

A “Three Parameters Coupled” Method for Quality Evaluation of Geothermal Resources

Yonghong Yang¹, Zhongfeng Duan²

¹Exploration and Development Research Institute, SINOPEC Shengli Oil Field Company, Dongying Shandong

²School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao Shandong

Email: yangdu1975@163.com, duanzf@upc.edu.cn

Received: Jun. 7th, 2019; accepted: Jun. 21st, 2019; published: Jun. 28th, 2019

Abstract

This paper presented a new method for geothermal resources quality evaluation to show the exploration value and difficulty of geothermal field. Three evaluation indexes, including thermal production rate, geothermal fluid quality and terrestrial heat flow were selected to establish the “three parameters coupled” geothermal resource quality evaluation method. Thermal production rate was the main evaluation index, which could not only reflect the reservoir characteristics and geothermal water recharge capacity, but also the economic efficiency since the investment return has been taken into consideration when the rating standard established. The quality of geothermal fluid would embody in scaling and erosion, which would cause the damage of geothermal well pipe and heat exchange equipment, thus affecting the economy of geothermal resource exploration. The terrestrial heat flow showed the heat supply capacity of the thermal reservoir. Three evaluation indexes were assessed separately first, and then the comprehensive rate of regional geothermal resource quality can be obtained by using an evaluation template. This method was simple and clear, and can reflect the inherent property of geothermal resources. Tested by six projects in Jiyang Depression, this method could objectively reflect the characteristics of geothermal resources.

Keywords

Geothermal Resources Quality Evaluation, Three Parameters Coupled, Jiyang Depression

一种“三元耦合”的地热资源质量评价方法

杨永红¹, 段忠丰²

¹中国石化胜利油田分公司, 勘探开发研究院, 山东 东营

²中国石油大学(华东), 地球科学与技术学院, 山东 青岛

Email: yangdu1975@163.com, duanzf@upc.edu.cn

摘要

本文提出了地热资源质量评价方法, 以综合反映某区域地热资源的开发价值和利用难度。研究中选取单井产热功率、地热流体质量和大地热流三个评价指标, 建立了一种“三元耦合”的地热资源质量评价方法。单井产热功率用来反映储层物性特征和地热水补给能力, 另外在建立分级标准时考虑了资源利用方式的投资回报, 能够反映地热工程的经济价值, 是本方法的主要评价指标。地热流体质量体现在结垢性和腐蚀性, 会对地热井管和换热设备产生损耗, 从而影响地热资源开发的经济性。大地热流体现热储层的热补给能力。首先对三个评价指标进行单指标评价, 然后利用综合评价模板就可以得到区域地热资源质量的综合分级。本方法既简单明了, 又能反映地热资源的内在属性, 经过济阳坳陷6个地热项目的实际应用和检验, 该方法评价结果能够客观地反映地热资源特征, 符合实际。

关键词

地热资源品质评价, 三元耦合, 济阳坳陷

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地热资源作为一种清洁的可再生能源, 由于其持续稳定、可直接利用、成本低的优势, 近年来发展迅速[1]。地热资源评价是地热资源勘察和开发各阶段的重要内容。目前的地热资源质量评价主要是各类专项评价, 包括资源量评价(热量、水量)、水质评价, 以及目前探讨性的经济性评价、可持续性评价等[2][3][4][5]。

这些专项评价能够提供地热田地热资源量、资源质量和可持续性等各方面的信息, 但并没有提供不同地热田之间的优劣对比, 因此对非专业的决策者来说不易作为决策依据。

本文提出了一种“三元耦合”的地热资源质量评价方法, 考虑影响地热资源开发利用价值的三个主要影响因素, 能够较直观地反映地热资源的开发利用价值和利用难度, 能够为地热资源的开发布局和利用规划提供指导。

2. “三元耦合”地热资源质量评价方法

2.1. 何谓地热资源质量评价?

根据“全国科学技术名词审定委员会”的定义, 自然资源质量是指在一定社会经济条件下, 自然资源满足人类和社会环境需要的优劣程度, 或获取经济效益、社会效益和生态效益的多少和价值高低的表征。资源质量评价已在水资源、耕地、林业以及旅游资源等领域得到应用[6][7][8][9]。在地质领域, 陆云龙等[10]尝试对油气储层质量进行了评价。

根据2010年新修订的《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615-2010), 地热资源是指能够经济地被人类所利用的地球内部的地热能、地热流体及其有用组分。无疑, 地热资源是自然资源的一种, 在地热资

源开发时要考虑其品质高低。地热资源质量评价是指在一定经济技术条件下, 某一地区地热资源的开发利用价值。

进行自然资源质量评价时, 首先要厘清影响自然资源利用价值的主要因素, 并考虑其权重, 综合评价自然资源的质量。本文在讨论地热田地热资源质量评价时, 认为需要重视的是热储的产热能力、流体质量以及热储温度等这三个对地热资源开发价值影响较大的因素。

2.2. 参数选取及评价标准

本文选取单井产热功率、地热流体质量和大地热流三个参数, 对地热资源质量进行评价。

2.2.1. 单井产热功率

水热型地热资源的利用主要是通过钻探地热抽水换热实现。不同的热储条件(储层厚度、孔渗性等)下, 地热井所能采出的热量存在较大差异[11][12]。在地热资源开发利用过程中, 希望通过最少的地热井最大限度满足用热需求, 以降低成本, 提高经济效益。因此, 采用单井产能功率作为评价不同地热区块的产热能力的指标。

单井产热功率是指某一热储每口地热井所能提供的热功率, 能够反映热储孔渗性、地热水补给能力等地热资源的自然属性。计算公式如下:

$$Q = qC_w\rho_w(t_r - t_p) \quad (1)$$

式中: Q ——单井产热功率(J/d);

q ——单井日产水量(m^3/d);

C_w ——热水比热(取值 $4186.8 \text{ J/kg}\cdot\text{C}$);

ρ_w ——热水密度(取值 986.185 kg/m^3);

t_r ——地热流体温度($^{\circ}\text{C}$);

t_p ——弃水温度($^{\circ}\text{C}$)。

在评价单井产热功率时, 需要体现地热资源的经济价值优劣。这需要考虑地热资源的目标利用方式来确定不同级别的单井产热功率划分界限, 如地热发电、地热供暖、地热养殖等。地热发电可考虑钻探成本、设备成本、输电成本, 而投资回收需要考虑电价等因素。

本次研究的研究区为济阳拗陷, 主要利用方向为地热清洁供暖。因此, 本次研究以地热供暖开发利用成本结合本地区供暖收费(表 1), 进行不同单井产热功率的地热供暖经济评价, 最终通过不同单井产热功率的投资回收期 and 所得税后财务内部收益率的分析(图 1), 确定单井产能规模划分界限。

财务内部收益率为 0 时单井产热功率 2 MW。投资回收期 10 年、财务内部收益率为 8.00%时, 单井产热功率为 12 MW。以此作为划分节点, 按单井产热功率将地热资源划分为三类: 经济的(>12 MW), 次经济的(2~12 MW), 不经济的(<2 MW)。

Table 1. The cost and revenue of geothermal space heating

表 1. 地热供暖成本及收入表

类型	项目	费用
成本	投资成本(万元)	地面 + 埋深 \times 钻井成本参数
	运行维护费用指标(元/平)	16
收入	收费标准(元/平)	24

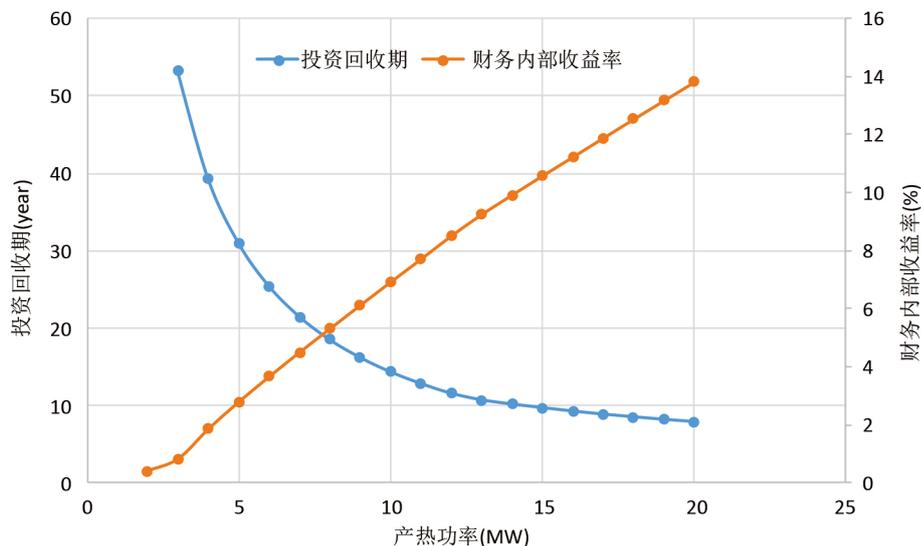


Figure 1. The relation between thermal production rate and payback period or FIRR (Financial Internal Rate of Return)

图 1. 单井产热功率与投资回收期 and 财务内部收益率的关系

2.2.2. 地热流体质量

在开采过程中, 由于压力、温度降低, 地热水中各类阴阳离子发生沉淀, 形成结垢, 或对管道、换热器产生腐蚀, 影响设备寿命、增大损耗[13]。因此将热流体质量作为地热资源质量评价的另一重要指标。

主要考虑地热流体的腐蚀性和结垢性, 采用《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615-2010)中规定的方法进行计算。

济阳拗陷新近系馆陶组和古近系东营组热储矿化度较高, Cl-离子含量高, 多为 Cl-Na 型或 Cl-Ca 型水, 结垢性不强, 但腐蚀性很强[14] [15], 因此, 根据地热流体腐蚀性将地热流体质量分为三类: 强腐蚀性、中腐蚀性和低腐蚀性。

2.2.3. 大地热流

热储温度决定了地热田地热流体性质、利用方式以及利用价值, 是地热资源质量评价的关键因素。在地热田内部, 也即地温梯度 $> 3.0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 范围内, 不同区带在平面大地热流补给方面也存在明显差异, 从而影响地热资源质量, 需要进一步细分。通过分析地热田地温场特征, 利用大地热流补给反映热源对地热资源质量的影响。

根据天津、河南、江苏以及山东济阳拗陷各地热田的分析[16] [17], 将地热田划分为三种类型: ① 快速热补型: 大地热流 $> 75\text{ mW}/\text{m}^2$, 热源补给迅速; ② 中速热补型: 大地热流 $70\text{ mW}/\text{m}^2$, 热源补给速度中等; ③ 慢速热补型: 大地热流 $< 60\text{ mW}/\text{m}^2$, 热源补给速度较慢。

2.3. “三元耦合” 地热资源质量评价

通过对地热田单井产热功率、热补给能力、地热流体质量的分析, 取得分项评价后, 进一步进行地热资源质量综合分类评价。具体步骤如下:

- 1) 根据勘探过程中获取的温度测试资料, 计算并明确全区地温梯度和热储温度分布特征。
- 2) 利用砂岩厚度、渗透率计算不同区域不同热储层系单井出水量, 结合之前各热储层系出水温度换算单井产热功率; 再根据不同单井产热功率的财务内部收益率分布区间($>0, 0\% \sim 8\%, >8\%$), 对全区划分一级分类。
- 3) 根据各地热井水化学分析资料, 计算拉申指数, 评价地热流体腐蚀性和结垢性。

- 4) 利用不同构造区的大地热流特征划分快速、中速、慢速热补类型分区, 反应热量补给能力。
5) 综合上述三个指标将地热资源划分为很好、好、中等、差、五种类型(表 2)。

Table 2. Rating of geothermal resources quality evaluation
表 2. “三元耦合” 地热资源质量评价分级

质量分类	单井产热功率	大地热流	流体质量
好	经济	快速	低腐蚀性
	经济	快速	中腐蚀性
	经济	中速	低腐蚀性
	经济	慢速	低腐蚀性
	经济	中速	中腐蚀性
较好	经济	慢速	低腐蚀性
	次经济	快速	低腐蚀性
中等	次经济	中速	低腐蚀性
	次经济	慢速	低腐蚀性
	次经济	中速	中腐蚀性
差	次经济	慢速	中腐蚀性

3. 济阳坳陷地热资源质量评价

在胜利油田石油大会战初期(二十世纪六十年代), 勘探油气的同时发现有中低温地热水, 表明济阳坳陷除了有丰富的油气资源外, 还蕴藏着丰富的地热资源。在油气区长期勘探开发过程中, 掌握了大量地温、地层、构造资料, 并已将地热资源应用于医疗、生活用热水、农业养殖、生活采暖、污水余热输油加热等方面[18][19]。本次研究过程中, 对济阳坳陷全区新近系馆陶组和东营组热储进行了地热资源质量评价。

3.1. 单井产热功率

计算单井产热功率需要结合抽水试验资料的确定单井日产量。利用东营、临盘和海洋采油厂地热的抽水资料进行拟合校正, 得到了适合济阳坳陷热储的实际出水量计算公式。

$$Q = 1.56 \frac{K \cdot M \cdot S_w}{\lg \frac{R}{r}} + 1069.8 \quad (2)$$

式中, Q ——单井实际日产量(m^3/d);

K ——渗透系数(m/d);

M ——砂岩厚度(m);

S_w ——降深(m);

r ——井径(m , 取 0.065 m);

R ——影响半径(m)。

图 2 为济阳坳陷馆上段 - 东三段单井产热功率等值线图。可见, 滩海地区单井产热功率最大, 最大功率大于 40 MW, 东营凹陷单井产热功率最小。

3.2. 地热热流体质量

济阳坳陷馆陶组、东营组热储中 Cl^- 浓度较高, 采用拉申指数法判断其腐蚀性、结垢性[6]。通过对

全区 64 余个地层流体样品进行计算分析, 计算结果见图 3。可见全区各层系地层流体均以中度 - 重度腐蚀性为主, 结垢性较差。

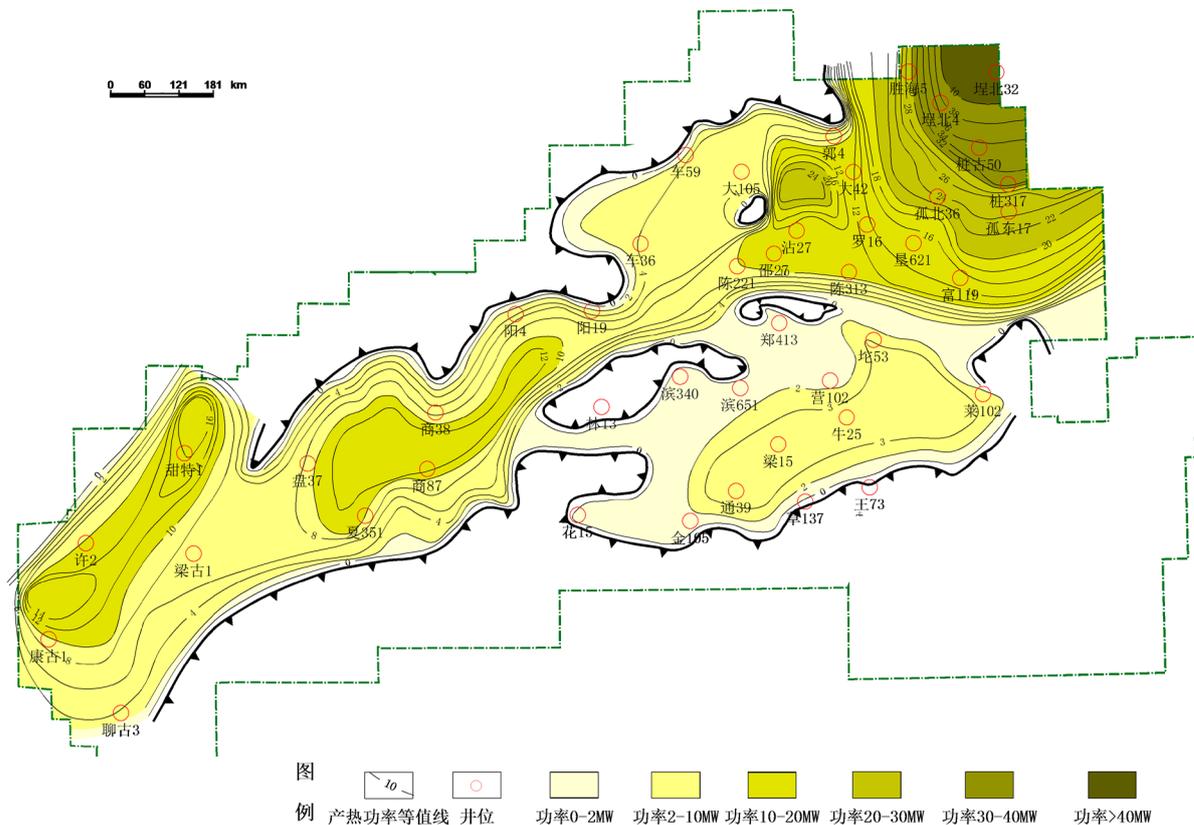


Figure 2. Thermal production rate in Jiyang Depression
图 2. 济阳拗陷馆陶组热储单井产热功率分布图

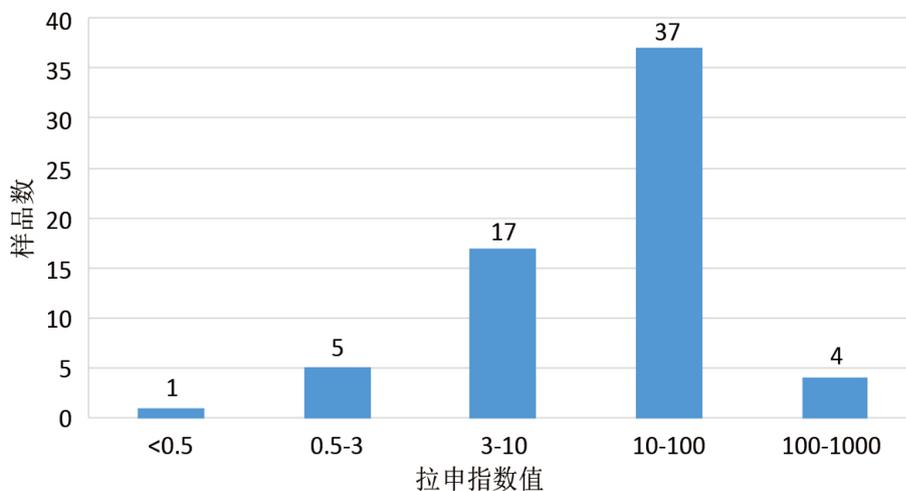


Figure 3. Corrosion evaluation of Ng geothermal reservoir in Jiyang Depression
图 3. 济阳拗陷馆陶组热储流体腐蚀性评价

根据济阳拗陷地热流体拉申指数的平面分布特征, 含油气区地热流体质量可能受深部油气渗漏影响, 油源断层对地热流体质量具有明显的控制作用。远离油源断层的洼陷区流体拉申指数较小, 油源断层区

流体拉伸指数较大(图 4)。这主要是由于油源断层活动时期沟通深部高矿化度强变质地层水, 导致油源断层附近流体质量较差。

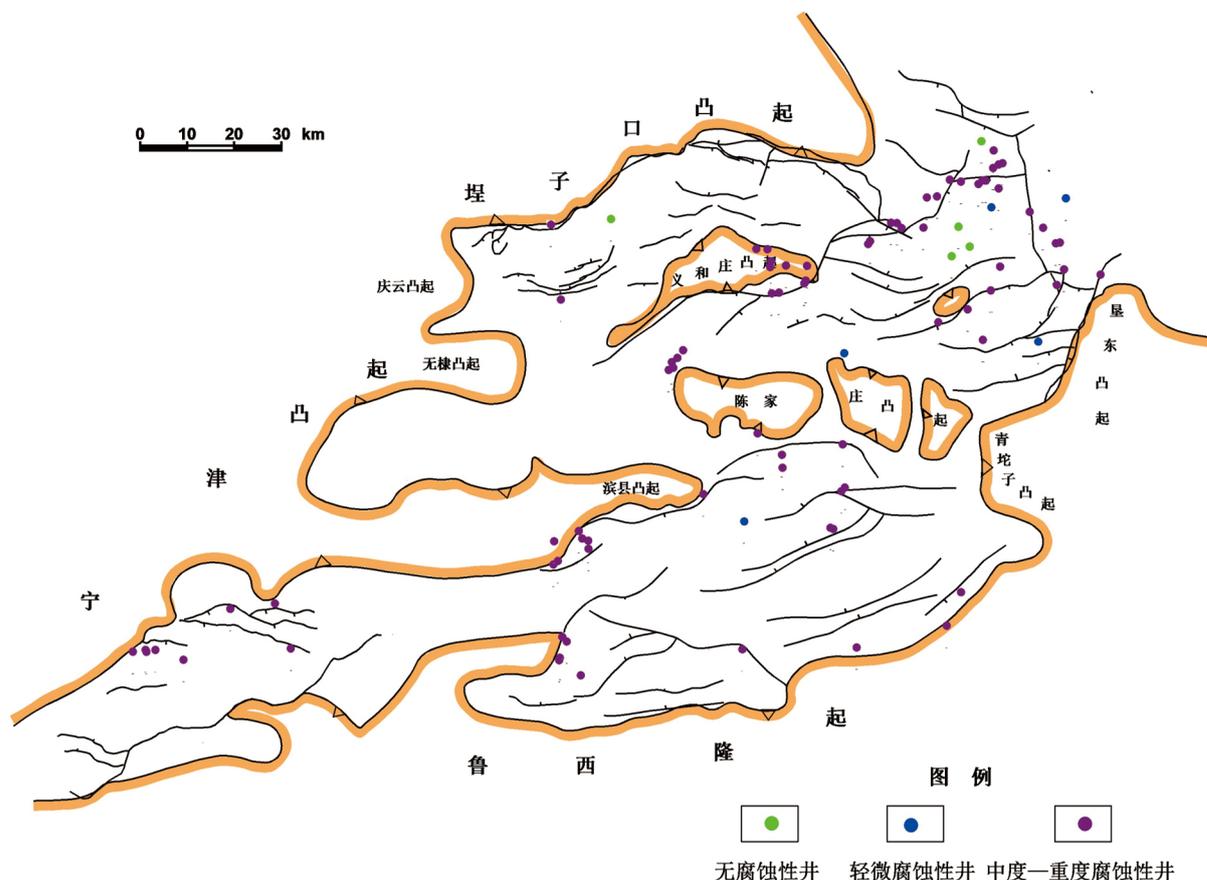


Figure 4. Larson index of Ng geothermal reservoir in Jiyang Depression
图 4. 济阳拗陷馆陶组地热井拉伸指数分布图

3.3. 热补给能力

统计了全区 300 多口油气勘探井的试油温度、砂泥比数据, 结合砂岩、泥岩的热导率统计值, 计算了馆陶 - 东营组热储各井点的大地热流值(图 5)。边缘凸起区大地热流的补充值较高, 在 70 mW/m^2 以上, 洼陷区大地热流值较小, 小于 60 mW/m^2 。

济阳拗陷及邻区热储的快速热补型主要分布在盆地边缘前的基岩凸起区, 大地热流值一般在 75 mW/m^2 以上, 中速热补型主要分布在盆地凸起与洼陷之间的斜坡带, 大地热流值一般在 70 mW/m^2 左右, 而慢速热补型则主要分布在地层厚度较大的盆地洼陷区, 大地热流值一般在 60 mW/m^2 以下。

3.4. 济阳拗陷地热资源品质评价结果

综合考虑单井产热功率、热补给能力、流体质量三个参数, 对全区地热资源进行质量分类评价, 划分为好、较好、中等、差四种类型, 质量好 - 较好的地热资源分布区为开发利用有利区(图 6)。

按照上述地热资源质量评价结果, 胜利油田 2017 年在地热资源质量优良区内的纯梁小区、聚华小区、河口小区、孤岛东、孤岛西、仙河地区部署 6 个地热供暖项目, 均获成功, 现场勘探结果表明评价结果符合实际。

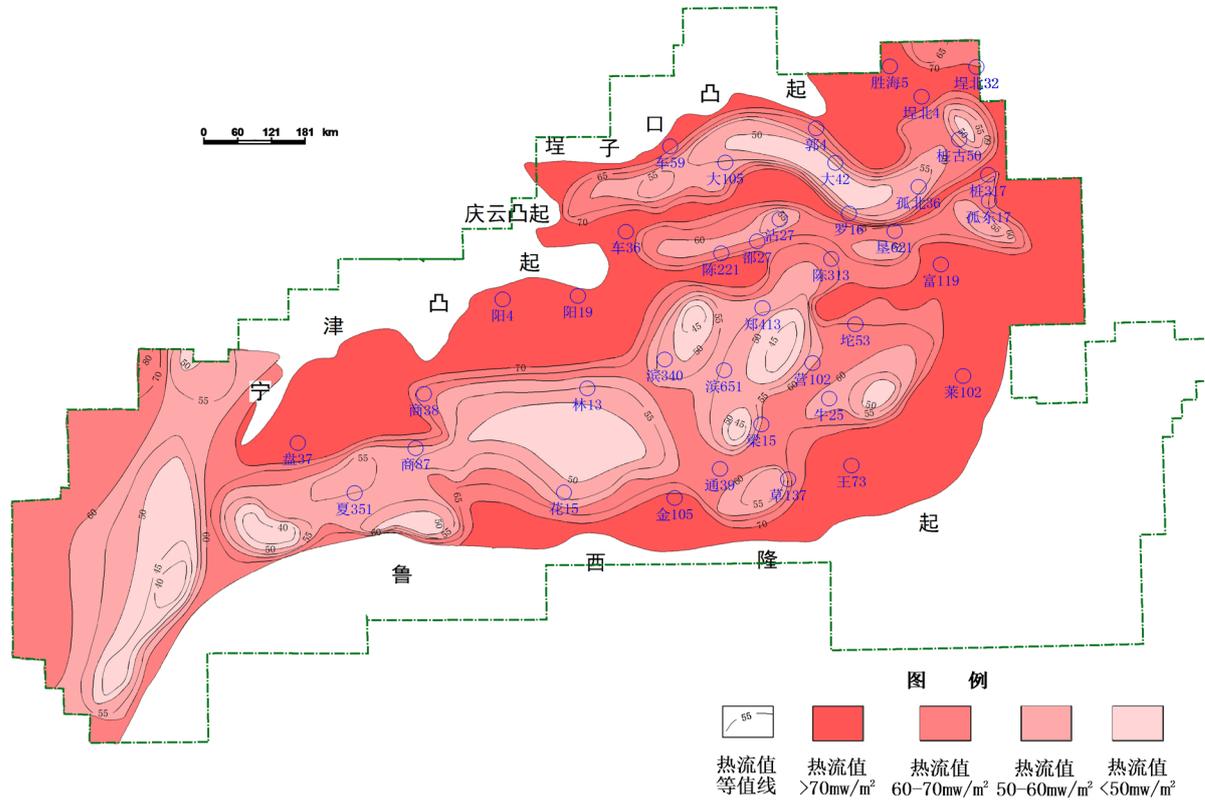


Figure 5. Distribution of terrestrial heat flow in Jiyang Depression
 图 5. 济阳坳陷大地热流值分布图

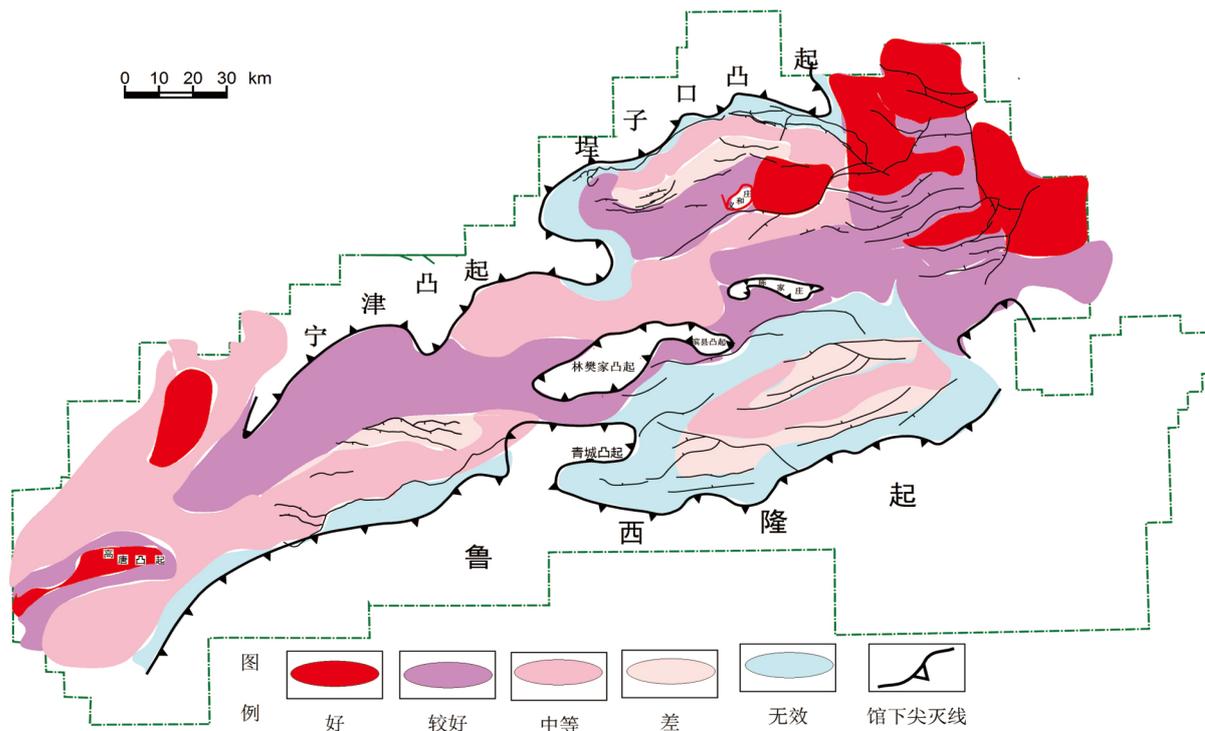


Figure 6. Rating of geothermal resources quality of of Ng geothermal reservoir in Jiyang Depression
 图 6. 济阳坳陷馆陶组地热资源质量分类评价图

4. 结论

对于非专业的地热资源行政管理者需要直观地得到某地地热资源优劣的信息, 也即地热资源质量, 本文参照一般的自然资源质量评价提出了“地热资源质量评价”的概念, 并提出了一种三元耦合的地热资源质量评价方法。

根据地热资源开发利用的主要影响因素, 采用单井产热功率、地热流体质量和大地热流三类参数建立了地热资源质量评价指标。经过在济阳拗陷的实际应用和验证, 该评价方法较好地反映了地热资源管理中对热储特征、经济效益和成本控制的需求, 为地热田管理运行提供了更准确的理论基础和技术支撑。

基金项目

中央高校基本科研业务费科技专项(16CX05003A)。

参考文献

- [1] 国家发改委, 国家能源局, 国土资源部, 等. 地热能开发利用“十三五”规划[R]. 2017.
- [2] 曹阳, 施尚明, 王玉华, 等. 地热资源综合评价方法[J]. 测井技术, 2000, 24(S1): 511-514.
- [3] Duan, Z.F., Pang, Z.H. and Wang, X.Y. (2011) Sustainability Evaluation of Limestone Geothermal Reservoirs with Extended Production Histories in Beijing and Tianjin, China. *Geothermics*, **40**, 125-135. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2011.02.001>
- [4] 孔维臻. 地热资源开发利用经济评价研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
- [5] 张延军, 朱成成, 余海, 等. 基于 GIS 和模糊逻辑的地热资源潜力评价[J]. 工程地质学报, 2016, 24(S1): 1173-1178.
- [6] 余臻胜. 旅游资源质量评价方法[J]. 中国统计, 2007(9): 13-14.
- [7] 丁冉, 肖伟华, 于福亮, 李传哲. 水资源质量评价方法的比较与改进[J]. 中国环境监测, 2011, 27(3): 63-68.
- [8] 姚赫男, 李艳, 曹宇. 基于 RS 和 GIS 的耕地资源质量评价——以浙江省富阳市为例[J]. 土壤, 2013, 45(4): 732-738.
- [9] 冯继广, 王景升, 姚帅臣, 等. 基于因子分析的森林资源质量综合评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(1): 27-32+42.
- [10] 陆云龙. 基于阵列声波测井的储层品质评价方法及应用[C]//中国石油学会(CPS), 国际勘探地球物理学家学会(SEG). CPS/SEG 北京 2018 国际地球物理会议暨展览电子论文集, 北京: CPS/SEG: 石油地球物理勘探编辑部, 2018: 4.
- [11] 施尚明, 朱焕来, 梁玉杰, 等. 沉积盆地型地热水资源定量评价体系的建立及应用[J]. 大庆石油学院学报, 2004, 28(5): 4-6+9-101.
- [12] Musa, D.A. and Chen H.-P. (2017) Sensitivity Analysis of Deep Geothermal Reservoir: Effect of Reservoir Parameters on Production Temperature. *Energy*, **129**, 101-113. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.091>
- [13] 李义曼, 庞忠和. 地热系统碳酸钙垢形成原因及量化评价[J]. 新能源进展, 2018, 6(4): 274-281.
- [14] 杨永红, 李义曼, 李晓燕, 等. 胜利油田采油污水综合特征及利用评价[J]. 工程地质学报, 2015, 23(5): 989-995.
- [15] 孙杰夫, 雷晓东, 李晨, 等. 北京昌平新城地区地热流体质量评价[J]. 城市地质, 2018, 13(3): 34-40.
- [16] 陈墨香. 华北地热[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 104-116.
- [17] 汪洋, 汪集旻, 熊亮萍, 等. 中国大陆主要地质构造单元岩石圈地热特征[J]. 地球学报, 2001, 22(1): 17-22.
- [18] 李晓燕, 赵铭海, 杨永红, 等. 济阳拗陷灰岩热储分布特征及资源潜力评价[J]. 工程地质学报, 2018, 26(4): 1105-1112.
- [19] 方宝明. 山东省地热资源综合信息远景预测[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2006.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2163-3967，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ag@hanspub.org