

基于熵权法-TOPSIS-灰色关联法的储层综合评价： 以莺歌海盆地黄流组为例

梁玉凯¹, 宋荣彩^{2,3}, 郑华安¹, 张超^{2,3},
梁元⁴, 陈海雯², 郑峰²

1. 中海石油(中国)有限公司海南分公司,海口 570312;
2. 成都理工大学能源学院,成都 610059;
3. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学),成都 610059;
4. 成都理工大学数学地质四川省重点实验室,成都 610059

[摘要] 莺歌海盆地上中新统黄流组是高温高压系统,地层地温梯度超过 $4\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 、压力系数大于 1.6。地热资源潜力丰富,但地热资源评价的相关工作还未开展。通过 9 口钻井、测井录井、生产资料以及最新 7 口井地层测温数据和岩石热物性参数测试,在储层储集性能基础上,结合热物性参数,开展储层综合评价工作。以黄流组为例,在储层六参数关系评价基础上,优选孔隙度(Φ)、渗透率(K)、泥质含量(V_{sh})、地层系数($D\Phi$)、地层温度(T)、生热率(A)、热导率(J) 7 个热储评价指标,采用熵权-TOPSIS-灰色关联方法,对该类型热储进行综合评价。研究认为:7 个评价指标中,孔隙度、渗透率、地层系数的权重占比较大,分别为 21.31%,21.07% 和 20.42%,是主要影响因素。考虑评价参数的正负理想解的欧氏距离和各指标与正负理想解的灰色关联度,开展不同决策偏好情况下的相对贴近度角度来定量评价,结果显示,储层 H1-2、H1-1、H2-2 相对贴近度较高,分别为 0.624,0.606,0.529,储层性质较好,可作为莺歌海盆地黄流组热储层的重点研究对象。

[关键词] 莺歌海盆地;黄流组热储;熵权-TOPSIS-灰色关联方法;热储评价

[分类号] TE1;P618.13

[文献标志码] A

Comprehensive evaluation of reservoirs based on the entropy weight method, TOPSIS, and the gray correlation method: Taking the Huangliu Formation in Yinggehai Basin as an example

LIANG Yukai¹, SONG Rongcai^{2,3}, ZHENG Huaan¹, ZHANG Chao^{2,3},
LIANG Yuan⁴, CHENG Haiwen², ZHENG Feng²

[收稿日期] 2023-06-07。

[基金项目] 中海油海南分公司一般项目(CCL2022HNFN0259);四川省科技计划项目(2023NSFSC0252)。

[第一作者] 梁玉凯(1981—),男,高级工程师,研究方向:采油工艺技术与应用,E-mail:liangyk1@cnoc.com.cn。

[通信作者] 宋荣彩(1975—),女,博士,教授,研究方向:储层地质、地热地质,E-mail:songrongcai06@cdu.edu.cn。

[引用格式] 梁玉凯,宋荣彩,郑华安,等,2024.基于熵权法-TOPSIS-灰色关联法的储层综合评价:以莺歌海盆地黄流组为例[J].成都理工大学学报(自然科学版),51(1):91-101.

Liang Y K, Song R C, Zheng H A, et al., 2024. Comprehensive evaluation of reservoirs based on the entropy weight method, TOPSIS, and the gray correlation method: Taking the Huangliu Formation in Yinggehai Basin as an example [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(1):91-101.

1. CNOOC China Limited, Hainan Branch, Haikou 570312, China;
2. Energy College, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
3. State Key Laboratory of Reservoir Geology and Development Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
4. Sichuan Key Laboratory of Mathematical Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: The Upper Miocene Huangliu Formation in Yinggehai Basin is a high temperature and high pressure system. The geothermal gradient of the formation is more than $4^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, and the pressure coefficient is greater than 1.6. There is a high potential of geothermal resources in the basin, but a geothermal resource evaluation of the area has not yet been carried out. Through nine drilling wells, logging, recording, production data and formation temperature measurement data of the latest seven wells and rock thermophysical parameter tests, a comprehensive evaluation of the reservoir is carried out based on the reservoir storage performance, combined with thermophysical parameters. Taking Huangliu Formation as an example, based on the evaluation of the six-parameter relationship of the reservoir, this paper optimized seven thermal reservoir evaluation indexes porosity, permeability, shale content, formation coefficient, formation temperature, heat generation rate, and thermal conductivity, and adopts entropy weight-TOPSIS-gray correlation method to carry out a comprehensive evaluation of this type of thermal storage. The results show that among the seven evaluation indexes, porosity, permeability and stratigraphic coefficient accounted for a relatively large weighting of 21.31%, 21.07% and 20.42%, respectively, and were the main influencing factors. Considering the Euclidean distance of the positive and negative ideal solutions of the evaluation parameters and the gray correlation degree between each index and the positive and negative ideal solutions, the relative closeness degree under different decision preferences was used to perform a quantitatively evaluate, the results show that the relative closeness of reservoirs H1-2, H1-1, and H2-2 is relatively high, which is 0.624, 0.606, and 0.529, respectively, and the reservoirs have better properties, which can be used as the key research object for the Huangliu Formation thermal reservoirs in the Yinggehai Basin.

Key words: Yinggehai Basin; Huangliu Formation heat reservoir; entropy weight-TOPSIS-grey correlation method; thermal reservoir evaluation

地热能作为一种新型可再生且清洁的能源, 广受关注, 以地热发电为首的多种地热开发利用正迈进新阶段(白奋飞等, 2023; 赵银鑫等, 2023)。长久以来, 人们主要对陆域地热资源进行重点关注, 但对海上的地热研究尚浅(郑灼华, 1989)。莺歌海盆地是一个典型的高温超压盆地, 新近纪黄流组地层地温梯度超过 $4^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 、压力系数大于 1.6。目前, 莺歌海盆地上中新统黄流组的天然气勘探取得了重大突破(谢玉洪等, 2016), 但针对丰富的地热资源, 由于地域条件限制, 其勘探开发与利用还处于起步认知阶段, 对关键参数热储的评价是重要基础工作(谢玉洪等, 2023; 郑峰等, 2023)。储层综合评价研究方法按勘探流程可分为: 归类统概评价法、储层井下(随钻)评价方法、及综合定量评价方法(裴向兵, 2021)。本文以热

储岩性、物性等认识为基础, 结合最新获取 7 口井的地层测温和岩石热物性数据储层热物性参数, 采用熵权-TOPSIS-灰色关联法对莺歌海盆地黄流组热储层进行综合评价, 探索该类海相热储研究的新方法。

1 莺歌海盆地地热地质背景

莺歌海盆地是在南海大陆北缘的前第三纪基底上形成的一个侧向延伸盆地, 是一个富含油气的新生代盆地, 受到太平洋板块俯冲及印藏陆—陆碰撞作用, 是新生代西太平洋最活跃大陆边缘海(郭继东等, 2022), 面积超过 $11 \times 10^4\text{ km}^2$ (图 1-A)。盆地由中央凹陷、莺西斜坡、莺东斜坡等构成, 在中央凹陷深部发育 5 排总体上沿 NW—SE 向呈雁列式排列的流体底辟(郝芳等, 2003),

俗称“中央底辟带”。对莺歌海盆地周围新生代区域构造演化的综合分析表明,该盆地新生代的构造应力场演化受太平洋板块、印度与欧亚板块之间相互作用控制(郭令智等,2001),形成左旋走滑伸展裂陷期、韧性伸展热沉降阶段和加速沉降阶段的演化特点。盆地沉积厚度达上万米,自下而上包括裂陷期始新统、渐新统崖城组 and 陵水组,以及裂后期中新统三亚组、梅山组、黄流组与上新统莺歌海组及第四系更新统乐东组地层(图 1-B)。前人研究已经证明莺歌海盆地内存在热流体活动,储层中含有的大量高温矿物、流体组分分析对

比及古地温测试结果都是热流体活动残留的痕迹和证据。其中,热流体活动尤以盆地中央凹陷底辟构造带内热流体活动较为剧烈(王翠丽等,2015)。莺歌海盆地新生代以来的构造活动强烈,沉积地层较新,地热资源评价的热源、热储、盖层及热通道等要素齐全,具有特色高温高压水热型地热系统,盆地面积大,地温梯度和热流值均较高,宏观的地热指标十分优异(王鑫,2020)。热储是地热资源评价的关键参数,其埋深、温度、物性、岩性、热物性、大地热流值、地温梯度等影响地热资源的整体评价。

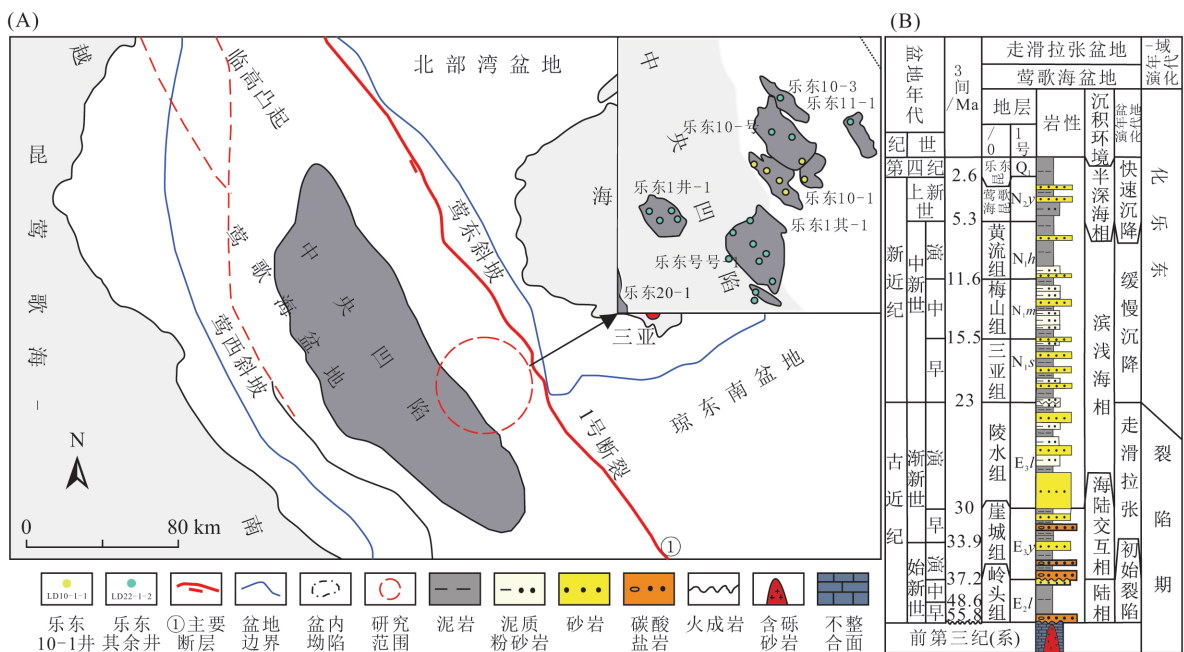


图 1 莺歌海盆地位置及地层柱状图

Fig. 1 Location and stratigraphic histogram of the Yinggehai Basin

(A) 莺歌海盆地地理位置(王鑫,2020);(B) 新近纪—第四纪地层及区域演化简表(冯冲,2013)

2 典型热储特征及六性关系分析

莺歌海盆地黄流组属于上一中新世地层单元,沉积厚度最高可达 664 m。沉积单元类型属于滨海—浅海—半深海相沉积,平面上呈现沿海南岛边缘沉积厚度薄,随着接近盆地中央,沉积厚度增大(许璐,2018)。黄流组岩性多为细砂岩、粉砂岩及泥岩互层,分为黄流组 II 段及 I 段,位于上部的 I 段以粉砂岩与泥岩互层为特征,II 段是以粉—细砂岩夹泥岩薄层为主。黄流组 II 段沉积时,盆地北部的边界南移,西部边界东移,沉积中心往北,以滨海相为主,发育有短源三角洲,向南

为浅海,东北侧滨海相带较窄,发育短源扇三角洲(谢玉洪等,2010)。莺歌海盆地位于欧亚板块、印度—澳大利亚板块和太平洋板块东南边缘的交界处,其特点是频繁的构造运动和多阶段的热演化,盆地连续沉积,温度持续增加。通过对热储生热率、热导率等相关参数分析,可全面认识盆地地温分布及地热资源的潜力特征(胡德攀,2016),为盆地地热开发部署工作提供地质依据。

2.1 岩石热物性测试

2.1.1 生热率

岩石的放射性生热率(A)是指单位时间内单位体积的岩石中放射性元素衰变所释放的能量,

它代表了岩石本身的热值,是岩石热特性的主要参数之一(罗昕等,2020)。通常,盆地油气资源评价时,很少开展针对某一种放射性元素的测定,故一些学者以其他方法计算岩石生热率,常用方法有:一是根据地震数据,利用波速换算生热率,从而得到一个大致范围。然而,地震波速度通常是在无法采样或记录的深层地层中使用的方法,因为它受到许多干扰,并且会引起估算结果值有误、数据质量差的现象。二是利用测井方法直接在钻孔内井壁附近测量岩石自然伽马值或放射性元素能谱,并通过应用经验公式将其转换为岩石放射性生热率。在本文中,除了测定实际值,其他钻井用自然伽马 GR 数据来转换生热率。这种方法比岩心取样更快、更方便,因为测井参数更容易获取。Rybach 等人于 1986 年最早提出提出 GR—A 线性关系(Rybach et al.,1986):

$$A=0.0145[GR(API)-5] \quad (1)$$

其线性相关系数达 0.98,所得岩石生热率误差小于 10%。该公式对沉积岩—火山岩—变质岩等各种岩性均适合,在自然伽马 0~350 API 范围内均有效。

1996 年,Bucker 等人进行了大量的岩心测试,通过最小二乘法对自然伽马值和岩石生热率

之间的关系进行了拟合,并提出了经验公式(Bucker et al.,1996):

$$A=0.0158[GR(API)-0.8] \quad (2)$$

骆森等人根据中国大陆科学钻探项目(CCSSD)主孔的实测数据(骆森等,2008),结合何丽娟等人相关数据,进行分析校正后也提出了关于 GR—A 新的线性关系(He et al.,2001):

$$A=0.0115[GR(API)+9.1] \quad (3)$$

式中:A 为生热率, $\mu\text{W}/\text{m}^3$;GR 为地层自然伽马,API。

截至目前,莺歌海盆地沉积层生热率实测值较少,难以根据实测生热率值和自然伽马测井来直接建立研究区 GR—A 的经验关系。因此,本研究分别收集莺歌海盆地 6 口具有代表性钻孔的自然伽马曲线,每间隔 5 m 取值,分别采用 3 种经验公式计算生热率并与实测结果进行对比。对比结果表明,利用骆森经验关系式计算得到的 5 076 个生热率与本次研究实测生热率,两者平均值和标准差最为接近(表 1),故考虑采用第三种方法来计算莺歌海盆地沉积层岩石放射性生热率。在此基础上,计算东方 13—2 气田热储层岩石放射性生热率,计算结果显示,黄流组一段岩石放射性生热率平均值为 $1.19 \pm 0.098 \mu\text{W}/\text{m}^3$ 。

表 1 利用不同 GR—A 经验关系计算的生热率与实测生热率的对比

Table 1 Comparison of the heat generation rate calculated using different GR—A empirical relationships with the measured heat generation rates

经验关系/实测	Rybach(1986)	Bucker et al.(1996)	骆森(2008)	本次实测及何丽娟(2000)
平均值/ $(\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3})$	1.49	1.69	1.35	1.38
标准差/ $(\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3})$	0.42	0.46	0.33	0.38

2.1.2 热导率

不同岩石的热导率(J)差异较大,以花岗岩和灰岩的导热率最高,砂岩略低,泥岩最低。热传导系数是反映物体热传导性能的重要物理指标(Wang et al.,2023),其表达式为:

$$J=Q\left[\frac{dT}{dz}\right] \quad (4)$$

式中:Q 为热流密度, W/m^2 ;T 为地层温度, $^{\circ}\text{C}$;z 为深度,m。

在实验室中,通过对岩心破碎样品或岩屑应用刻度棒或探针测量热导率。实验室实际操作中,为了准确一般对岩石样品使用探针测量,而井下则是测量热流密度和地温梯度(潘保芝等,1998)。莺歌海盆地原有热导率数据较少,本次研

究除了通过 THB 仪器进行测试,对没有测试的区域采用经验公式进行计算(马峰等,2019),公式如下:

$$J=0.026V_p-0.019POR+3 \quad (5)$$

式中: V_p 为声波速度, m/s ;POR 为孔隙度,%。

2.2 热储六性关系

热储六性关系主要指在储层岩石四性关系基础上,结合岩石热物性,讨论岩石、物性、含油性、电性与生热率、热导率之间的相互关系。莺歌海盆地典型热储段黄流组岩性主要为粉砂岩,测井伽马值较泥岩低,储层岩心覆压孔隙度在 10% 左右,岩心覆压渗透率在 $(0.2 \sim 20) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,密度中子交会“镜像”特征明显,声波时差增大,电阻率最高值达 $30 \Omega\cdot\text{m}$ 。

通过岩性、物性分析(图 2-A~D),可知黄流组渗透率、孔隙度与泥质含量之间并无明显线性关系,但孔隙度较好相关性。储层岩石放射性生热率通过实测和经验公式计算,共同获取了黄流组岩石放射性生热率,从图 2-D 中可看出,在黄流

组段,生热率并不随着深度发生明显改变,位于 $0.7 \sim 1.2 \mu\text{W}/\text{m}^3$ 之间。图 2-E 中可知,热导率与深度之间也无明显的相关性,且泥岩热导率集中于 $1.6 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$,砂岩热导率集中于 $2 \sim 2.4 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$,略大于泥岩。

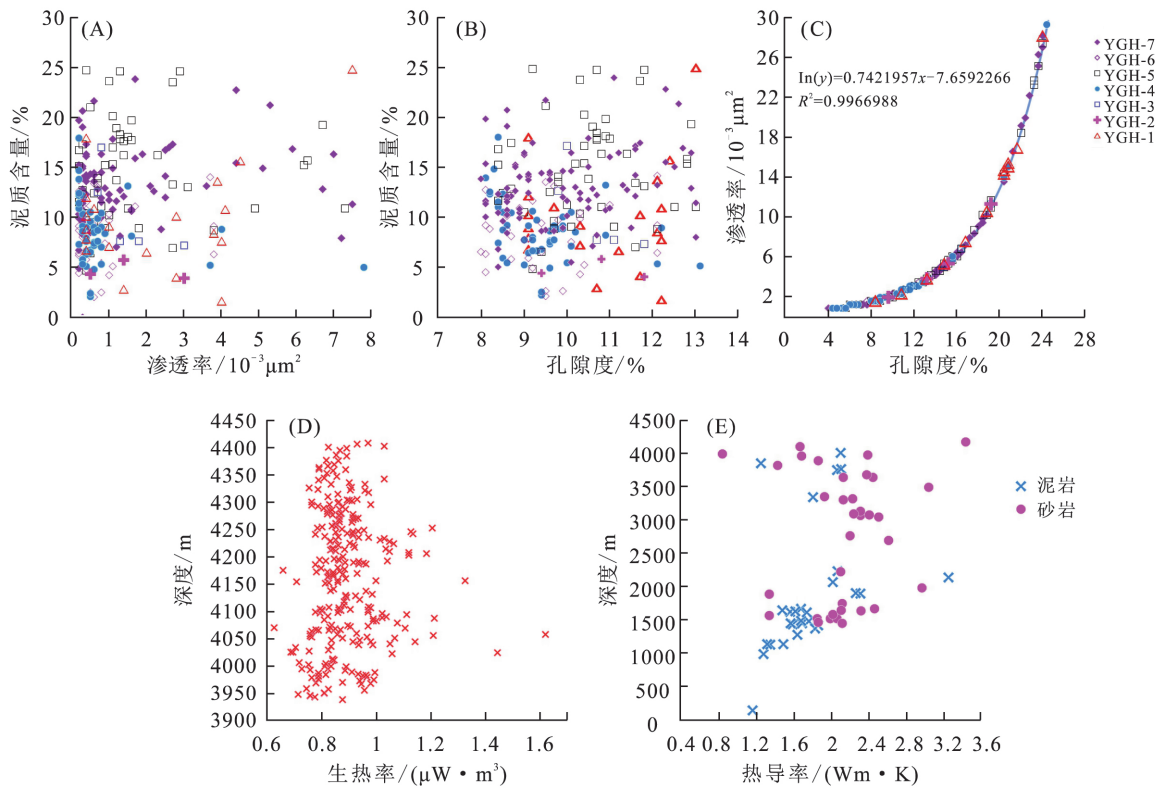


图 2 物性参数交会图及热物性参数随深度变化图

Fig. 2 Physical parameter rendezvous plot and thermal physical parameter variation with depth
(A) 泥质含量与渗透率交会图; (B) 泥质含量与孔隙度交会图; (C) 孔-渗交会图;
(D) 岩石生热率随深度变化图; (E) 热导率随深度变化图

3 热储层综合评价

3.1 热储综合评价参数确定

在油气行业常规储层评价基础上,将重要表征热属性参数放入评价体系中形成热储综合评价体系。结合以上六性关系分析,用孔隙度(Φ)、渗透率(K)、泥质含量(V_{sh})、地层系数($D\Phi$)、地层温度(T)、生热率(A)、热导率(J)7 个参数对储层进行综合评价研究。

3.2 评价方法确定

地热资源的预测效果和可靠性取决于模型的参数选择(Limberger et al., 2018),地热资源的量化评估要综合考虑多种因素,其中既有定性定

类的参数,也有定量的(郑建东等,2021)。由于各参数间的关系错综复杂,因此,综合评价方法和指标赋权是储层综合评价的两个关键环节。目前主流方法多种多样,例如赋权方法就包含三类:主观赋权法、客观赋权法、主客观综合赋权法。此外,综合评价方法包含灰色关联法、主成分分析法、层次分析法以及模糊综合评判法和人工神经网络评价法等(高俊,2016),这些方法均可量化地评价储层,但各有其局限性和应用领域。熵权法、TOPSIS 法和灰色关联法三者相结合是多目标决策和评价的经典方法,三者各有其重要作用:熵权法可以客观有效的反应评价指标的信息;TOPSIS 法通过计算可以评价对象与理想解的距离(欧氏距

离),对原有的数据进行信息的充分提取,最终实现综合评价排序;灰色关联分析可有效衡量评价对象之间的相似度与关联度(宁连举等,2021)。3个方法相结合,可有效减少传统 TOPSIS 方法在确定指标的权重因子时主观因素的影响,体现方法的客观性(郭莉等,2022)。

3.2.1 熵权法确定指标权重

熵权法是一种客观赋权法,直接根据评价指标值确定指标权重。通常当指标的信息熵较小时,说明指标的变动程度相对较大,包含着更大的信息量,能够在评价过程中起到更大的作用,此时该指标将赋予较大的权重;反之,某指标的信息熵比较大的时候,则应该赋予其比较小的权重。计算指标 j 熵值 e_j 公式如下:

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (6)$$

$$p_{ij} = z_{ij} / \sum_{i=1}^m z_{ij} \quad (7)$$

式中: p_{ij} 为第 j 个评价指标下第 i 个评价方案的比重; Z_{ij} 为第 j 个评价指标下第 i 个评价方案; m 为样本数量。

由于 d_j (第 j 项指标评价数据的分散程度)表示为 $d_j = 1 - e_j$,因此通过熵权法得到的第 j 项指标的权重 w_j 为:

$$w_j = d_j / \sum_{j=1}^m d_j = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^m (1 - e_j) \quad (8)$$

式中: w_j 为通过熵权法得到的第 j 项指标的权重, $w_j = (w_1, w_2, \dots, w_n)$,满足 $\sum_{j=1}^m w_j = 1, w_j \geq 0, j \in N$; d_j 为第 j 项指标评价数据的分散程度; e_j 为指标 j 熵值。

3.2.2 TOPSIS 法计算正负理想解的欧式距离

(1)建立加权规范化矩阵。结合熵权法获得的权重 w_j ,将原始评价矩阵进行规范化后,同 w_j 相乘即可获得加权规范化矩阵 W :

$$W = (w_j z_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} w_1 z_{11} & w_2 z_{12} & \dots & w_n z_{1n} \\ w_2 z_{21} & w_2 z_{22} & \dots & w_n z_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_3 z_{31} & w_3 z_{32} & \dots & w_n z_{3n} \end{bmatrix} \quad (9)$$

(2)确定正负理想解 y_j^+, y_j^- 。

$$y_j^+ = \text{第 } j \text{ 列最优的 } y_{ij}, j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$$y_j^- = \text{第 } j \text{ 列最差的 } y_{ij}, j = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

(3)计算正负理想解的欧式距离 D_i^+, D_i^- 。

$$D_i^+ = \left(\sum_{j=1}^m (y_{ij} - y_j^+)^2 \right)^{1/2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

$$D_i^- = \left(\sum_{j=1}^m (y_{ij} - y_j^-)^2 \right)^{1/2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

3.2.3 灰色关联法分析确定灰色关联度

灰色关联分析是在模糊数学的基础上发展起来的一种定量方法,灰色关联法可以通过结合数据处理中不完全的定量和定性指标来量化系统的动态演变。该分析方法定量地描述和比较了热储评价系统参数的变化趋势,为灰色系统分析中的预测和决策提供了依据。灰色关联分析法包括母、子序列的选定、原始数据变换、关联系数和关联度的计算等(宋子齐等,1996;涂乙等,2012)。

在加权规范矩阵 W 的基础上,计算第 i 个地层与正负理想解 Y^+, Y^- 关于第 j 个评价指标的灰色关联系数:

$$g_{ij}^+ = \frac{\min_i \min_j |y_j^+ - y_{ij}| + \epsilon \max_i \max_j |y_j^+ - y_{ij}|}{\max_i |y_j^+ - y_{ij}| + \epsilon \min_i \max_j |y_j^+ - y_{ij}|}, \quad (i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, m) \quad (14)$$

$$g_{ij}^- = \frac{\min_i \min_j |y_j^- - y_{ij}| + \epsilon \max_i \max_j |y_j^- - y_{ij}|}{\max_i |y_j^- - y_{ij}| + \epsilon \min_i \max_j |y_j^- - y_{ij}|}, \quad (i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, m) \quad (15)$$

其中: $\epsilon \in (0, 1)$ 为分辨系数,此处取 0.5。则灰色关联度 G_i^+, G_i^- :

$$G_i^+ = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m g_{ij}^+ \quad (16)$$

$$G_i^- = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m g_{ij}^- \quad (17)$$

3.2.4 TOPSIS—灰色关联法确定相对贴近度

(1)通过 TOPSIS 法及灰色关联法分别获取欧式距离 D_i^+, D_i^- 及灰色关联度 G_i^+, G_i^- ,对其进行无量纲化处理,分别得到 $d_i^+, d_i^-, j_i^+, j_i^-$:

$$d_i^+ = \frac{D_i^+}{\max D_i^+} \quad (18)$$

$$d_i^- = \frac{D_i^-}{\max D_i^-} \quad (19)$$

$$j_i^+ = \frac{G_i^+}{\max G_i^+} \quad (20)$$

$$j_i^- = \frac{G_i^-}{\max G_i^-} \quad (21)$$

(2)将上述计算所得的无量纲化加权欧式距离和灰色关联度结合公式(20~21),根据公式(22)计算相对贴近度:

$$S_i^+ = \alpha d_i^- + \beta j_i^+ \quad (22)$$

$$S_i^- = \alpha d_i^+ + \beta j_i^- \quad (23)$$

$$A_i^+ = \frac{S_i^+}{S_i^+ + S_i^-} \quad (24)$$

其中: α 和 β 是偏好度, $\alpha + \beta = 1, \alpha, \beta \in [0, 1], i = 1, 2, \dots, m$ 。该数据由决策者自行决定, S_i^+, S_i^- 分别反应与理想方案的贴近程度及远离程度,待评价项目离正理想解越近则 d_i^-, j_i^+ 越大,反正项目越远离正理想解越远则 d_i^+, j_i^- 越大。最终通过计算获得 A_i^+ ,即相对贴近度,根据相对贴近度的大小对方案进行排序,贴近度数值越大,则说明方案越优,反之亦然。

本文进行储层评价时,并没有直接采用灰色关联度进行处理及评价,而是首先采用 TOPSIS 对原有的数据进行信息的充分提取,计算出正负理想解及评价对象与理想解的距离。在此基础上,采用灰色关联法计算每一个方案与正负理想解的灰色关联度,再将理想解距离、灰色关联度相

结合,求各个方案的相对贴近度,最终确定热储层评价。该方法首先可以避免传统 TOPSIS 法不能充分挖掘数据的相似性信息的缺点,其次将欧氏距离和灰色关联度有机结合,构造了一种新的相对贴近度以实现对方案的评价。新贴近度同时反映了方案与理想方案和负理想方案之间的位置关系和数据曲线的相似性差异,使得物理含义更加明确。

3.3 莺歌海盆地黄流组热储综合评价

本文采用熵权-TOPSIS-灰色关联法对莺歌海盆地黄流组储层进行分类评价。在最新获取地层测温数据和岩石热物性进行整理分析的基础上,共选取莺歌海盆地 9 口井的相关数据作为评价参数数据。在各评价参数中,泥质含量为负向指标,除此之外均为正向指标。因此,对泥质含量数据进行正向化处理之后,在对整体数据进行标准化处理,以消除量纲不同对数据分析带来的影响,标准化矩阵见表 2。

采用熵权法计算各评价参数权重,各评价参数权重结果见表 3。

表 2 黄流组储层评价指标参数规范化处理数据表
Table 2 Huangliu Formation reservoir evaluation index parameter data table

储层	地层温度	泥质含量	孔隙度	渗透率	地层系数	热导率	生热率
H1-4	0.3990	0.3399	0.3314	0.1775	0.2105	0.3657	0.3691
H2-1	0.3659	0.3558	0.2813	0.0950	0.0768	0.3697	0.3813
H2-2	0.3798	0.0670	0.3139	0.2671	0.5295	0.3670	0.3651
H2-3	0.3741	0.0000	0.2909	0.0974	0.0878	0.3684	0.3570
H2-4	0.3857	0.1616	0.2645	0.0457	0.0494	0.3710	0.3610
H2-5	0.3807	0.3231	0.2682	0.0401	0.0450	0.3710	0.3529
H1-1	0.2551	0.2578	0.4750	0.7001	0.6557	0.3039	0.3164
H1-2	0.2531	0.7459	0.5102	0.6204	0.4767	0.3026	0.3205

表 3 黄流组储层评价指标权重
Table 3 Huangliu Formation reservoir evaluation index weights

储层参数	信息熵值 e	信息效用值 d	权重/%
地层温度	0.867	0.133	9.216
孔隙度	0.691	0.309	21.305
渗透率	0.695	0.305	21.074
地层系数	0.704	0.296	20.423
热导率	0.869	0.131	9.012
生热率	0.877	0.123	8.483
泥质含量	0.848	0.152	10.487

熵权法的权重计算结果显示,地层温度的权重为 9.216%、孔隙度的权重为 21.305%、渗透率的权重为 21.074%、地层系数的权重为 20.423%、热导率的权重为 9.012%、生热率的权重为 8.483%、泥质含量的权重为 10.487%,其中指标权重最大值为孔隙度(21.305%),最小值为

生热率(8.483%)。结合熵权法,根据公式(7)即可获得加权规范化矩阵(表 4)。

据公式(10~11)加权规范化矩阵选取出各个指标的正负理想解 y_j^+, y_j^- , 基于公式(12~13), 计算得到各指标评价结果与正负理想解的欧氏距离 D_i^+, D_i^- , 结果如表 5 所示。

表 4 黄流组储层评价指标加权数据表

Table 4 Huangliu Formation reservoir evaluation index weighted data table

储层	地层温度	泥质含量	孔隙度	渗透率	地层系数	热导率	生热率
H1-4	0.0368	0.0356	0.0706	0.0374	0.0430	0.0330	0.0313
H2-1	0.0337	0.0373	0.0599	0.0200	0.0157	0.0333	0.0323
H2-2	0.0350	0.0070	0.0669	0.0563	0.1081	0.0331	0.0310
H2-3	0.0345	0.0000	0.0620	0.0205	0.0179	0.0332	0.0303
H2-4	0.0355	0.0169	0.0564	0.0096	0.0101	0.0334	0.0306
H2-5	0.0351	0.0339	0.0571	0.0084	0.0092	0.0334	0.0299
H1-1	0.0235	0.0270	0.1012	0.1475	0.1339	0.0274	0.0268
H1-2	0.0233	0.0782	0.1087	0.1307	0.0974	0.0273	0.0272

表 5 黄流组储层评价指标正负理想解的欧氏距离

Table 5 Euclidean distance between the positive and negative ideal solutions of the reservoir evaluation index for the Huangliu Formation

索引值	正理想解距离 D_i^+	负理想解距离 D_i^-
H1-4	0.6230	0.5352
H2-1	0.7609	0.5032
H2-2	0.5740	0.6000
H2-3	0.8011	0.4298
H2-4	0.8336	0.4594
H2-5	0.8205	0.4550
H1-1	0.5570	0.7641
H1-2	0.6230	0.5352

根据公式(14~17), 计算得出各指标与正负理想解的灰色关联度, 结果如表 6 所示。

根据公式(18~21), 对加权欧式距离和灰色关联度进行采用进行标准化处理, 得到 $d_i^+, d_i^-, j_i^+, j_i^-$, 结果如表 7 所示。

由于决策者偏好程度 α, β 不同, 故分 3 种情况讨论, 根据公式(22~24), 计算出各情况下 H1-4, H2-1, H2-2, H2-3, H2-4, H2-5, H1-1, H1-2 与理想方案的相对贴进度, 结果见表 8。

将上述 3 种情况计算得出的相对贴进度绘制成雷达图进行对比, 如图 3 所示。并对 3 种情况取平均值获得热储层平均相对贴进度, 进行最终热储层评价(表 9)。

表 6 各指标与正负理想解的灰色关联度

Table 6 Grey correlation degree between each index and the positive and negative ideal solutions

评价项	H1-4	H2-1	H2-2	H2-3	H2-4	H2-5	H1-1	H1-2
正理想解灰色关联度	0.658	0.568	0.687	0.476	0.492	0.527	0.827	0.887
负理想解灰色关联度	0.629	0.747	0.586	0.836	0.822	0.767	0.492	0.479

表 7 标准化处理

Table 7 Standardized processing

评价项	H1-4	H2-1	H2-2	H2-3	H2-4	H2-5	H1-1	H1-2
d_i^+	0.065	0.080	0.060	0.084	0.087	0.086	0.058	0.055
d_i^-	0.033	0.031	0.037	0.026	0.028	0.028	0.047	0.047
j_i^+	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.004	0.004
j_i^-	0.126	0.149	0.117	0.167	0.164	0.153	0.098	0.096

表 8 不同偏好度组合下的相对贴近度
Table 8 Relative closeness under the different preference combinations

偏好度 ($\alpha+\beta=1$)	H1 IV	H2 I	H2 II	H2 III	H2 IV	H2 V	H1 I	H1 II
$\alpha=0.5, \beta=0.5$	0.490	0.418	0.529	0.359	0.368	0.385	0.606	0.624
$\alpha=0.2, \beta=0.8$	0.494	0.418	0.526	0.353	0.364	0.390	0.610	0.631
$\alpha=0.8, \beta=0.2$	0.486	0.419	0.531	0.365	0.373	0.380	0.602	0.617

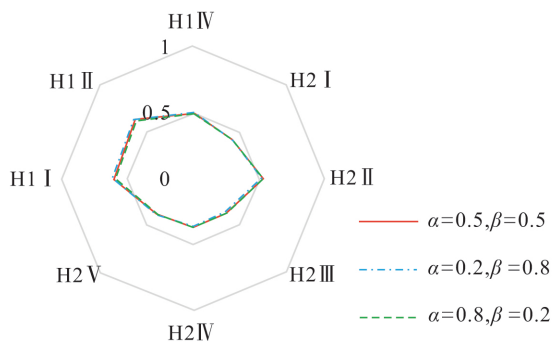


图 3 不同决策偏好情况下的相对贴近度
Fig. 3 Relative closeness under the different decision preferences

表 9 黄流组储层综合定量评价
Table 9 Comprehensive quantitative evaluation table for the Huangliu Formation reservoir

热储层	平均相对贴近度
H1-2	0.624
H1-1	0.606
H2-2	0.529
H1-4	0.490
H2-1	0.418
H2-5	0.385
H2-4	0.368
H2-3	0.359

综合定量分析莺歌海盆地黄流组内 H1-2 是最优的热储层, H1-1, H2-2 热储性质评价较好, 可作为未来莺歌海盆地黄流组热储层的重点研究对象。

4 结论

基于钻井、测井录井、生产资料以及地层测温数据和岩石热物性参数测试, 构建了热储层评价指标体系, 在莺歌海盆地黄流组开展了储层综合评价工作, 主要结论如下:

a. 选取了孔隙度 (Φ)、渗透率 (K)、泥质含量 (V_{sh})、地层系数 ($D\Phi$)、地层温度 (T)、生热率 (A)、热导率 (J) 7 个参数作为黄流组热储定量评

价的指标。运用熵权法计算权重后发现, 孔隙度、渗透率和地层系数是具有关键影响的因素, 其权重分别为 21.31%, 21.07% 和 20.42%。

b. 通过采用熵权-TOPSIS-灰色关联法对莺歌海盆地黄流组热储进行储层综合定量评价, 得出如下结果: H1-2 的热储评价表现最好, 而 H1-1 和 H2-2 的热储评价较好。因此, 可将 H1-2、H1-1 和 H2-2 作为未来研究黄流组热储层的重点对象。

c. 尽管莺歌海盆地地热资源丰富且油气田资料完善, 但目前该地区的热物性相关数据相对较少且地热资源评价等相关工作仍处于起步阶段。因此, 在后续研究中仍需要对莺歌海盆地热储层的评价工作进一步研究。

[参 考 文 献]

白奋飞, 魏登峰, 韩伟, 等, 2023. 鄂尔多斯盆地延长油气区地热资源赋存特征及开发利用建议[J]. 西北地质, 56(6): 329-339.

Bai F F, Wei D F, Han W, *et al.*, 2023. Occurrence Characteristics and Exploitation of Geothermal Resources in Yanchang Oil and Gas Area of Ordos Basin[J]. Northwestern Geology, 56(6): 329-339. (in Chinese)

冯冲, 黄志龙, 童传新, 等, 2013. 莺歌海盆地地层压力演化特征及其与天然气运聚成藏的关系[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 43(5): 1341-1350.

Feng C, Huang Z L, Tong C X, *et al.*, 2013. Overpressure evolution and its relationship with migration and accumulation of gas in Yinggehai basin[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 43(5): 1341-1350. (in Chinese)

高俊, 2016. 史深 100 沙二 10 储层综合评价研究[D]. 北京: 中国石油大学.

Gao J, 2016. Reservoir Comprehensive Evaluation on Sha-er-10 Reservoir[D]. Beijing: China University of Petroleum. (in Chinese)

郭继东, 郑可晗, 张晶, 等, 2022. 基于主成分分析的学习效果因素调查分析研究[J]. 机电工程技术, 51(5):

- 165—169.
- Guo J D, Zheng K H, Zhang J, *et al.*, 2022. Investigation and analysis of learning effect factors based on principal component analysis [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 51(5): 165—169. (in Chinese)
- 郭莉,董军,陈正鹏,等,2022. 基于熵权-TOPSIS-灰色关联法的能源大数据增值服务商业模式评价研究[J]. *科技管理研究*(4): 73—80.
- Guo L, Dong J, Cheng Z P, *et al.*, 2022. Business Model evaluation of energy big data value-added services based on entropy weight-TOPSIS-grey correlation method[J]. *Science and Technology Management Research*, (4): 73—80. (in Chinese)
- 郭令智,钟志洪,王良书,等,2001. 莺歌海盆地周边区域构造演化[J]. *高校地质学报*, 7(1): 1—12.
- Guo L Z, Zhong Z H, Wang L S, *et al.*, 2001. Regional tectonic evolution around Yinggehai basin of South China Sea[J]. *Geological Journal of China Universities*, 7(1): 1—12. (in Chinese)
- 郝芳,董伟良,邹华耀,等,2003. 莺歌海盆地汇聚型超压流体流动及天然气晚期快速成藏[J]. *石油学报*, 24(6): 7—12.
- Hao F, Dong W L, Zhou H Y, *et al.*, 2003. Overpressure fluid flow and rapid accumulation of natural gas in Yinggehai Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 24(6): 7—12. (in Chinese)
- 胡德攀,2016. 油气储层中地热能评价方法研究——以碎屑岩储层为例[D]. 成都:成都理工大学档案馆.
- Hu D P, 2016. The Study of Evaluation Methods for Geothermal Energy in Hydrocarbon Reservoir—Take Clastic Reservoir as Example[D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 罗昕,朱传庆,张宝收,等,2020. 利用自然伽马测井估算塔里木盆地沉积层生热率[J]. *地质学报*, 94(7): 2078—2088.
- Luo X, Zhu C Q, Zhang B S, *et al.*, 2020. Heat production rate calculation using gamma-ray logging of the sedimentary formation in the Tarim basin, Northwest China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 2078—2088. (in Chinese)
- 骆森,潘和平,赵永刚,等,2008. 中国大陆科学钻探主孔自然放射性测井及其解释[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 33(5): 661—671.
- Luo M, Pan H P, Zhao Y G, *et al.*, 2008. Natural radioactivity logs and interpretation from the CCSJ main hole[J]. *Earth Science*, 33(5): 661—671. (in Chinese)
- 马峰,王贵玲,孙占学,等,2019. 利用测井资料获取松辽盆地深部热物性参数[J]. *地球学报*, 2019, 40(2): 350—360.
- Ma F, Wang G L, Sun Z X, *et al.*, 2019. An analysis of thermal conductivity in Songliao Basin Based on logging parameters[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 40(2): 350—360. (in Chinese)
- 宁连举,肖玉贤,刘经涛,等,2021. 跨行政区域创新策源能力评价与实证——基于熵权法、TOPSIS法、灰色关联分析[J]. *科技管理研究*, 41(20): 44—51.
- Ning L J, Xiao Y X, Liu J T, *et al.*, 2021. Evaluation and demonstration on the creatonal and original innovation capacity of cross-administrative area: Based on the entropy weight method, TOPSIS Method, and gray correlation analysis[J]. *Science and Technology Management Research*, 41(20): 44—51. (in Chinese)
- 潘保芝,李舟波,景建恩,1998. 大陆科学钻孔中的热测井及热参数计算[J]. *国外地质勘探技术*, (5): 26—30.
- Pan B Z, Li Z B, Jing J N, 1998. Thermal logging and thermal parameter calculation in continental scientific boreholes[J]. *Foreign Geoexploration Technology*, (5): 26—30. (in Chinese)
- 裴向兵,2021. 储层综合分类评价研究思路与方法[J]. *西部探矿工程*, 33(10): 41—44.
- Pei X B, 2021. Research ideas and methods for comprehensive reservoir classification and evaluation[J]. *West-China Exploration Engineering*, 33(10): 41—44. (in Chinese)
- 宋子齐,谭成仟,曲政,1996. 利用灰色理论精细评价油气储层的方法[J]. *石油学报*, 17(1): 25—31.
- Song Z Q, Tan C Q, Qu Z, 1996. Utilizing exact grey theory to evaluate oil and gas formation[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 17(1): 25—31. (in Chinese)
- 涂乙,谢传礼,刘超,等,2012. 灰色关联分析法在青东凹陷储层评价中的应用[J]. *天然气地球科学*, 23(2): 381—386.
- Tu Y, Xie C L, Liu C, *et al.*, 2012. Application of grey correlation analysis method in reservoir evaluation of Qingdong Sag[J]. *Natural Gas Geoscience*, 23(2): 381—386. (in Chinese)
- 王翠丽,周文,谢玉洪,等,2015. 莺歌海盆地泥底辟带高温热事件与储层成岩作用[J]. *地质科技情报*, 34(4): 35—42.
- Wang C L, Zhou W, Xie Y H, *et al.*, 2015. High-temperature thermal events and diagenesis of the reservoir of

- the diapiric structure zone in Yinggehai Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 34(4):35-42. (in Chinese)
- 王鑫,2020. 海洋油气资源勘探与开发技术[J]. 化学工程与装备,(10):110-111.
- Wang X,2020. Offshore oil and gas resources exploration and development technology[J]. Chemical Engineering & Equipment,(10):110-111. (in Chinese)
- 谢玉洪,范彩伟,2010. 莺歌海盆地东方区黄流组储层成因新认识[J]. 中国海上油气,22(6):355-359.
- Xie Y H,Fan C W,2010. Some new knowledge about the origin of Huangliu Formation reservoirs in Dongfang area Yinggehai basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 22(6):355-359. (in Chinese)
- 谢玉洪,童传新,裴健翔,等,2016. 莺歌海盆地黄流组二段碎屑铝石年龄与储层物源分析[J]. 大地构造与成矿学,40(3):517-530.
- Xie Y H,Tong C X,Pei J X,*et al.*,2016. Detrital zircon ages and reservoir source of the second member of the Huangliu Formation in the Yinggehai Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia,40(3):517-530. (in Chinese)
- 谢玉洪,郑华安,梁玉凯,等,2023. 南海盆地地热地质条件和资源形成因素[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),50(6):647-660.
- Xie Y H,Zheng H A,Liang Y K,*et al.*,2023. Geothermal geological conditions and resource formation factors in the South China Sea Basin [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science& Technology Edition),50(6):647-660. (in Chinese)
- 许璐,2018. 莺歌海盆地东方 X 区黄流组 I 段浅海海底扇精细表征及主控因素研究[D]. 西安:西安石油大学档案馆.
- Xu L,2018. Characterization and Main Controlling Factors of Submarine Fan of 1st Member of Huangliu Formation in Dongfang X area, Yinggehai Basin[D]. Xi'an: The Archive of Xi'an Shiyu University. (in Chinese)
- 赵银鑫,公亮,吉卫波,等,2023. 宁夏银川市浅层地温能赋存条件和开发利用潜力评价[J]. 西北地质,56(5):172-184.
- Zhao Y X,Gong L, Ji W B,*et al.*,2023. Conditions for the Occurrence and Development and Utilization Potential Evaluation of Shallow Geothermal Energy in Yinchuan City, Ningxia [J]. Northwestern Geology, 56(5):172-184. (in Chinese)
- 郑峰,宋荣彩,董贵宇,等,2023. 莺歌海盆地现今地温场及热结构研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),50(6):661-672.
- Zheng F, Song R C, Dong G Y, *et al.*, 2023. Study on present geothermal field and thermal structure in Yinggehai Basin [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science& Technology Edition), 50(6):661-672. (in Chinese)
- 郑建东,王春燕,章华兵,等,2021. 松辽盆地古龙页岩油储层七性参数和富集层测井评价方法[J]. 大庆石油地质与开发,40(5):87-97.
- Zheng J D,Wang C Y,Zhang H B,*et al.*,2021. Logging evaluating methods of seven property parameters and enriched layers for Gulong shale oil reservoir in Songliao Basin[J] Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing,40(5):87-97. (in Chinese)
- 郑灼华,1989. 浅谈“地热储量计算与评价”[C]//中国能源研究会专业委员会. 第三次全国地热学术会议论文集. 北京:北京科学技术出版社,43-48.
- Zheng Z H,1989. A Brief Discussion on “Calculation and Evaluation of Geothermal Reserves”[C]//China Energy Research Society Professional Committee. The proceedings of the third National Geothermal Academic Conference. Beijing: Beijing Science and Technology Publishing Co., Ltd., 43-48. (in Chinese)
- Bücker C,Rybach L,1996. A simple method to determine heat production from gamma-ray logs[J]. Marine and Petroleum Geology,13(4):373-375.
- He L J,Xiong L P,Wang J Y, *et al.*,2001. Tectono-thermal modeling of the Yinggehai Basin, South China Sea[J]. Science in China Series D: Earth Sciences,44(1):7-13.
- Limberger J,Boxem T,Pluymaekers M,*et al.*,2018. Geothermal energy in deep aquifers: A global assessment of the resource base for direct heat utilization[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,82:961-975.
- Rybach L,1986. Amount and significance of radioactive heat sources in sediments[C]//In Collection Colloques et Seminaires 44, Thermal Modeling of Sedimentary Basins (Burrus, J., ed). Paris: Paris Editions Technip,311-322.
- Wang Y C,Pang Z H,2023. Heat flux in volcanic and geothermal areas: Methods, principles, applications and future directions[J]. Gondwana Research,122:260-278.

(责任编辑:黄维婷)