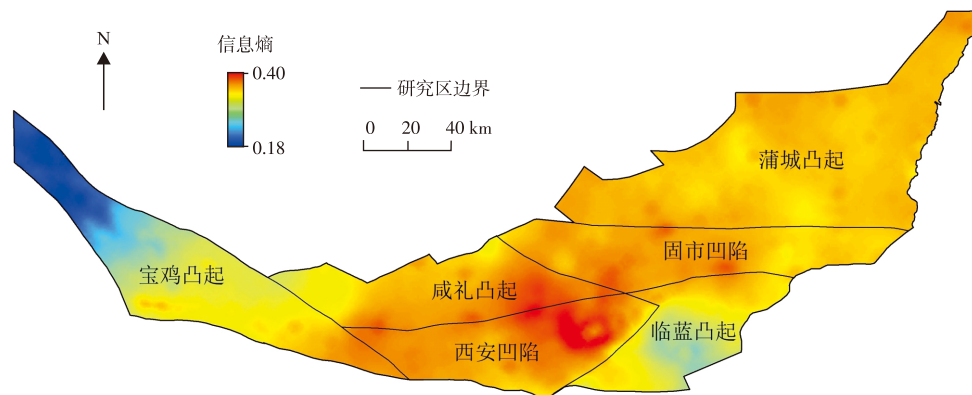


图 13 基于信息熵的评价结果不确定性分析

Fig. 13 Uncertainty analysis of evaluation results based on information entropy

$$H_i = -\frac{1}{\ln k} \sum_{i=1}^k p_{ik} \ln p_{ik} \quad (26)$$

式中: p_{ik} 为评价单元 i 在第 k 种优势区级别上所占的比例; x'_{ik} 为第 i 个评价单元在第 k 种优势区级别上的归一化值; l 为优势区级别数; H_i 为第 k 个优势区级别的信息熵。

研究区地热开发优势区评价的信息熵计算结果如图 13 所示。研究区整体信息熵值介于 0.18~0.40, 整体处于较低水平, 表明优势区评价结果具有较高的稳定性和可靠性。其中, 固市凹陷熵值最低, 仅有 0.18, 说明该区域各评价指标数据一致性较好, 评价结果最为稳定, 优势区划分的可信度最高。临蓝凸起熵值最高, 达到 0.40, 为研究区不确定性最大的区域。结合地质背景分析, 临蓝凸起位于盆地边缘构造过渡带, 地质条件相对复杂, 可能涉及多期构造活动及沉积环境变化, 从而导致热储参数的空间异质性较强, 反映在信息熵上表现为较高的不确定性。但该熵值仍低于 0.5, 未达到显著不稳定水平, 评价结果仍具参考价值。

综上所述, 研究区优势区评价结果整体可信度较高, 其中固市凹陷和咸礼凸起评价结果最为稳定, 临蓝凸起虽存在一定不确定性, 但仍在可接受范围内。后续研究可针对临蓝凸起区域加密采样, 降低评价参数的不确定性, 提升优势区划分的精度。

3.4 综合分析

研究区地热资源潜力较高区域集中于蒲城凸起、固市凹陷及西安凹陷, 三者平均资源总量依次为 26.53×10^{18} 、 15.59×10^{18} 、 14.79×10^{18} kJ, 且西安凹陷与固市凹陷平均资源丰度超过 49×10^{14} kJ/km², 为高值聚集区。在地热开发优势区评价方面, 西安凹陷、咸礼凸起及固市凹陷因地质条件优(储层好、渗透率高)且开发环境佳(人口多、GDP 高、地热需求旺盛), 其优势区“较好”及以上区域占比分别达 48.75%、27.87%、15.88%。其中, 西安凹陷在优势区“好”区域占比最高(7.57%), 显著高于其他构造单

元;固市凹陷“好”等级虽然仅占0.18%,但其较好等级以上占15.88%,仅次于西安凹陷和咸礼凸起,地热资源丰度与西安凹陷基本一致,远高于其他构造单元;而蒲城凸起虽资源潜力大,但面积大(较固市凹陷多3 681.85 km²)、国内生产总值低、需求少,优势区“较好”及以上区域仅占1.01%(97.71%为“一般”)。因此,固市凹陷和西安凹陷为研究区资源高潜力与开发高优势重合区,是地热开发的首选靶区。

4 结论

1)关中盆地新近系热储地热最大概率资源量为 82.5×10^{18} kJ(折合标准煤 28.16×10^{11} t),资源量处于 $(69.91 \sim 96.87) \times 10^{18}$ kJ的概率达90%;研究区平均地热资源丰度为 38.4×10^{14} kJ/km²(相当于 13.11×10^7 t/km²标准煤)。各构造单元中,蒲城凸起的平均地热资源量最大,西安凹陷的平均地热资源丰度最高。

2)地热开发优势区评价指标权重结果表明:人口密度与国内生产总值为关键主导参数;地热开发优势区“较好”及以上等级区域面积为2 978.72 km²(占比13.78%),“差”等级占比仅5.38%,优势区主要集中于西安凹陷、咸礼凸起及固市凹陷;信息熵评价表明评价结果整体可靠(信息熵介于0.18~0.40),固市凹陷结果最稳定(信息熵为0.18),临蓝凸起因地质条件复杂略有波动(信息熵为0.40)。

3)研究区地热开发优势区受热储厚度、底板埋深与国内生产总值多参数耦合控制,优质资源集中分布于三者高值协同区域。综合资源潜力与开发优势评价结果显示,西安凹陷与固市凹陷构造单元地热富集特征最为显著,是关中盆地新近系砂岩热储系统优先部署勘探开发的有利靶区。

4)所采用的地热优势区评价体系涵盖资源禀赋与社会经济双重维度,但未考虑地热流体水化学场对腐蚀结垢风险的影响,热储回灌能力对开采可持续性的约束,以及多井采灌情景下温度场的动态扰动效应。后续应扩展评价指标体系,纳入水化学相容性、回灌效率及热突破时间等开发动力学参数,实现从静态优势区划向动态开发优势区评价。

参考文献

- [1] 李士祥,王东,王子恒,等.深部地下空间开发利用在新能源发展中的地位与作用[J].石油学报,2026,47(1):241-256.
Li Shixiang, Wang Dong, Wang Ziheng, et al. Strategic status and role of deep underground space development and utilization in advancing new energy[J]. Acta Petrolei Sinica, 2026, 47(1): 241-256.
- [2] 王贵玲,刘彦广,朱喜,等.中国地热资源现状及发展趋势[J].地学前缘,2020,27(1):1-9.
Wang Guiling, Liu Yanguang, Zhu Xi, et al. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 1-9.
- [3] 王社教,李峰,闫家泓,等.油田地热资源评价方法及应用[J].石油学报,2020,41(5):553-564.
Wang Shejiao, Li Feng, Yan Jiahong, et al. Evaluation methods and application of geothermal resources in oilfields[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(5): 553-564.
- [4] 孙焕泉,高楠安,吴陈冰洁,等.中深层地热资源勘探开发技术与典型应用[J].地学前缘,2025,32(2):230-241.
Sun Huanquan, Gao Nan'an, Wu Chenbingjie, et al. Medium-deep geothermal exploration and development technology and typical applications[J]. Earth Science Frontiers, 2025, 32(2): 230-241.
- [5] 洪增林,张银龙,周阳.关中盆地南部山前中深层地热资源赋存特征及应用[J].中国地质,2019,46(5):1224-1235.
Hong Zenglin, Zhang Yinlong, Zhou Yang. Research on the modes of occurrence and application of geothermal resources in the middle and deep layers of the piedmont area in southern Guanzhong Basin[J]. Geology in China, 2019, 46(5): 1224-1235.
- [6] 吴陈冰洁,罗璐,高楠安,等.关中盆地西安凹陷新近系砂岩热储特征研究[J].现代地质,2024,38(6):1571-1584.
Wu Chenbingjie, Luo Lu, Gao Nan'an, et al. Study on characteristics of Neogene sandstone geothermal reservoir in Xi'an Sag, Guanzhong Basin[J]. Geoscience, 2024, 38(6): 1571-1584.
- [7] 张莹,任战利,兰华平,等.关中盆地新近系蓝田-灞河组热储层物性及渗流特征研究[J].地质通报,2024,43(5):712-725.
Zhang Ying, Ren Zhanli, Lan Huaping, et al. Physical properties and percolation characteristics of Neogene Lantian-Bahe Formation thermal reservoir in Guanzhong Basin[J]. Geological Bulletin of China, 2024, 43(5): 712-725.
- [8] 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 Xiongan New Area[J]. Earth Science, 2023, 48(3): 1093-1106.
- [9] 张健,董森,王蓓羽,等.陕西关中盆地地热资源及壳幔温度结构的地球物理分析[J].地球科学与环境学报,2021,43(1):150-163.
Zhang Jian, Dong Miao, Wang Beiyu, et al. Geophysical analysis of geothermal resources and temperature structure of crust and upper mantle beneath Guanzhong Basin of Shaanxi, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2021, 43(1): 150-163.
- [10] 陈志明,张绍琦,周彪,等.考虑离散裂缝的非均质裂缝性气藏数值试井新模型[J].天然气工业,2023,43(2):77-86.
Chen Zhiming, Zhang Shaoqi, Zhou Biao, et al. A new numerical well testing model considering discrete fractures for heterogeneous fractured gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(2): 77-86.
- [11] 杨钊,乔春生,陈松.基于蒙特卡罗法的岩体变形模量统计特征及参数权重分析[J].岩土力学,2020,41(S1):271-278.
Yang Zhao, Qiao Chunsheng, Chen Song. Statistical characteristics of rock mass deformation modulus and weight analysis of parameters based on Monte Carlo method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(S1): 271-278.
- [12] 杨峰田,罗霖,雷海飞,等.地热资源评价的蒙特卡罗方法及其在雄县的应用[J].科技促进发展,2020,16(3):307-315.
Yang Fengtian, Luo Ji, Lei Haifei, et al. Application of Monte Carlo simulation in the evaluation of regional geothermal resources[J]. Science & Technology for Development, 2020, 16(3): 307-315.
- [13] 朱兆群,吴复柱,边凯,等.湖南长沙盆地中深层地热地质特征及资源潜力评价[J].油气藏评价与开发,2025,15(5):900-911.
Zhu Zhaoqun, Wu Fuzhu, Bian Kai, et al. Geological characteristics and potential evaluation of medium-deep geothermal resources in

- Changsha Basin, Hunan Province[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(5): 900–911.
- [14] 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.
- [15] Wang Y B, Wang L J, Bai Y, et al. Assessment of geothermal resources in the north Jiangsu Basin, East China, using Monte Carlo simulation[J]. Energies, 2021, 14(2): 259.[LinkOut]
- [16] 李珂欣, 刘植, 闫宝华, 等. 宝鸡地区地热资源分布与开发潜力的多因子综合分析[J]. 宝鸡文理学院学报(自然科学版), 2022, 42(3): 86–92.
- Li Kexin, Liu Zhi, Yan Baohua, et al. A multi-factor comprehensive analysis of the distribution and development potentiality of geothermal resource in Baoji region[J]. Journal of Baoji University of Arts and Sciences (Natural Science Edition), 2022, 42(3): 86–92.
- [17] 周阳, 洪增林, 张卉, 等. 关中盆地浅层地热能赋存规律及资源量估算[J]. 中国地质调查, 2020, 7(2):21–29.
- Zhou Yang, Hong Zenglin, Zhang Hui, et al. Occurrence rules and resource estimation of shallow geothermal energy in Guanzhong Basin [J]. Geological survey of China, 2020, 7(2):21–29.
- [18] Li X, Huang C S, Chen W, et al. GIS model for geothermal advantageous target selection[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 6024.
- [19] Kiavarz M, Jelokhani-Niaraki M. Geothermal prospectivity mapping using GIS-based Ordered Weighted Averaging approach: A case study in Japan's Akita and Iwate provinces[J]. Geothermics, 2017, 70: 295–304.
- [20] He Y X, Ding P P, Tian Z Y, et al. Quantifying the potential uncertainty and development suitability of sandstone porous geothermal reservoirs for urban heating in northwestern Shandong plain, China[J]. Sustainable Cities and Society, 2026, 140: 107258.
- [21] 孔纲强, 常洪林, 王天赐, 等. 区域尺度地埋管地源热泵与能源地下结构开采浅层地热能评价综述[J]. 岩土力学, 2024, 45(5): 1265–1283.
- Kong Gangqiang, Chang Honglin, Wang Tianci, et al. Review on the evaluation of ground-coupled heat pump and energy geostructures to exploit shallow geothermal energy with regional scale[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(5): 1265–1283.
- [22] Li Z, Luo Z J, Wang Y, et al. Suitability evaluation system for the shallow geothermal energy implementation in region by Entropy Weight Method and TOPSIS method[J]. Renewable Energy, 2022, 184: 564–576.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Yalcin M, Kalaycioglu S, Basaran C, et al. Exploration of potential geothermal fields using GIS-based entropy method: A case study of the Sandikli[J]. Renewable Energy, 2024, 237: 121719.
- [26] 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 landfill instability based on set pair-combination weighting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(7): 2129–2139.
- [27] Lai C G, Chen X H, Chen X Y, 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.
- [28] 李俊, 宋松柏, 王贺佳. 基于指标筛选的汛期时间域划分及合理性分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(1):123–134.
- Li Jun, Song Songbai, Wang Hejia. Determining flood season based on index screening and rationality analysis of division results[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(1):123–134.
- [29] 汪顺生, 黄天元, 陈豪, 等. 基于 CRITIC 赋权的模糊综合评判模型在水质评价中的应用[J]. 水电能源科学, 2018, 36(6): 48–51.
- Wang Shunsheng, Huang Tianyuan, Chen Hao, et al. Application of fuzzy comprehensive evaluation model Based CRITIC weighting in water quality evaluation[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(6): 48–51.
- [30] 徐云飞, 程琦, 魏祥平, 等. 变异系数法结合优化神经网络的无人机冬小麦长势监测[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 71–80.
- Xu Yunfei, Cheng Qi, Wei Xiangping, et al. Monitoring of winter wheat growth under UAV using variation coefficient method and optimized neural network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(20): 71–80.
- [31] 金菊良, 刘东平, 周戎星, 等. 基于投影寻踪权重优化的水资源承载力评价模型[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 1–6.
- Jin Juliang, Liu Dongping, Zhou Rongxing, et al. Evaluation model of water resources carrying capacity based on projection pursuit weight optimization[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 1–6.
- [32] 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.
- [33] Turcotte D L, Schubert G. Geodynamics[M]. 2nd Ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2002.
- [34] Chen Y H, Xu C C, Ge Y, 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: 3705–3718.
- [35] Yang J, Huang X. 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] DZ/T 0331—2020 地热资源评价方法及估算规程[S].
- DZ/T 0331—2020 Specification for estimation and evaluation of geothermal resources[S].
- [37] Han T C, Zhang Z D, Wu W W. Fire resistance rating prediction of timber-to-steel connections and design optimization informed by explainable machine learning[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2025, 156: 111127.
- [38] Sobh M, Gabriel G, Christiansen R, et al. Geothermal heat flow mapping of Germany integrating multi-geophysical and geological constraints with uncertainty quantification[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2025, 130(10): e2025JB031541.