松辽盆地重点油区水热型砂岩地热储层评价

刘先录[1a]，胡光明[1a, 1b, 1c*]，肖红平[2]，周玉钦[1a]，张庭瑀[1a]，饶松[1a, 1b, 1c]

1. 长江大学 a. 地球科学学院；b. 非常规油气地质与工程湖北省工程研究中心；c. 南方复杂页岩油气地质与开发湖北省重点实验室，武汉 430100；
2. 中国石油勘探开发研究院，北京 100083

第一作者，E-mail：19525516589@163.com

* 通信作者，E-mail：hugm@yangtzeu.edu.cn

2024-09-18 收稿；2025-03-05 修回；2025-03-05 接受

基金项目：国家自然科学基金项目(41472097)；中国石油天然气股份有限公司油气与新能源板块 2022—2023 年度科技课题(2022KT2601)

中图分类号：P314　　文章编号：2096-8523(2025)04-0185-16　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240530

摘　要：现行的热储行业评价标准是基于有水优储(中高孔中高渗)制定的，按此标准我国大多数盆地的热储属于有水差储(中低孔低渗)，故现行热储行业评价标准存在不适应性。另外，在地热资源预可行性勘查阶段，常用的评价方法需要大量的参数和数据，而这一阶段能获取的资料往往较少，因此，探索少参数的快速评价方法很有必要。松辽盆地重点油区的水热型砂岩热储具有中薄层中低孔低渗的特点，属于有水差储，本研究以此为例，探索研究有水差储的评价标准及少参数条件下热储的快速评价方法。首先，在了解了目的层热储的厚度、孔隙度和渗透率等基本特征的基础上，对其进行统计分析，应用黄金分割法划分等级，确定这些参数的评价标准。由于其属于低温热储，单井日产水量对热储的评价更为重要，选取开发区的砂体厚度、孔隙度、渗透率和单井日产水量数据，利用多元线性回归对其进行分析后构建热储评价公式，计算各评价单元的得分，并按照黄金分割法划分等级。将此方法的得分排名与现有 2 种评价方法的两两对比表明，纳入砂体厚度而弃用温度是合理的，且此方法的得分标准差较大，能够更好地反映各评价单元之间的差异，因此，此方法较为可行，针对有水差储制定的评价标准较为合理。本研究所确定的有水差储评价标准对其他盆地的热储评价有一定的参考意义，考虑到各盆地之间的差异，本研究确定的少参数快速评价方法对其他盆地不一定适用，但是确定评价公式的过程有借鉴意义。

关键词：松辽盆地；水热型砂岩；有水差储；地热储层评价标准；地热储层评价方法

地热具有资源量大、连续稳定、利用效率高、清洁、成本低、可再生等优势，开发利用地热资源不仅是应对全球气候变化、助力“2030 碳达峰，2060 碳中和”的重要举措[1-2]，更是高含水、特高含水阶段的老油田能源产业转型升级、实现经济可持续发展的内在需求[3-4]。依据热的赋存方式，地热资源可分为水热型和干热岩型 2 种，水热型地热资源是指内部以流体为主要载热物质的地热资源，可分为有水优储(高渗透热储)和有水差储(低渗和致密热储)，干热岩型地热资源是指埋深 3 ~ 10 km、温度 150 ~ 650℃、内部没有水或蒸汽的地热资源，包括无水优储、无水差储和无水无储[5-7]。

针对水热型砂岩热储的评价，《NB/T10263-2019》从热储温度、砂体厚度、孔隙度、渗透率、地热流体产量等方面制定了评价标准，其中砂体厚度≥100、(100, 20] 和<20 m 分别为厚层、中层和薄层；孔隙度≥25%、[15%, 25%)、<15% 分别为高孔、中孔和低孔；渗透率≥500×10^{-3}, [100, 500)$\times10^{-3}$, <100×10^{-3} μm^2 分别为高渗、中渗和低渗[8]。这一评价标准主要是基于华北地区新近系馆陶组的水热型砂岩热储数据

著录信息：刘先录, 胡光明, 肖红平, 等. 松辽盆地重点油区水热型砂岩地热储层评价 [J]. 地质科技通报, 2025, 44(4): 185-200.
LIU Xianlu, HU Guangming, XIAO Hongping, et al. Hydrothermal sandstone geothermal-reservoir evaluation of the key oil-producing area in the Songliao Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(4): 185-200.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

制定的[9]，而馆陶组大多数热储的孔隙度超过 15%、渗透率超过 100×10^{-3} μm^2，属于中高孔、中高渗热储[10]，因此，该标准适用于有水优储的评价。但是我国其他盆地水热型砂岩热储多呈现出中低孔低渗的特征[11]，多属于有水差储，直接应用上述标准进行评价并不合适，因此，针对有水差储制定评价标准是很有必要的。

在地热资源预可行性勘查阶段，主要使用地表热流法、随机模拟法（蒙特卡罗法）、热储法、综合评价指数法等对地热资源开发利用前景做出评价[12-14]。这些评价方法所需参数较多，例如，热储法需要岩石和水的平均体积比热容、计算区面积、热储平均厚度、热储平均温度、基准温度、岩石和水的密度、岩石和水的比热容、平均孔隙度等数据[15-16]。而这些数据在勘查阶段往往较少或者难以获取[17]，给评价工作带来困难。因此探索预可行性勘查阶段少参数的快速评价方法是很有必要的。

松辽盆地重点油区是指中央坳陷及周边区域，其泉三段–姚家组热储具有中低孔低渗的特点，为典型的水热型有水差储。本研究以此为例，研究有水差储的厚度、孔隙度和渗透率的评价标准，探索预可行性勘查阶段少参数的快速评价方法。

1　研究区概况

松辽盆地是一个处于西伯利亚板块、太平洋板块和蒙古–华北板块交汇处的大型中、新生代盆地，先后经历了初始张裂阶段（J_{2+3}）、裂陷阶段（K_1hs_1-K_1d）、沉陷阶段（K_1q-K_2n）以及萎缩平衡阶段段（K_2s-Q）等构造演化过程[18-19]。

松辽盆地在沉陷阶段经历了多次湖侵湖退。泉头组早期，统一的坳陷盆地形成，泉三段湖盆扩大，发育多个扇三角洲、三角洲沉积体系，泉四段持续沉降，河流向盆地推进，形成大面积的河控浅水三角洲砂体[20-21]。青一段发生广泛湖侵，湖泊面积急剧扩大至接近现今盆地边界，沉积相带呈不规则半环状，从盆地边缘向中心依次出现河流相–三角洲相–湖泊相[22]；青二段湖退，从盆地边缘向中心依次出现冲积扇相–河流相–三角洲相–湖泊相，相带呈半环状；青三段继续湖退，沉积相类型和分布与青二段相当，青三段末发生抬升，部分地层遭受剥蚀[23-24]。从姚一段开始，又缓慢沉降，北部、西部、西南部发育大面积的三角洲沉积；姚二三段继承了姚一段的基本格局，同时湖侵扩大，三角洲范围有所收缩[25]。嫩江组短暂湖退后，嫩二段再次广泛湖侵，随后湖退，直到嫩五段末期构造抬升，盆地的沉陷阶段结束。反复的湖侵湖退建造了沉陷阶段巨厚的碎屑岩沉积体，在沉积与构造作用的双重控制下，中央坳陷及其周边形成了 2 套大规模热储，分别为由泉头组三四段组成的下部热储以及由青山口组二三段和姚家组所组成的上部热储，青山口组一段以及嫩江组二三段的致密厚层泥岩分别为这 2 套热储的盖层[26-27]（图 1）。按照地热资源类型分类，松辽盆地沉陷阶段的地热资源属于水热型地热资源[28]。

2　热储的主要特征

2.1　热储厚度特征

中央坳陷及其周边的泉三段–姚家组的砂体厚度等值线图（图 2）及统计结果显示，泉三、泉四段呈现出“满盆砂”的特征，但是泉三段的砂体更厚、分布更广，平均砂体厚度可达 47.6 m，泉四段平均砂体厚度仅为 18.8 m；青山口组沉积时期，砂体主要发育于盆地北部、西南部、西部，呈连片分布，受湖退的影响，青三段砂体最为发育，平均砂体厚度为 41 m，青一、青二段砂体平均厚度较小，分别为 15.7，31.7 m；姚家组沉积时期，砂体主要分布于北部倾没区、中央坳陷区北部和西部斜坡区，砂体整体厚度较小。按照砂岩热储评价行业标准，这些砂体属于中薄层热储。

2.2　热储物性特征

按照现行的热储评价行业标准，对研究区泉三段–姚家组热储的物性特征投点分析发现（图 3），除了少量热储具有高孔、中高渗的特征外，绝大部分热储表现为中低孔、低渗的特征，且孔隙度与渗透率总体上呈现出正相关。综上所述，按照行业评价标准，松辽盆地中央坳陷及周边区域泉三段–姚家组属于中薄层中低孔低渗有水差储，热储价值不大，但实际上松辽盆地已经开发利用的泉三段–姚家组热田有多处，如大庆东风、林甸、杜蒙等地热田，而且运行良好。因此，现行标准至少对松辽盆地的热储评价是不合适的。

3　热储评价标准的确定

一般的储层评价标准是，将某一评价参数的数据从大到小排列后，按照金字塔式来确定该参数的Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类评价标准，即Ⅰ类数据量最少，Ⅱ类较多，Ⅲ类数据量最多[29]。但Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类的数量之间缺乏明确的比例关系，而且人为因素影响较大，而黄金分割法能很好地解决这一问题。黄金分割法是把 1 条线段分割为 a 和 b 2 段后，a∶b 为

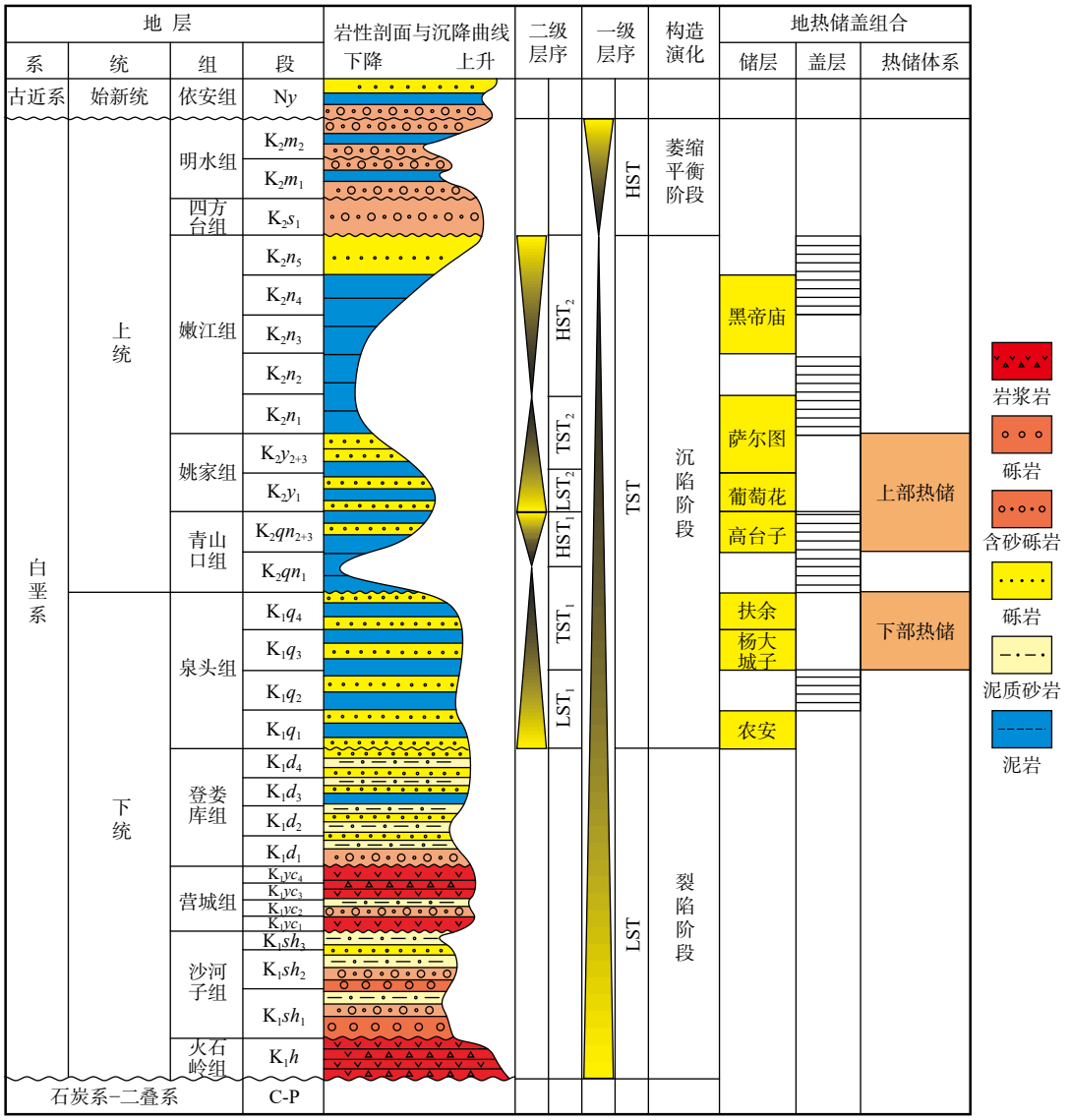


图 1　松辽盆地地层及沉陷阶段地热储盖组合关系（据文献 [26-27] 修改）

Fig. 1　Stratigraphic column and subsidence-stage-specific geothermal-reservoir–seal assemblages in the Songliao Basin

0.618。依此原理，把 1 条线段分割为 a、b、c 3 段，a：b 为 0.618，(a+b)：c 也为 0.618，就可以实现 3 段的黄金分割。照此方法，将热储参数的数据从大到小排列后，对参数的数据量进行 3 段式黄金分割，使得Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类的数据量比值为 1：1.618：4.236，数据数量的比例分别为 14.6%：23.6%：61.8%（图 4），即可较为科学地确定该参数的评价标准。

在松辽盆地中央坳陷及其周边的泉三段–姚家组，笔者采集到的砂体厚度、孔隙度、渗透率数据量分别为 277，227，246 个，利用 SPSS 软件中的频率统计描述和概率累计百分比，对砂体厚度、孔隙度以及渗透率进行分析，并按照 3 段式黄金分割的比例，即可近似得出砂体厚度、孔隙度和渗透率的评价标准（图 5，表 1）。

4　热储分类评价

大庆东风、林甸、杜蒙等地热田已经进行了比较成熟的开发利用，其热储层位与本研究的中央坳陷及周边区域的热储层位一致，也是泉三段–姚家组，而且已开发的热田能够提供的热储参数较多，数据量较大，对这些参数和数据进行数学分析，选取评价参数，明确评价参数的权重，再给参数取值，构建出评价公式。以此公式去计算中央坳陷及周边区域中各个评价单元的得分，并对得分进行黄金分割，从而得到分类评价结果。

4.1　回归分析

4.1.1　皮尔逊相关性分析

收集大庆东风、林甸、杜蒙等地热田砂体厚度

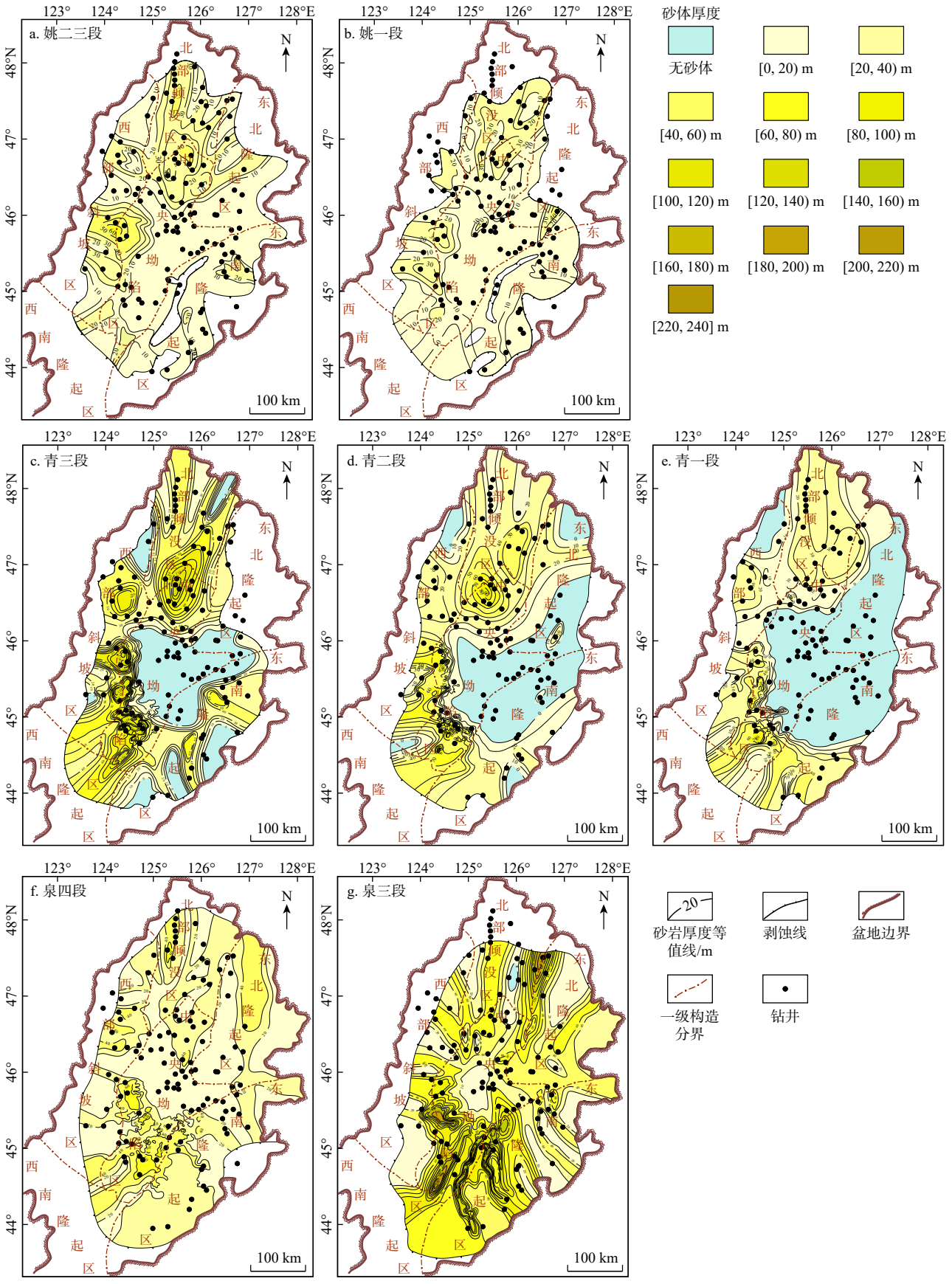


图 2　松辽盆地沉陷阶段主要地层砂体厚度等值线图

Fig. 2　Contour map of net sandstone thickness within the dominant stratigraphic units for the subsidence stage, Songliao Basin

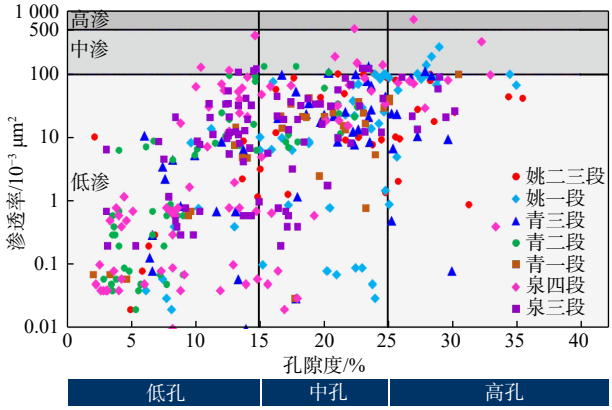


图 3　松辽盆地沉陷阶段主要热储孔隙度与渗透率分布特征

Fig. 3　Porosity and permeability distributions of the preincipal geothermal reservoirs during the subsidence stage in the Songliao Basin

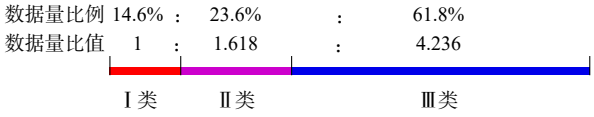


图 4　3 段式黄金分割法示意图

Fig. 4　Schematic of the tripartite golden-section method

(H)、孔隙度(φ)、渗透率(k)和单井日产水量(Q)等参数的数据 118 组(表 2)，用 SPSS 软件对其进行相关性分析，结果显示，单井日产水量(Q)与砂体厚度(H)、孔隙度(φ)以及渗透率(k)均呈正相关，皮尔逊相关系数分别为 0.590、0.571、0.455，显著性检验 sig.≤0.05(表 3)，说明单井日产水量与砂体厚度、孔隙度以及渗透率的相关性较强[33]。从地质意义上说，砂体厚度表征储层规模，孔隙度表征流体的体积分数，渗透率则表征流体采出的难易程度，因此砂体厚度、孔隙度和渗透率是决定单井日产水量的重要参数，即砂体厚度、孔隙度和渗透率是独立的自变量，单井日产水量是依赖于这些自变量的因变量。

4.1.2　回归模型的构建

本研究用归一化法将 118 组数据进行无量纲化处理(表 2)，并定义归一化后的日产水量、砂体厚度、孔隙度、渗透率分别为 Q'、H'、φ'和 k'。再用 SPSS 软件对这些归一化后的数据进行多元线性回归分析(表 4)。

为了比较不同的回归分析模型，基于 3 个地热田数据分别构建了 7 个回归模型，其中 3 个一元线性回归模型(日产水量分别与砂体厚度、孔隙度和渗透率的模型)、3 个二元线性回归模型(日产水量与砂体厚度和孔隙度模型，与孔隙度和渗透率的模型，与砂体厚度和渗透率的模型)以及 1 个三元线性回归模型(日产水量与砂体厚度、孔隙度和渗透率的模型)(表 4)。第 7 个模型，即三元线性回归模型的相关系数 R 最高，达到 0.8(表 4)，是对因变量自变量关系最好的解释模型，这进一步说明，选取砂体厚度、孔隙度和渗透率 3 个自变量来评价日产水量是合理的。

从三元回归模型的评价参数来看，样本决定系数为 0.640，调整可决定系数为 0.631，估计标准误差为 0.114，容差均大于 0.1，方差膨胀因子均小于 10(表 4)，说明自变量之间不存在高度相关性，不存在严重的共线情况。另外，回归标准化残差频率直方图(图 6a)显示回归标准化残差呈正态分布；回归标准化残差的正态 P–P 图(图 6b)说明实测累计概率沿预期累计概率两侧较为均匀的分布，符合正态分布，意味着回归模型的变量选取合适，数据量充足；回归标准化残差图中的点分布是随机的(图 7)，没有出现趋势性，表明该回归模型较为可靠[34]。

4.2　评价公式与评价结果

在对中央坳陷及其周边区域泉三段–姚家组热储进行评价前，先根据前面确定的砂体厚度评价标准，用砂体厚度 30, 60 m 等值线划分不同评价单元，然后读取各评价单元中各井点的砂体厚度、孔隙度及渗透率数据。

需要说明的是，评价单元的砂体厚度为该单元中各井砂体厚度的算术平均值，评价单元的孔隙度为该单元中各井的孔隙度对各井的砂体厚度的加权平均值，评价单元的渗透率也按照同样的方式求取加权平均值。计算公式如下：

$$\varphi_a = \sum_{i=1}^{n} H_i\varphi_i / \sum_{i=1}^{n} H_i, \quad (1)$$

$$K_a = \sum_{i=1}^{n} H_i K_i / \sum_{i=1}^{n} H_i, \quad (2)$$

式中：φ_a 为某评价单元的加权孔隙度，%；K_a 为某评价单元的加权渗透率，10^{-3} μm²；H_i 为某评价单元中第 i 口井的砂体厚度，m；φ_i 为某评价单元中第 i 口井的孔隙度，%；K_i 为某评价单元中第 i 口井的渗透率，10^{-3} μm²。

结合砂体厚度、孔隙度、渗透率分级评价标准，对其分别进行参数取值(表 5)。

另外，第 7 个模型的评价显示，砂体厚度的标准化系数最大，孔隙度的次之，渗透率的最小(表 4)，说明对因变量单井日产水量贡献最大的是砂体厚度。但标准化系数仅仅反映不同自变量之间相对的贡献度，而非标准系数可以直观地解释变量与自变量之间的实际关系[34-35]。

因此可以将非标准化系数当作“权重”使用，然后将赋值与各项参数的权重相乘得到该单元热储的

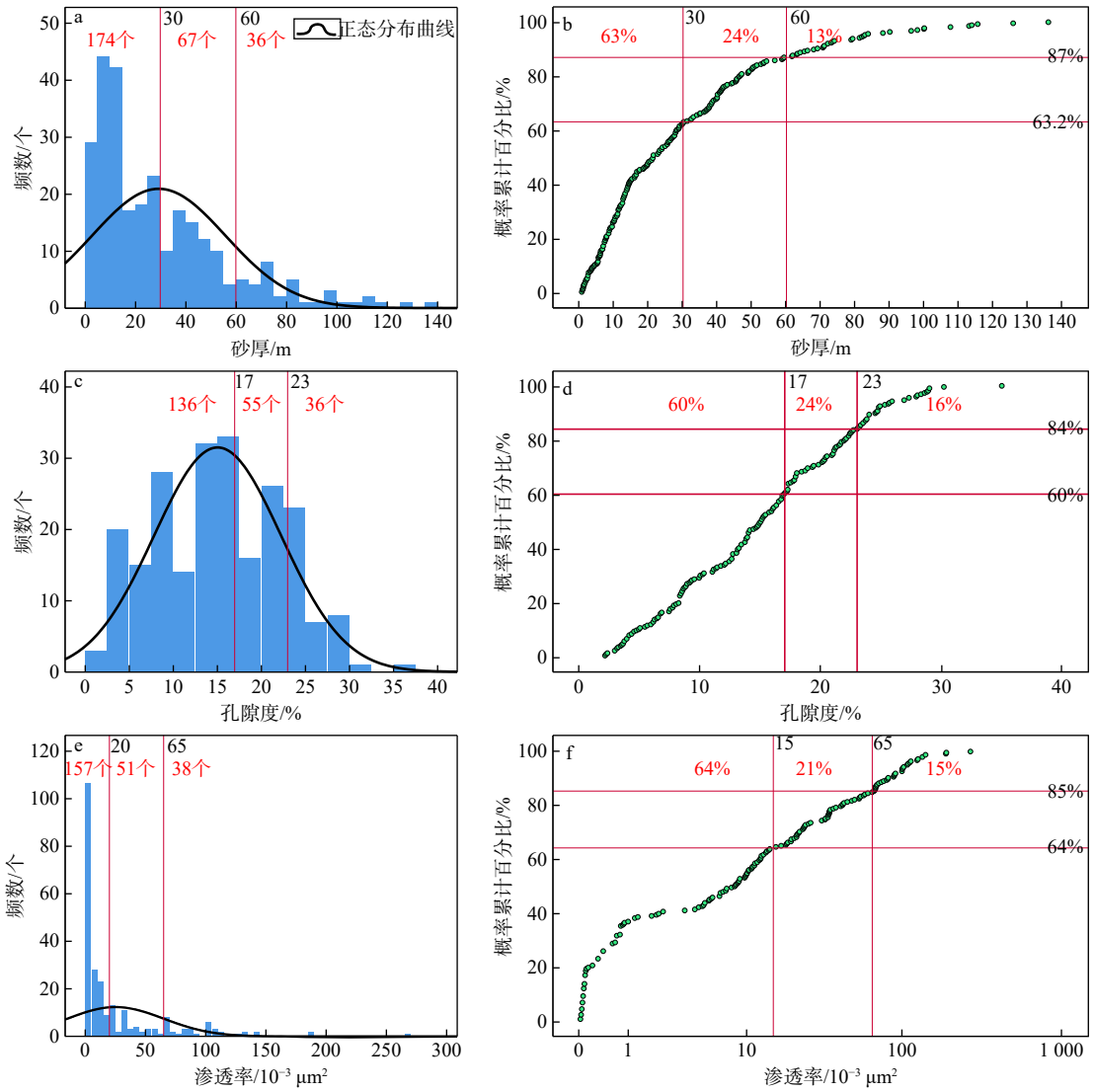


图 5　砂体厚度、孔隙度和渗透率频率分布直方图及累计概率百分比图

Fig. 5　Histograms of Frequency distribution and cumulative probability curves for sandstone thickness, porosity, and permeability

综合得分。具体计算公式(以下简称方法 1)为:

$$Q' = 0.523H' + 0.648\varphi' + 0.185K' - 0.485, \quad (3)$$

式中: Q'为综合得分; H', φ', K'分别为砂体厚度、孔隙度和渗透率的参数取值。

表 1　砂体厚度、孔隙度、渗透率评价标准

Table 1　Evaluation criteria for sandstone thickness, porosity and permeability

参数	类别	概率累计百分比/%	黄金分割数/个	实际个数/个	黄金分割比例/%	评价标准
砂体厚度	Ⅰ类	13	40	36	14.6	>60 m
	Ⅱ类	23	65	67	23.6	[30，60] m
	Ⅲ类	64	171	174	61.8	<30 m
孔隙度	Ⅰ类	16	33	36	14.6	<17%
	Ⅱ类	24	54	55	23.6	[17%，23%]
	Ⅲ类	60	140	136	61.8	>23%
渗透率	Ⅰ类	15	36	38	14.6	>65×10^{-3} μm^2
	Ⅱ类	21	58	51	23.6	[15，65]×10^{-3} μm^2
	Ⅲ类	64	152	157	61.8	<15×10^{-3} μm^2

得到所有评价单元的综合得分 Q'后,用黄金分割比率对所有综合得分进行分类,结果得到: Ⅰ类热储 14 个、Ⅱ类热储 23 个、Ⅲ类热储 59 个(图 8)。

5　讨　论

5.1　不同评价方法的比较

热储温度(T)对资源品质、热储物性(孔隙度 φ、渗透率(K)对热储的储集性能、热储厚度(H)和地热流体产量(Q)对地热可采资源量分别具有指示意义,是热储综合评价的基本参数[9]。针对预可行性勘查阶段的水热型砂岩热储评价, HE 等[7] 结合《NB/T 10263-2019》提出综合指数评价法(公式(4),以下简称方法 2)来计算热储综合评价指数(SI),即将 H、T、φ、K 4 个参数取值后相乘开 4 次方。FENG 等[9] 将

表 2　松辽盆地部分地热田热储参数（据文献 [30-32] 修改）

Table 2　Geothermal reservoir parameters of selected geothermal fields in the Songliao Basin

地热田	编号	砂体厚度		孔隙度		渗透率		日产水量	
		数值/m	归一化值	数值/%	归一化值	数值/10^{-3} μm^2	归一化值	数值/(t·d^{-1})	归一化值
大庆东风	1	2.60	0.013	25.00	0.833	136.71	0.169	25.26	0.023
	2	3.80	0.019	17.00	0.567	0.46	0.001	0.07	0.000
	3	4.00	0.020	25.00	0.833	224.03	0.278	26.58	0.024
	4	4.00	0.020	26.00	0.867	278.33	0.345	29.97	0.027
	5	4.40	0.022	25.00	0.833	136.71	0.169	17.41	0.016
	6	4.80	0.024	26.50	0.883	359.40	0.445	55.09	0.050
	7	5.40	0.027	26.50	0.883	359.40	0.445	167.75	0.153
	8	6.00	0.030	22.00	0.733	16.20	0.020	7.60	0.007
	9	7.60	0.038	24.00	0.800	163.47	0.202	28.95	0.026
	10	10.80	0.054	24.00	0.800	163.47	0.202	57.53	0.053
	11	12.60	0.063	20.30	0.677	4.84	0.006	6.97	0.006
	12	16.00	0.080	26.00	0.867	807.29	1.000	245.56	0.224
	13	20.00	0.100	27.00	0.900	302.73	0.375	557.63	0.509
	14	25.60	0.127	23.40	0.780	43.83	0.054	61.17	0.056
	15	26.00	0.129	22.00	0.733	25.90	0.032	63.85	0.058
	16	26.60	0.132	25.00	0.833	136.71	0.169	391.03	0.357
	17	34.20	0.170	16.00	0.533	4.69	0.006	4.30	0.004
	18	39.80	0.198	22.00	0.733	25.90	0.032	60.20	0.055
	19	43.60	0.217	24.50	0.817	191.37	0.237	264.43	0.242
	20	48.00	0.239	24.50	0.817	191.37	0.237	179.54	0.164
	21	49.00	0.244	25.50	0.850	262.26	0.325	353.97	0.323
	22	49.80	0.248	21.50	0.717	22.46	0.028	99.15	0.091
	23	50.60	0.252	21.00	0.700	19.48	0.024	66.15	0.060
	24	52.80	0.263	24.00	0.800	45.75	0.057	395.78	0.361
	25	54.80	0.273	25.00	0.833	136.71	0.169	440.60	0.402
	26	74.60	0.371	25.00	0.833	60.82	0.075	598.95	0.547
	27	82.60	0.411	17.50	0.583	7.19	0.009	24.76	0.023
	28	2.30	0.011	17.00	0.567	1.23	0.002	30.66	0.028
	29	3.20	0.016	21.00	0.700	21.66	0.027	2.10	0.002
	30	6.40	0.032	25.20	0.840	254.89	0.316	83.13	0.076
	31	6.40	0.032	22.00	0.733	13.33	0.017	0.92	0.001
	32	7.20	0.036	21.25	0.708	24.20	0.030	48.51	0.044
	33	7.42	0.037	22.20	0.740	110.30	0.137	22.42	0.020
	34	8.60	0.043	19.80	0.660	12.70	0.016	25.69	0.023
	35	8.60	0.043	21.80	0.727	12.12	0.015	1.82	0.002
	36	9.00	0.045	20.00	0.667	59.68	0.074	6.64	0.006
	37	9.60	0.048	30.00	0.950	640.49	0.793	230.00	0.210
	38	12.20	0.061	17.70	0.590	31.40	0.039	0.68	0.001
	39	12.60	0.063	23.66	0.789	165.81	0.205	57.53	0.053
	40	14.20	0.071	27.00	0.900	421.33	0.522	228.51	0.209
	41	15.40	0.077	27.50	0.917	484.45	0.600	222.94	0.204
	42	16.60	0.083	14.60	0.487	0.39	0.000	24.47	0.022
	43	17.20	0.086	19.00	0.633	45.14	0.056	21.16	0.019
	44	19.60	0.098	22.43	0.748	117.62	0.146	28.13	0.026
	45	21.40	0.106	19.04	0.635	9.05	0.011	10.34	0.009
	46	21.60	0.107	18.40	0.613	6.81	0.008	0.57	0.001
	47	22.20	0.110	17.40	0.580	28.88	0.036	4.52	0.004
	48	22.60	0.112	21.87	0.729	100.59	0.125	77.02	0.070
	49	26.80	0.133	19.90	0.663	4.90	0.006	4.24	0.004
	50	27.20	0.135	25.20	0.840	254.89	0.316	437.51	0.400
	51	27.60	0.137	19.61	0.654	53.52	0.066	34.72	0.032
	52	27.60	0.137	26.40	0.880	108.86	0.135	100.93	0.092
	53	28.60	0.142	23.80	0.793	31.48	0.039	24.62	0.022
	54	29.80	0.148	21.45	0.715	89.46	0.111	161.84	0.148
	55	30.20	0.150	22.60	0.753	123.33	0.153	111.64	0.102
	56	30.20	0.150	17.12	0.571	26.70	0.033	3.64	0.003
	57	30.30	0.151	17.94	0.598	5.55	0.007	0.10	0.000
	58	31.40	0.156	22.84	0.761	49.11	0.061	1.70	0.002

续表

地热田	编号	砂体厚度		孔隙度		渗透率		日产水量	
		数值/m	归一化值	数值/%	归一化值	数值/10^{-3} μm^2	归一化值	数值/(t·d^{-1})	归一化值
	59	32.20	0.160	11.20	0.373	0.28	0.000	0.50	0.000
	60	32.40	0.161	22.25	0.742	37.77	0.047	40.46	0.037
	61	33.00	0.164	25.36	0.845	266.54	0.330	365.92	0.334
	62	33.20	0.165	24.33	0.811	199.92	0.248	255.55	0.233
	63	34.00	0.169	16.60	0.553	3.06	0.004	4.69	0.004
	64	36.60	0.182	22.30	0.743	15.39	0.019	62.08	0.057
	65	38.00	0.189	21.85	0.728	12.41	0.015	13.61	0.012
	66	38.80	0.193	22.57	0.752	122.30	0.151	98.37	0.090
杜蒙	67	40.60	0.202	21.74	0.725	30.10	0.037	38.73	0.035
	68	42.80	0.213	21.30	0.710	9.55	0.012	96.28	0.088
	69	53.90	0.268	20.80	0.693	19.81	0.025	8.68	0.008
	70	55.00	0.274	19.58	0.653	4.20	0.005	15.79	0.014
	71	57.20	0.285	24.67	0.822	219.83	0.272	615.59	0.562
	72	58.40	0.291	22.96	0.765	51.80	0.064	183.36	0.167
	73	64.80	0.322	23.51	0.784	66.16	0.082	235.94	0.215
	74	86.20	0.429	18.40	0.613	2.39	0.003	45.49	0.042
	75	92.00	0.458	25.70	0.857	175.30	0.217	699.71	0.639
	76	103.20	0.513	16.28	0.543	2.65	0.003	93.19	0.085
	77	105.80	0.526	18.88	0.629	8.43	0.010	2.04	0.002
	78	134.20	0.668	20.70	0.690	18.95	0.023	277.67	0.254
	79	28.60	0.142	20.00	0.667	22.10	0.027	25.06	0.023
	80	40.00	0.199	24.00	0.800	117.32	0.145	447.49	0.409
	81	40.80	0.203	25.00	0.833	443.19	0.549	144.33	0.132
	82	41.20	0.205	23.00	0.767	65.15	0.081	45.23	0.041
	83	42.40	0.211	23.00	0.767	133.57	0.165	105.57	0.096
	84	42.60	0.212	23.05	0.768	67.09	0.083	189.99	0.174
	85	44.40	0.221	25.50	0.850	598.15	0.741	161.81	0.148
	86	47.80	0.238	23.00	0.767	133.57	0.165	116.71	0.107
	87	48.80	0.243	16.00	0.533	2.01	0.002	4.49	0.004
	88	50.60	0.252	26.00	0.867	380.52	0.471	388.54	0.355
	89	50.60	0.252	23.00	0.767	65.15	0.081	170.49	0.156
	90	52.80	0.263	26.00	0.867	380.52	0.471	396.05	0.362
	91	53.60	0.267	26.00	0.867	380.52	0.471	100.35	0.092
	92	54.30	0.270	25.50	0.850	195.06	0.242	277.53	0.253
	93	56.20	0.280	25.00	0.833	211.29	0.262	242.69	0.222
	94	56.40	0.281	25.00	0.833	211.29	0.262	265.35	0.242
	95	57.50	0.286	26.00	0.867	380.52	0.471	316.92	0.289
	96	58.20	0.290	25.00	0.833	211.29	0.262	151.26	0.138
林甸	97	59.40	0.296	19.00	0.633	12.13	0.015	20.83	0.019
	98	60.40	0.300	13.00	0.433	0.33	0.000	0.78	0.001
	99	64.60	0.321	26.50	0.883	510.66	0.633	174.07	0.159
	100	66.00	0.328	22.00	0.733	73.33	0.091	64.76	0.059
	101	66.60	0.331	24.50	0.817	157.45	0.195	235.02	0.215
	102	67.80	0.337	25.00	0.833	136.71	0.169	247.22	0.226
	103	68.80	0.342	22.00	0.733	36.17	0.045	235.02	0.215
	104	77.10	0.384	18.00	0.600	6.66	0.008	8.51	0.008
	105	85.00	0.423	20.00	0.667	22.10	0.027	152.56	0.139
	106	87.00	0.433	24.00	0.800	67.15	0.083	281.47	0.257
	107	97.60	0.486	19.00	0.633	12.13	0.015	17.07	0.016
	108	108.00	0.537	26.00	0.867	278.33	0.345	619.67	0.566
	109	114.00	0.567	22.50	0.750	23.11	0.029	17.06	0.016
	110	115.80	0.576	23.00	0.767	32.98	0.041	243.59	0.222
	111	120.60	0.600	24.00	0.800	67.15	0.083	547.90	0.500
	112	130.20	0.648	24.50	0.817	95.81	0.119	511.80	0.467
	113	142.80	0.710	26.50	0.883	397.14	0.492	810.46	0.740
	114	146.80	0.730	27.00	0.900	566.66	0.702	1 094.89	1.000
	115	155.80	0.775	25.00	0.833	136.71	0.169	734.23	0.671
	116	160.40	0.798	26.00	0.867	278.33	0.345	590.05	0.539
	117	176.00	0.876	23.00	0.767	32.98	0.041	508.95	0.465
	118	201.00	1.000	22.00	0.733	16.20	0.020	300.39	0.274

该公式简化，仅仅使用了 T、φ、K 3 个参数(公式(5)，以下简称方法 3)(表 6, 7)。具体计算公式为：

表 3　日产水量与特征参数相关性分析

Table 3　Correlation analysis between daily water yield and characteristic parameters

		日产水量	砂体厚度	孔隙度	渗透率
日产水量	皮尔逊相关系数	1	0.590	0.571	0.455
	显著性sig.值	/	0.000	0.000	0.000
	个案数	118	118	118	118
砂体厚度	皮尔逊相关系数	/	1	0.085	−0.026
	显著性sig.值	/	/	0.358	0.776
	个案数	/	118	118	118
孔隙度	皮尔逊相关系数	/	/	1	0.712
	显著性sig.值	/	/	/	0.000
	个案数	/	/	118	118
渗透率	皮尔逊相关系数	/	/	/	1
	显著性sig.值	/	/	/	/
	个案数	/	/	/	118

$$SI = \sqrt[4]{T \times \varphi \times K \times H}, \tag{4}$$

$$SI = \sqrt[3]{T \times \varphi \times K}。 \tag{5}$$

方法 2 和方法 3 基本上是相同的，所不同的是方法 2 采纳了 H、T、φ、K 4 个参数，而方法 3 则去掉了热储厚度 H，保留了 T、φ、K 等。另外，方法 2 和方法 3 中各参数之间的权重比是相同的，意味着不同参数具有同等的重要性，而方法 1 通过多元线性回归分析确定了不同参数的权重，明确了不同参数对地热资源贡献度的差异。

5.2　不同方法的评价结果比较

基于各评价单元的热储厚度、孔隙度、渗透率，再结合文献 [36] 中的地层顶底板地温等值线图读取的各井温度，分别用方法 2 和方法 3 对各评价单元进行评价，并与方法 1 的评价结果进行对比(表 8)。

表 4　线性回归分析模型及其评价

Table 4　Linear regression analysis models and their assessment

模型	干扰项ε与自变量X	未标准化系数		标准化系数	t检验	显著性sig.值	共线性诊断		相关系数 R	决定系数 R^2	调整后 R^2	标准估算误差
		回归系数	标准误差				容差	方差膨胀因子				
1	ε	0.024	0.022	/	1.116	0.267	/	/	0.590	0.348	0.342	0.152
	H	0.548	0.070	0.590	7.866	0.000	1.000	1				
2	ε	−0.566	0.097	/	−5.814	0.000	/	/	0.572	0.327	0.321	0.154
	φ	0.966	0.129	0.572	7.503	0.000	1.000	1				
3	ε	0.086	0.020	/	4.275	0.000	/	/	0.455	0.207	0.200	0.167
	K	0.428	0.078	0.455	5.505	0.000	1.000	1				
4	ε	−0.494	0.127	/	−3.896	0.000	/	/	0.576	0.331	0.320	0.154
	φ	0.849	0.184	0.502	4.623	0.000	0.493	2.029				
	K	0.092	0.102	0.097	0.897	0.371	0.493	2.029				
5	ε	−0.630	0.074	/	−8.546	0.000	/	/	0.788	0.621	0.615	0.116
	φ	0.887	0.097	0.525	9.116	0.000	0.993	1.007				
	H	0.506	0.054	0.545	9.461	0.000	0.993	1.007				
6	ε	−0.052	0.020	/	−2.535	0.013	/	/	0.755	0.570	0.562	0.124
	H	0.560	0.057	0.602	9.839	0.000	0.999	1.001				
	K	0.443	0.058	0.471	7.695	0.000	0.999	1.001				
7	ε	−0.485	0.093	/	−5.192	0.000	/	/	0.800	0.640	0.631	0.114
	K	0.185	0.076	0.197	2.443	0.016	0.485	1.023				
	φ	0.648	0.137	0.383	4.734	0.000	0.482	2.057				
	H	0.523	0.053	0.562	9.893	0.000	0.977	2.061				

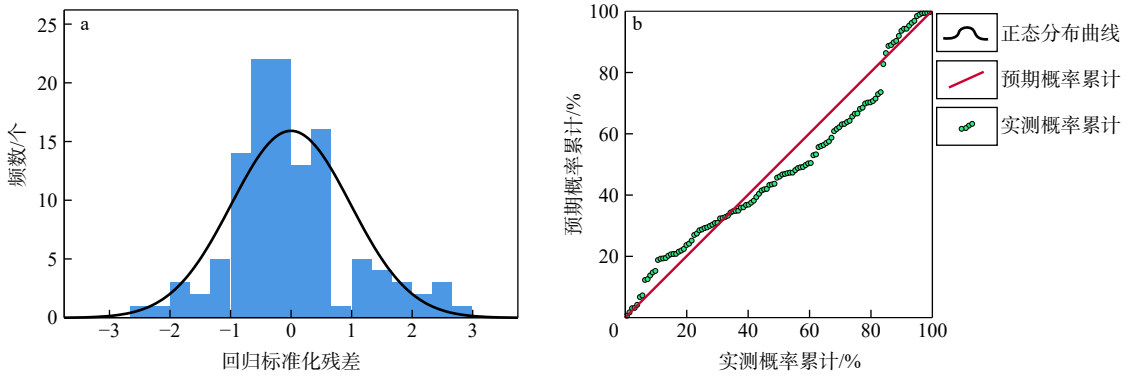


图 6　回归标准化残差的频率分布直方图 (a) 和正态 P–P 图 (b)

Fig. 6　Frequency histogram (a) and normal P–P plot (b) of standardized regression residuals

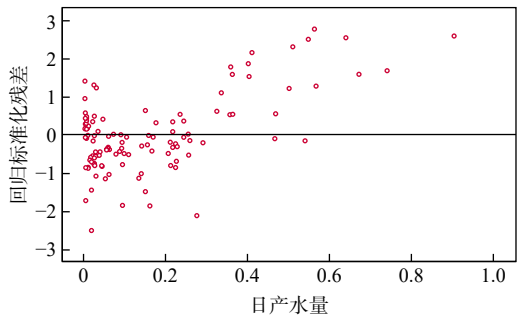


图 7　回归标准化残差图

Fig. 7　Standardized residual plot of the regression

表 5　方法 1 对应的砂岩热储厚度与物性参数评价标准及取值标准（参数取值标准据文献 [9]）

Table 5　Evaluation criteria and quantitative value standards for sandstone geothermal storage thickness and petrophysical parameters under Method 1

评价分类	砂体厚度/m	孔隙度/%	渗透率/10^{-3} μm^2	参数取值标准
Ⅰ类热储	>60	>23	>65	100
Ⅱ类热储	[30，60]	[17，23]	[15，65]	[20，100)
Ⅲ类热储	<30	<17	<15	[10，20)

方法 3 与方法 1 的评价得分排名差异的绝对值之和最大，为 1 262，主要原因是它们采用了不同的参数，方法 1 采用了 H 而没有 T，方法 3 采用了 T 而无 H。方法 1 与方法 2 评价得分排名差异的绝对值之和小于方法 2 与方法 3 评价得分排名差异的绝对值之和，而方法 1 比方法 2 少了参数 T，方法 2 比方法 3 多了参数 H，说明 H 的重要性要超过 T。尽管方法 1 没有采用 T 这一参数，但方法 1 与方法 2 评价得分排名差异的绝对值之和相对最小，说明温度对松辽盆地重点油区地热储层评价的影响不大。事实上，松辽盆地的地温呈现出中部高、边部低的环带状展布特征[37-40]，而砂岩热储主要分布在边部（图 2），且与砂岩热储重叠的边部地温绝大多数都小于 90℃，按照行业标准它们都属于低温热储，对资源的贡献差别不大，而地温的参数取值标准则放大了这种差异，这是方法 1 与方法 2 评价得分排名差异的绝对值之和达到 772 的原因之一。因此方法 1 去掉 T 而保留 H 有一定的合理性，但前提是温度都处于同一级别。

评价得分的标准差越大，各个评价单元之间的差异越明显。方法 1、方法 2 和方法 3 评价得分的标准差分别为 30.85、7.98 和 7.07，说明方法 1 最能体现各评价单元之间的差异，是松辽盆地重点油区水热型砂岩热储评价最好的选择。这不仅是因为方法 1 选择了关键性的评价参数，更重要的是用黄金分割法划分了参数的评价标准，并用多元线性回归分析确定了各关键参数的权重，从而使得各评价单元的得分差异性更大，评价结果更为精准。

6　结　论

（1）本研究结合松辽盆地重点油区热储的特点，用黄金分割法拟定了中薄层中低孔低渗热储（有水差储）在预可行性勘查阶段的评价标准：砂体厚度≥60，[30, 60)，<30 m；孔隙度>23%，[17%, 23%]，<17%；渗透率>65×10^{-3}，[15, 65]×10^{-3} μm^2，<15×10^{-3} μm^2，分别为热储厚度、孔隙度和渗透率的Ⅰ类、Ⅱ类、Ⅲ类的评价标准。这一标准对松辽盆地较为合理，也可供其他盆地有水差储评价参考。

（2）基于评价目标地温条件相差不大、单井日产水量对评价更为关键的事实，以地热开发区的单井日产水量、砂体厚度、孔隙度和渗透率数据为参数，分析其相关性和参数权重，构建以日产水量为内涵的热储评价公式，这一评价方法具有少参数、快速评价的特点，适用于预可行性勘查阶段热储评价。由于各盆地的特征不同，影响热储的关键参数和参数的权重不同，这一公式不一定能够应用到其他盆地，但是其优选评价参数和构建评价公式的过程可供其他盆地热储评价时参考。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] 汪集暘, 庞忠和, 罗霁, 等. 一带一路, “水”、“热”先行 [M]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2016: 6.
WANG J Y, PANG Z H, LUO J, et al. Construction of One Road Shall Be headed by "Water" and "Heating" Undertakings[M]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2016: 6. (in Chinese)

[2] 多吉, 赵睿. 地热能开发还须国家探路 [N]. 中国科学报, 2017-08-08(1).
DUO J, ZHAO R. The development of geothermal energy still needs to be explored by the state[N]. Chinese Science Bulletin, 2017-08-08, (1). (in Chinese)

[3] 王转转, 欧成华, 王红印, 等. 国内地热资源类型特征及其开发利用进展 [J]. 水利水电技术, 2019, 50(6): 187-195.
WANG Z Z, OU C H, WANG H Y, et al. The characteristics and development of geothermal resources in China[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(6): 187-195. (in Chinese with English abstract)

[4] 王社教, 施亦做, 方朝合, 等. 中国油田地热开发利用现状与发展方向 [J]. 岩性油气藏, 2024, 36(2): 23-32.

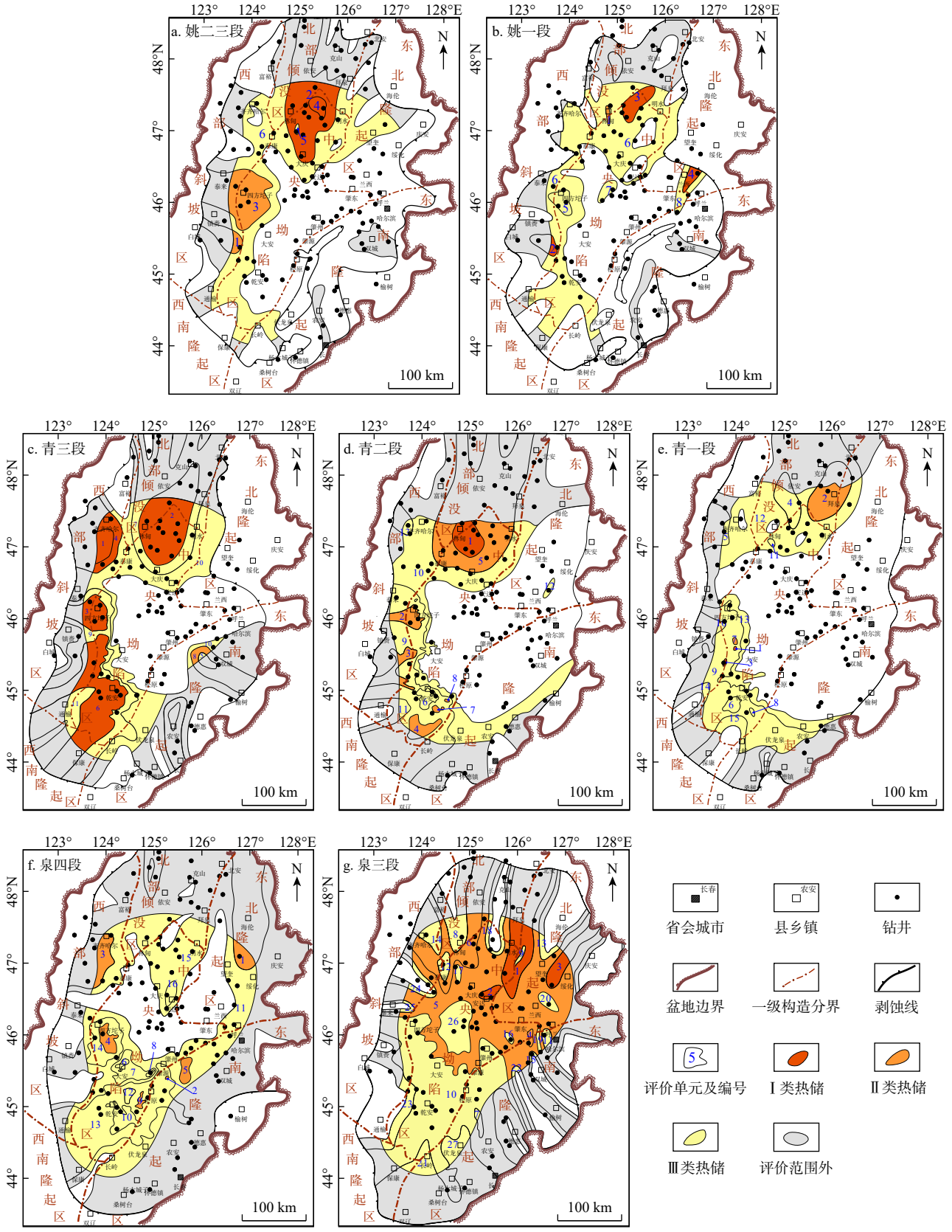


图 8　分级赋值–权重法热储评价结果

Fig. 8　Geothermal reservoir assessment results based on the hierarchical grading–weighting method

表 6 方法 2 和方法 3 对应的砂岩热储厚度与物性参数评价标准及取值标准（据文献 [9] 修改）

Table 6 Evaluation criteria and quantitative value standards for sandstone geothermal-reservoir thickness and petrophysical parameters under Method 2 and Method 3

评价分类	砂体厚度H/m	孔隙度φ/%	渗透率$K/10^{-3}$ μm^2	参数取值标准
Ⅰ类热储	≥100	≥25	≥500	100
Ⅱ类热储	(100，20]	(25，15]	(500，100]	[20，100）
Ⅲ类热储	<20	<15	<100	[10, 20）

表 7 方法 2 和方法 3 对应的砂岩热储温度评价标准及取值标准（据文献 [9] 修改）

Table 7 Temperature-based evaluation criteria and value standards for sandstone geothermal reservoirs under Method 2 and Method 3

评价分类	温度中部温度T/℃	参数取值标准
Ⅰ类热储	≥150	100
Ⅱ类热储	[120，150)	100
	[90，120)	[70, 90）
Ⅲ类热储	[30，90)	[10，70）

表 8 3 种评价方法评价结果对比

Table 8 Comparison of evaluation results from three assessment methods

评价单元编号	方法1 (H，K，φ)			方法2 (H，T，K，φ)			方法3 (T，K，φ)			方法1与方法2评价得分排名差异的绝对值	方法2与方法3评价得分排名差异的绝对值	方法3与方法1评价得分排名差异的绝对值
	得分	排名	评价分类	得分	排名	评价分类	得分	排名	评价分类			
qn3-2	129.66	1	Ⅰ	45.28	2	Ⅰ	34.77	8	Ⅰ	1	6	7
qn3-1	127.72	2	Ⅰ	46.43	1	Ⅰ	40.14	4	Ⅰ	1	3	2
qn1-3	124.26	3	Ⅰ	40.65	4	Ⅰ	35.10	7	Ⅰ	1	3	4
q3-1	123.66	4	Ⅰ	38.75	9	Ⅰ	31.39	12	Ⅰ	5	3	8
qn2-1	110.58	5	Ⅰ	40.38	5	Ⅰ	32.02	10	Ⅰ	0	5	5
qn3-3	107.08	6	Ⅰ	44.05	3	Ⅰ	45.25	1	Ⅰ	3	2	5
y2+3-4	106.94	7	Ⅰ	37.72	11	Ⅰ	36.82	5	Ⅰ	4	6	2
y2+3-2	106.29	8	Ⅰ	37.32	12	Ⅰ	36.45	6	Ⅰ	4	6	2
y1-3	104.15	9	Ⅰ	40.15	6	Ⅰ	40.73	3	Ⅰ	3	3	6
qn3-6	101.80	10	Ⅰ	38.05	10	Ⅰ	29.10	16	Ⅱ	0	6	6
y1-2	100.25	11	Ⅰ	39.49	8	Ⅰ	40.90	2	Ⅰ	3	6	9
y1-4	99.09	12	Ⅰ	29.70	28	Ⅱ	26.37	27	Ⅱ	16	1	15
qn3-4	96.63	13	Ⅰ	31.10	22	Ⅱ	28.08	19	Ⅱ	9	3	6
qn1-1	93.78	14	Ⅰ	39.50	7	Ⅰ	32.36	9	Ⅰ	7	2	5
qn3-8	93.78	15	Ⅱ	26.31	49	Ⅲ	18.82	70	Ⅲ	34	21	55
q4-1	92.53	16	Ⅱ	28.99	34	Ⅱ	26.58	25	Ⅱ	18	9	9
y2+3-1	85.17	17	Ⅱ	28.35	38	Ⅲ	31.32	13	Ⅰ	21	25	4
qn2-3	83.28	18	Ⅱ	35.66	13	Ⅰ	27.79	20	Ⅱ	5	7	2
qn1-2	83.12	19	Ⅱ	24.88	52	Ⅲ	28.40	18	Ⅱ	33	34	1
qn2-2	81.79	20	Ⅱ	35.47	14	Ⅰ	26.59	24	Ⅱ	6	10	4
q3-4	80.64	21	Ⅱ	33.71	17	Ⅱ	26.32	28	Ⅱ	4	11	7
q4-2	79.76	22	Ⅱ	29.24	31	Ⅱ	21.67	48	Ⅲ	9	17	26
q4-3	78.34	23	Ⅱ	30.14	25	Ⅱ	29.66	14	Ⅰ	2	11	9
qn2-5	76.85	24	Ⅱ	31.71	20	Ⅱ	26.74	23	Ⅱ	4	3	1
q4-4	75.32	25	Ⅱ	32.95	18	Ⅱ	25.41	31	Ⅱ	7	13	6
q3-6	72.25	26	Ⅱ	34.03	16	Ⅱ	26.76	22	Ⅱ	10	6	4
y1-1	69.89	27	Ⅱ	30.97	23	Ⅱ	29.58	15	Ⅱ	4	8	12
q4-5	68.95	28	Ⅱ	30.00	26	Ⅱ	22.43	40	Ⅲ	2	14	12
q3-3	68.03	29	Ⅱ	29.61	29	Ⅱ	22.26	43	Ⅲ	0	14	14
q3-2	67.97	30	Ⅱ	34.06	15	Ⅱ	24.59	32	Ⅱ	15	17	2
q4-9	67.68	31	Ⅱ	28.39	37	Ⅱ	20.84	53	Ⅲ	6	16	22
qn2-4	66.85	32	Ⅱ	30.56	24	Ⅱ	22.98	37	Ⅱ	8	13	5
qn2-8	66.40	33	Ⅱ	29.06	33	Ⅱ	21.49	49	Ⅲ	0	16	16
qn2-7	66.23	34	Ⅱ	29.44	30	Ⅱ	21.87	46	Ⅲ	4	16	12
qn1-7	65.74	35	Ⅱ	30.00	27	Ⅱ	22.42	41	Ⅲ	8	14	6
y2+3-3	65.63	36	Ⅱ	31.38	21	Ⅱ	26.54	26	Ⅱ	15	5	10
q3-5	65.57	37	Ⅱ	32.54	19	Ⅱ	29.05	17	Ⅱ	18	2	20
y2+3-5	65.06	38	Ⅲ	21.70	65	Ⅲ	22.30	42	Ⅲ	27	23	4
qn1-6	64.34	39	Ⅲ	27.79	41	Ⅲ	20.25	58	Ⅲ	2	17	19
qn2-6	63.72	40	Ⅲ	28.17	40	Ⅲ	20.62	54	Ⅲ	0	14	14
q3-11	63.39	41	Ⅲ	28.22	39	Ⅲ	18.57	72	Ⅲ	2	33	31

续表

评价单元编号	方法1 (H，K，φ)			方法2 (H，T，K，φ)			方法3 (T，K，φ)			方法1与方法2评价得分排名差异的绝对值	方法2与方法3评价得分排名差异的绝对值	方法3与方法1评价得分排名差异的绝对值
	得分	排名	评价分类	得分	排名	评价分类	得分	排名	评价分类			
q4-12	63.17	42	Ⅲ	26.67	45	Ⅲ	19.17	65	Ⅲ	3	20	23
q4-10	62.47	43	Ⅲ	28.53	36	Ⅱ	20.97	52	Ⅲ	7	16	9
q4-11	62.47	44	Ⅲ	23.99	54	Ⅲ	16.65	85	Ⅲ	10	31	41
q3-8	62.00	45	Ⅲ	27.24	43	Ⅲ	23.62	33	Ⅱ	2	10	12
q4-6	61.21	46	Ⅲ	26.57	47	Ⅲ	19.07	68	Ⅲ	1	21	22
qn1-8	61.21	47	Ⅲ	25.71	51	Ⅲ	18.25	75	Ⅲ	4	24	28
qn3-9	53.95	48	Ⅲ	25.81	50	Ⅲ	21.30	50	Ⅲ	2	0	2
qn3-5	50.55	49	Ⅲ	27.46	42	Ⅲ	23.14	35	Ⅱ	7	7	14
qn1-4	49.35	50	Ⅲ	28.68	35	Ⅱ	31.70	11	Ⅰ	15	24	39
y1-5	49.27	51	Ⅲ	29.21	32	Ⅱ	27.10	21	Ⅱ	19	11	30
y2+3-6	48.74	52	Ⅲ	19.33	76	Ⅲ	19.25	63	Ⅲ	24	13	11
qn1-5	47.00	53	Ⅲ	21.15	69	Ⅲ	20.30	57	Ⅲ	16	12	4
qn1-9	45.93	54	Ⅲ	27.18	44	Ⅲ	22.82	38	Ⅲ	10	6	16
qn3-11	45.93	55	Ⅲ	23.06	60	Ⅲ	18.33	74	Ⅲ	5	14	19
q4-8	44.64	56	Ⅲ	26.51	48	Ⅲ	22.04	44	Ⅲ	8	4	12
q4-15	43.02	57	Ⅲ	23.75	56	Ⅲ	25.43	30	Ⅱ	1	26	27
qn3-10	40.62	58	Ⅲ	21.64	66	Ⅲ	20.06	59	Ⅲ	8	7	1
q4-7	40.29	59	Ⅲ	23.95	55	Ⅲ	19.27	62	Ⅲ	4	7	3
qn1-10	39.42	60	Ⅲ	23.26	59	Ⅲ	21.79	47	Ⅲ	1	12	13
qn3-7	38.79	61	Ⅲ	22.81	61	Ⅲ	18.43	73	Ⅲ	0	12	12
q3-17	38.43	62	Ⅲ	22.22	64	Ⅲ	18.75	71	Ⅲ	2	7	9
q3-10	37.38	63	Ⅲ	26.59	46	Ⅲ	25.46	29	Ⅱ	17	17	34
qn1-11	35.83	64	Ⅲ	23.27	58	Ⅲ	19.31	61	Ⅲ	6	3	3
q3-9	35.55	65	Ⅲ	24.61	53	Ⅲ	21.17	51	Ⅲ	12	2	14
qn2-13	33.02	66	Ⅲ	13.58	92	Ⅲ	11.27	93	Ⅲ	26	1	27
q3-19	31.07	67	Ⅲ	19.49	72	Ⅲ	16.36	87	Ⅲ	5	15	20
q3-16	28.22	68	Ⅲ	19.47	73	Ⅲ	20.00	60	Ⅲ	5	13	8
q3-18	28.09	69	Ⅲ	21.63	67	Ⅲ	23.08	36	Ⅱ	2	31	33
q4-14	27.47	70	Ⅲ	23.55	57	Ⅲ	20.53	56	Ⅲ	13	1	14
qn2-10	23.87	71	Ⅲ	18.92	79	Ⅲ	15.62	89	Ⅲ	8	10	18
q3-15	23.86	72	Ⅲ	15.78	89	Ⅲ	16.58	86	Ⅲ	17	3	14
q3-12	23.70	73	Ⅲ	20.84	70	Ⅲ	22.64	39	Ⅲ	3	31	34
q4-16	23.41	74	Ⅲ	22.69	62	Ⅲ	20.54	55	Ⅲ	12	7	19
q3-26	23.25	75	Ⅲ	20.30	71	Ⅲ	18.89	69	Ⅲ	4	2	6
y1-6	22.72	76	Ⅲ	18.65	80	Ⅲ	18.22	76	Ⅲ	4	4	0
y1-8	22.72	77	Ⅲ	14.57	91	Ⅲ	13.11	91	Ⅲ	14	0	14
q3-14	22.52	78	Ⅲ	16.71	88	Ⅲ	14.78	90	Ⅲ	10	2	12
q3-7	22.10	79	Ⅲ	22.63	63	Ⅲ	23.59	34	Ⅱ	16	29	45
q3-27	22.10	80	Ⅲ	19.38	75	Ⅲ	19.18	64	Ⅲ	5	11	16
q3-20	21.81	81	Ⅲ	12.07	94	Ⅲ	11.19	94	Ⅲ	13	0	13
y1-7	21.79	82	Ⅲ	21.27	68	Ⅲ	22.03	45	Ⅲ	14	23	37
qn1-12	21.59	83	Ⅲ	17.11	87	Ⅲ	17.94	77	Ⅲ	4	10	6
qn1-13	21.37	84	Ⅲ	19.21	78	Ⅲ	19.14	66	Ⅲ	6	12	18
q3-24	20.28	85	Ⅲ	15.44	90	Ⅲ	17.84	78	Ⅲ	5	12	7
q3-21	20.11	86	Ⅲ	18.46	81	Ⅲ	16.33	88	Ⅲ	5	7	2
q3-25	19.59	87	Ⅲ	19.31	77	Ⅲ	19.09	67	Ⅲ	10	10	20
q3-23	19.59	88	Ⅲ	17.75	83	Ⅲ	17.06	81	Ⅲ	5	2	7
q3-22	19.59	89	Ⅲ	17.52	85	Ⅲ	16.76	83	Ⅲ	4	2	6
q3-13	19.59	90	Ⅲ	8.97	95	Ⅲ	6.87	95	Ⅲ	5	0	5
q4-13	19.48	91	Ⅲ	19.39	74	Ⅲ	17.30	80	Ⅲ	17	6	11
qn1-15	19.03	92	Ⅲ	17.48	86	Ⅲ	16.72	84	Ⅲ	6	2	8
qn2-12	17.80	93	Ⅲ	8.66	96	Ⅲ	5.85	96	Ⅲ	3	0	3
qn1-14	16.52	94	Ⅲ	17.66	84	Ⅲ	16.94	82	Ⅲ	10	2	12
qn2-11	16.52	95	Ⅲ	13.40	93	Ⅲ	11.72	92	Ⅲ	2	1	3
qn2-9	16.17	96	Ⅲ	17.95	82	Ⅲ	17.60	79	Ⅲ	14	3	17
标准差	30.85	/	/	7.98	/	/	7.07	/	/	/	/	/
绝对值之和	/	/	/	/	/	/	/	/	/	772	1002	1262

WANG S J, SHI Y Z, FANG C H, et al. Status and development trends of geothermal development and utilization in oilfields of China[J]. Lithologic Reservoirs, 2024, 36(2): 23-32. (in Chinese with English abstract)

[5] 黄尚瑶, 王钧, 汪集旸. 关于地热带分类及地热田模型 [J]. 水文地质工程地质, 1983, 10(5): 1-7.
HUANG S Y, WANG J, WANG J Y. On the classification of geothermal zone and geothermal field model[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1983, 10(5): 1-7. (in Chinese)

[6] 张英, 冯建赟, 何治亮, 等. 地热系统类型划分与主控因素分析 [J]. 地学前缘, 2017, 24(3): 190-198.
ZHANG Y, FENG J Y, HE Z L, et al. Classification of geothermal systems and their formation key factors[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(3): 190-198. (in Chinese with English abstract)

[7] HE Z L, ZHANG Y, FENG J Y, et al. An EGS site evaluation method for geothermal resources based on geology engineering and economic considerations[J]. Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, 2018.

[8] 国家能源局. 地热储层评价方法: NB/T10263-2019[S]. 北京: 中国石化出版社, 2020: 1-4.
National Energy Bureau of the People's Republic of China. Geothermal reservoir evaluation methods: NB/T10263-2019[S]. Beijing: China Petrochemical Press, 2020: 1-4. (in Chinese)

[9] FENG J Y, ZHANG Y, HE Z L, et al. Discussion on evaluation methodology of hydrothermal geothermal reservoir[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2019, 7(1): 29-41.

[10] 翟光明, 侯启军, 马永生等. 中国石油地质志第二版. 卷七, 华北油气区(上册)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2023: 247-248.
ZHAI G M, HOU Q J, MA Y S, et al. Petroleum geology of China, Volume 7, North China oil and gas zone (Volume I) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2023: 247-248. (in Chinese)

[11] 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 S J, LI F, YAN J H, et al. Evaluation methods and application of geothermal resources in oilfields[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(5): 553-564. (in Chinese with English abstract)

[12] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 地热资源地质勘查规范: GB/T11615-2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011: 6-7.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Geologic exploration standard of geothermal resources: GB/T11615-2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011: 6-7. (in Chinese)

[13] 李同彪. 地热资源评估方法综述 [J]. 能源与环境, 2015(5): 91-92.
LI T B. Summary of geothermal resources evaluation methods[J]. Energy and Environment, 2015(5): 91-92. (in Chinese)

[14] 杨峰田, 罗霁, 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(增刊 1): 307-315.
YANG F T, LUO J, LEI H F, et al. Application of Monte Carlo simulation in the evaluation of regional geothermal resources[J]. Science & Technology for Development, 2020, 16(S1): 307-315. (in Chinese with English abstract)

[15] 周建飞. 基于热储法的卜南堡地热田地热资源评价及利用方向研究 [J]. 现代矿业, 2023, 39(10): 52-55.
ZHOU J F. Study on evaluation and utilization direction of geothermal resources in Bunanpu geothermal field based on thermal storage method[J]. Modern Mining, 2023, 39(10): 52-55. (in Chinese with English abstract)

[16] 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 X, ZHANG Q L, LIU Y G. Evaluation of the geothermal resources in the plain of west Shandong Province[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(4): 172-177. (in Chinese with English abstract)

[17] 姜光政, 高堋, 饶松, 等. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J]. 地球物理学报, 2016, 59(8): 2892-2910.
JIANG G Z, GAO P, RAO S, et al. Compilation of heat flow data in the continental area of China(4th edition)[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(8): 2892-2910. (in Chinese with English abstract)

[18] 翟光明, 侯启军, 马永生, 等. 中国石油地质志第二版. 卷二: 大庆油气区 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2023: 111-127.
ZHAI G M, HOU Q J, MA Y S, et al. Petroleum geology of China, Volume 2: Daqing oil and gas zone[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2023: 111-127. (in Chinese)

[19] 胡望水. 松辽裂谷型盆地构造特征与含油气系统 [J]. 江汉石油学院学报, 1997, 19(1): 13-18.
HU W S. Structural characteristics and petroleum system in rift type Songliao Basin in Mesozoic and Cenozoic[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1997, 19(1): 13-18. (in Chinese with English abstract)

[20] 薛丹, 胡明毅, 邓猛, 等. 松辽盆地浅水三角洲沉积特征及模式研究: 以卫星地区泉头组三、四段为例 [J]. 科学技术与工程, 2014, 14(25): 35-42.
XUE D, HU M Y, DENG M, et al. Study of sedimentary characteristics and model of shallow-water delta: An example from Quan 3th and Quan 4th Member in Weixing area, Songliao Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(25): 35-42. (in Chinese with English abstract)

[21] 李君君, 王志章, 张枝焕, 等. 松辽盆地新立油田泉三段沉积相研究 [J]. 新疆石油地质, 2013, 34(5): 534-537.
LI J J, WANG Z Z, ZHANG Z H, et al. The sedimentary facies of Member-3 of Quantou Formation in Xinli oilfield, Songliao Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(5): 534-537. (in Chinese with English abstract)

[22] 张志坚, 张国斌, 佟卉, 等. 松辽盆地北部泰康地区青山口组一段沉积微相特征 [J]. 大庆石油学院学报, 2004, 28(6): 84-86.
ZHANG Z J, ZHANG G B, TONG H, et al. Microfacies characteristics of No. 1 section of Qingshankou Formation: Taikang area of north Songliao Basin[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2004, 28(6): 84-86. (in Chinese with English abstract)

[23] 辛仁臣, 王树恒, 梁江平, 等. 松辽盆地北部西斜坡青山口组三段四级层序格架内沉积微相分布 [J]. 现代地质, 2014, 28(4): 782-790.
XIN R C, WANG S H, LIANG J P, et al. Sedimentary microfacies

distribution under the 4th-order sequence stratigraphic framework of the Third Member of Qingshankou Formation in west slope of the northern part of Songliao Basin[J]. Geoscience, 2014, 28(4): 782-790. (in Chinese with English abstract)

[24] 冯路尧, 张建国, 姜在兴, 等. 松辽盆地青山口组高精度沉积旋回格架及有机质富集响应 [J]. 石油学报, 2023, 44(2): 299-311.
FENG L Y, ZHANG J G, JIANG Z X, et al. High-precision sedimentary cycle framework and organic matter enrichment response of Qingshankou Formation in Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(2): 299-311. (in Chinese with English abstract)

[25] 胡玉双, 蒋波, 年喜. 松辽盆地北部泰康北地区姚家组层序地层分析与沉积相特征 [J]. 大庆石油学院学报, 2006, 30(5): 111-113.
HU Y S, JIANG B, NIAN X. Sequence stratigraphic analysis and sedimentary study on Yaojia Formation in northern Taikang area of northern Songliao Basin[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2006, 30(5): 111-113. (in Chinese with English abstract)

[26] 翟志伟, 施尚明, 朱焕来. 大庆长垣西部地区地热资源潜力分布 [J]. 科学技术与工程, 2011, 11(4): 834-837.
ZHAI Z W, SHI S M, ZHU H L. Potential distribution of geothermal resource in western region of Daqing placanticline[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(4): 834-837. (in Chinese with English abstract)

[27] 王贵玲, 马峰, 侯贺晟, 等. 松辽盆地坳陷层控地热系统研究 [J]. 地球学报, 2023, 44(1): 21-32.
WANG G L, MA F, HOU H S, et al. Study of depression and layer controlled geothermal system in Songliao Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2023, 44(1): 21-32. (in Chinese with English abstract)

[28] 朱焕来. 松辽盆地北部沉积盆地型地热资源研究 [D]. 黑龙江 大庆: 东北石油大学, 2011.
ZHU H L. Research on the sedimentary: Geothermal resources in North Songliao Basin[D]. Daqing Heilongjiang: Northeast Petroleum University, 2011. (in Chinese with English abstract)

[29] 程启贵, 郭少斌, 王海红, 等. 鄂尔多斯盆地中西部长 6 油层组储层综合评价 [J]. 石油实验地质, 2010, 32(5): 415-419.
CHENG Q G, GUO S B, WANG H H, et al. Comprehensive reservoir evaluation of Chang-6 oil-bearing layers in Midwest Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(5): 415-419. (in Chinese with English abstract)

[30] 苏玉娟. 松辽盆地典型地热田成因机制及合理开发利用研究: 以林甸地热田为例 [D]. 长春: 吉林大学, 2021.
SU Y J. Genesis and rational development of typical geothermal field in the Songliao Basin[D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese with English abstract)

[31] 施龙. 松辽盆地构造热演化及地热资源定量评价研究: 以杜蒙地区为例 [D]. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2004.
SHI L. Study of the tectonic-thermal evolution of the Songliao Basin and quantitative assessment of its geothermal resource: A case study on the Dumeng district[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese with English abstract)

[32] 王琦. 沉积盆地型地热田定量评价系统研究 [D]. 黑龙江 大庆: 大庆石油学院, 2010.
WANG Q. Research on quantitative evaluation system of geothermal fields in sedimentary basin[D]. Daqing Heilongjiang: Daqing Petroleum Institute, 2010. (in Chinese with English abstract)

[33] 赵鹏大. 数字地质学 [M]. 北京: 科学出版社, 2023: 57-63.
ZHAO P D. Digital geology[M]. Beijing: Science Press, 2023: 57-63. (in Chinese)

[34] 李积永, 张平, 胡光明, 等. 一种单砂体多因素分类评价方法: 以柴达木盆地扎 11 井区下油砂山组为例 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(10): 4005-4010.
LI J Y, ZHANG P, HU G M, et al. A method on multi-factor evaluation and classification of single sand body: A case from Lower Youshashan Formation in Zha 11 wellblock, Qaidam Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(10): 4005-4010. (in Chinese with English abstract)

[35] 杨维忠, 张甜. SPSS 统计分析入门与应用精解: 视频教学版 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2022: 157-160.
YANG W Z, ZHANG T. Introduction and application of SPSS statistical analysis: Video teaching edition[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2022: 157-160. (in Chinese)

[36] 张翘然. 松辽盆地现今地温场特征与影响因素研究 [D]. 武汉: 长江大学, 2024.
ZHANG Q R. Characteristics and controlling factors of present geothermal field in the Songliao Basin[D]. Wuhan: Yangtze University, 2024. (in Chinese with English abstract)

[37] 刘晨璞, 钟鑫, 朱焕来. 松辽盆地北部中低地温场形成机制探讨 [J]. 地质调查与研究, 2016, 39(4): 316-320.
LIU C P, ZHONG X, ZHU H L. Research on the formation mechanism for the medium-low geothermal field in the north of Songliao Basin[J]. Geological Survey and Research, 2016, 39(4): 316-320. (in Chinese with English abstract)

[38] 刘雨晨, 柳波, 朱焕来, 等. 松辽盆地现今地温场分布特征及主控因素 [J]. 地质学报, 2023, 97(8): 2715-2727.
LIU Y C, LIU B, ZHU H L, et al. The distribution characteristics and main controlling factors of present-day geothermal regime of the Songliao Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(8): 2715-2727. (in Chinese with English abstract)

[39] 张翘然, 肖红平, 饶松, 等. 松辽盆地现今地温场特征及控制因素 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(5): 191-204.
ZHANG Q R, XIAO H P, RAO S, et al. Characteristics and controlling factors of the present geothermal field in the Songliao Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(5): 191-204. (in Chinese with English abstract)

[40] 臧亚辉, 李继木, 宁君, 等. 松辽盆地南部海力锦地区上白垩统姚家组砂岩物源示踪及其构造背景综合研究: 来自岩石地球化学及锆石 U-Pb 年代学的制约 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(5): 175-190.
ZANG Y H, LI J M, NING J, et al. Provenance and tectonic setting of the Upper Cretaceous Yaojia Formation sandstones in the Hailijin area, southern Songliao Basin: Constraints from petrogeochemistry and zircon U-Pb chronology[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(5): 175-190. (in Chinese with English abstract)

Summary for “松辽盆地重点油区水热型砂岩地热储层评价”

Hydrothermal sandstone geothermal-reservoir evaluation of the key oil-producing area in the Songliao Basin

LIU Xianlu[1a], HU Guangming[1a, 1b, 1c*], XIAO Hongping[2], ZHOU Yuqin[1a], ZHANG Tingyu[1a], RAO Song[1a, 1b, 1c]

1a. School of Geosciences; 1b. Hubei Engineering Research Center of Unconventional Petroleum Geology and Engineering; 1c. Hubei Key Laboratory of Complex Shale Oil and Gas Geology and Development in Southern China, Yangtze University, Wuhan 430100, China;

2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China

First author, E-mail: 19525516589@163.com

* Corresponding author, E-mail: hugm@yangtzeu.edu.cn

Abstract: Current industry criteria for geothermal-reservoir classification were established for high-quality hydrothermal systems (medium–high porosity and permeability). Consequently, most Chinese basinal reservoirs exhibit medium to low porosity and low permeability are misclassified as "poor," rendering the standards inapplicable. Moreover, the multi-parameter methods commonly used in pre-feasibility assessments require extensive data sets that are seldom, available during early exploration phases. Rapid, low-parameter evaluation protocols are therefore urgently needed. [**Objective**] Hydrothermal sandstone reservoirs in the Songliao Basin's key oil-producing area are typified by medium–thin beds, medium–low porosity, and low permeability. These characteristics are traditionally labelled as "poor." Using these reservoirs as a case study, we recalibrate the classification criteria for low-quality hydrothermal systems and develop parsimonious, rapid-assessment protocols that minimize data requirements. [**Methods**] First, the fundamental reservoir characteristics (thickness, porosity, and permeability) were statistically analyzed. The Golden Section Method was applied to classify parameter levels and establish evaluation criteria. Second, given the limited temperature variation among the studied low-temperature geothermal reservoirs, single-well daily production rate emerged as a critical evaluation metric. Consequently, sand body thickness, porosity, permeability, and single-well daily production rate within the study area were selected as input variables. Multivariate linear regression analysis was employed to derive a geothermal reservoir evaluation formula. This formula was then used to calculate evaluation unit scores, with final grading established using the Golden Section Method. [**Results**] Pairwise comparison of the score rankings from this method against those of two established evaluation methods demonstrated the validity of incorporating sand body thickness while excluding temperature. Furthermore, the relatively high standard deviation of the scores obtained by this method enhances its ability to delineate variations among the evaluation units. Consequently, this approach demonstrates greater feasibility, and the formulated evaluation criteria are particularly well-suited for hydrothermal reservoirs with limited storage capacity. [**Conclusion**] The evaluation criteria for low-storage hydrothermal systems developed in this study provide a valuable reference for geothermal-reservoir assessment in other basins. While basin-specific heterogeneity limits the direct transferability of the concise, few-parameter rapid-assessment model, the methodological framework used to derive the evaluation equation offers a robust, replicable template for analogous studies.

Key words: Songliao Basin; hydrothermal sandstone; poor-storage aquifer; geothermal-reservoir evaluation criterion; geothermal-reservoir assessment methodology

Received: 2024-09-18; Revised: 2025-03-05; Accepted: 2025-03-05

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240530