

地热热储温度方法研究

——以荆门城区为例

李庆喜, 陈尧尧, 张业昌, 张泽宇

湖北省地质局水文地质工程地质大队, 湖北 荆州

收稿日期: 2026年1月2日; 录用日期: 2026年2月5日; 发布日期: 2026年2月12日

摘 要

多年来, 国内外学者不断致力于地热热储温度的研究, 地热温标通常作为评价热储温度的首选方法。不同的温标方法计算的热储温度差异很大, 选择温标方法时, 一定要明确每一种温标方法的适用条件。利用Na-K-Mg三角图法, 确定荆门城区水-岩反应未达到平衡, 不能采用阳离子温标计算地热热储温度。探索应用PHREEQCI程序计算不同矿物的饱和指数, 发现石英达到平衡状态, 确定石英温标方法适合计算该地区热储温度。

关键词

地热温标, 热储温度, 水-岩反应, 荆门地热

Research on Methods for Geothermal Reservoir Temperature

—A Case Study of Jingmen Urban Area

Qingxi Li, Yaoyao Chen, Yechang Zhang, Zeyu Zhang

Hydrogeology and Engineering Geology Institute of Hubei Geological Bureau, Jingzhou Hubei

Received: January 2, 2026; accepted: February 5, 2026; published: February 12, 2026

Abstract

Over the years, scholars at home and abroad have been dedicated to the research on geothermal reservoir temperature. The geothermal thermometer is generally recognized as the preferred method for evaluating geothermal reservoir temperature. However, geothermal reservoir temperatures calculated by different geothermal thermometer methods often vary significantly. Thus, when select-

ing a geothermal thermometer method, the applicable conditions of each method must be clearly defined. By applying the Na-K-Mg triangular diagram method, it is determined that the water-rock reaction in Jingmen urban area has not reached equilibrium. Therefore, the cation geothermometer cannot be used to calculate the local geothermal reservoir temperature. We explore the use of the PHREEQCI program to compute the saturation indices of various minerals. It was found that quartz had achieved an equilibrium state. Consequently, the quartz geothermometer method is deemed suitable for determining the geothermal reservoir temperature in this region.

Keywords

Geothermal Thermometer, Geothermal Reservoir Temperature, Water-Rock Reaction, Jingmen Geothermal

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

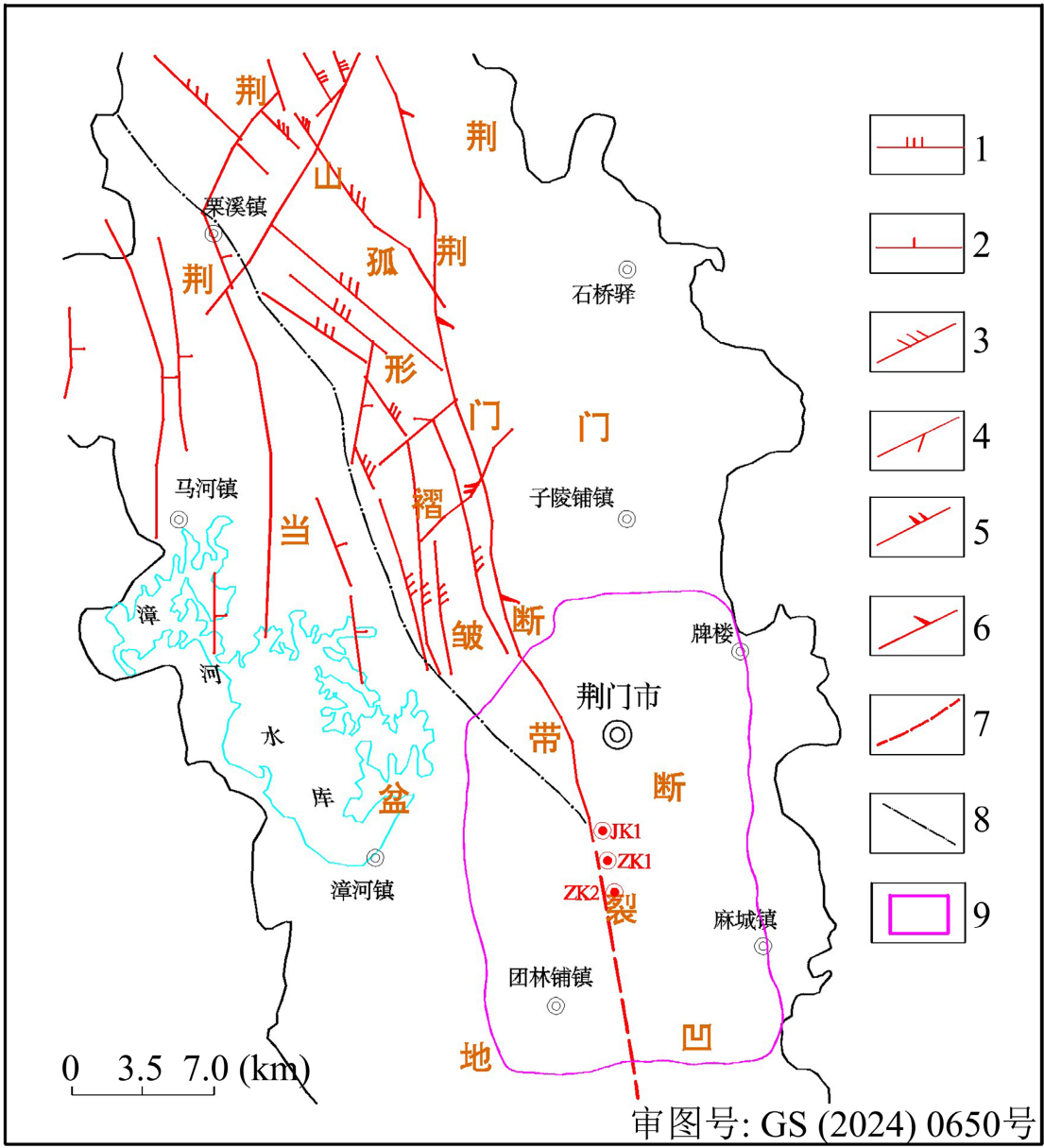
地热资源具有分布广泛、蕴藏量大、埋藏浅、易开发、运行成本低等特点。地热资源形成的要素包括热源、热储、盖层、通道和流体等。前人针对地热温度研究提出了多种地热温标方法：Bodvarsson [1] 依据冰岛天然热水的 SiO_2 浓度提出一个经验定性地热温标；Morey [2] 研究石英在溶液蒸汽压力下在水中溶解度，结合 Kennedy [3] 在更高温度下的研究结果，建立了石英溶解度与温度关系的理论模型，为石英温标奠定基础；Fournier [4] 指出石英传导型温标适用的温度区间为 $20^\circ\text{C}\sim 250^\circ\text{C}$ ，最佳适用范围为 $150^\circ\text{C}\sim 225^\circ\text{C}$ ，而在较低温条件下，主要成分为玉髓、 α -方英石或非晶质硅控制的可溶性 SiO_2 ；Fournier [5] 提出适用温度区间在 $20^\circ\text{C}\sim 330^\circ\text{C}$ 的 SiO_2 温标计算方法，可适用于计算无蒸汽分离或混合作用的情况下的热储温度；White [6] 最早发现 Na、K 成分含量与含水层温度之间的关系；Fournier [7] 提出了 Na-K-Ca 温标，通过经验公式关联地表水化学组分与热储温度；Fournier 和 Potter [8] 提出 Mg^{2+} 校正的 Na-K-Ca 温标，适用范围扩展至 $0^\circ\text{C}\sim 350^\circ\text{C}$ ，成为中低温地热系统评价的重要工具。

2. 区域地质概况

荆门城区在大地构造分区上处于扬子准地台的上扬子台坪的远安台褶束与钟祥台褶束的交界部位。从构造体系上划分，属于新华夏系第二沉降带江汉盆地西北缘与淮阳山字型构造前弧西翼的交接地带，二者呈交接、归并复合关系。荆门断裂是区内主控断裂，它控制了中-新生代盆地与槽地的展布。以荆门断裂为界，其东侧为荆门断凹，西侧为荆当向斜盆地，北部居中部位为荆山弧形褶皱带(图 1)。

3. 计算方法及适用条件

从理论上来说，只要受到温度影响和控制的化学反应中的化学组分都可用作地热温标。但作为温标方法，必须满足下列基本条件[9]：① 深部发生的反应只与温度有关；② 反应物必须充足；③ 在热储温度下，水-岩之间反应达到平衡；④ 水(气)由热储层向取样点运移的过程中没有发生再平衡，或者变化很小；⑤ 来自深部的热水没有与浅部的地下冷水相混合。目前，国内外研究较多的是二氧化硅温标和阳离子温标[10]。本文主要对比二氧化硅温标和阳离子温标的原理及应用条件，进而选取合适的温标方法进行热储温度估算。



淮阳山字型构造：1、压性断裂；2、张性断裂；3、压扭性断裂；4、张扭性断裂；
新华夏系构造：5、压扭性断裂；6、张扭性断裂；7、隐伏断裂；
其他：8、构造分区界线；9、工作区范围

Figure 1. Location map of the study area
图 1. 区域概况图

3.1. 二氧化硅温标

二氧化硅温标常用的方法主要有：无蒸汽散失的石英温标、100℃下蒸汽足量散失的石英温标，适用地下热储温度范围在 0℃~250℃之间，最佳温度范围为 150℃~225℃；玉髓温标，适用热储温度 < 110℃的中、低温地热田； α -方英石温标、 β -方英石温标及无定形二氧化硅温标，适用热储温度范围 0℃~250℃之间。二氧化硅温标的计算公式如下：

无蒸汽散失石英温标计算公式：

$$T = \frac{1309}{5.19 - \log \text{SiO}_2} - 273.15 \quad (1)$$

100℃下蒸汽足量散失石英温标计算公式:

$$T = \frac{1522}{5.75 - \log \text{SiO}_2} - 273.15 \quad (2)$$

玉髓温标计算公式:

$$T = \frac{1032}{4.69 - \log \text{SiO}_2} - 273.15 \quad (3)$$

α -方英石温标计算公式:

$$T = \frac{1000}{4.78 - \log \text{SiO}_2} - 273.15 \quad (4)$$

β -方英石温标计算公式:

$$T = \frac{781}{4.51 - \log \text{SiO}_2} - 273.15 \quad (5)$$

无定形二氧化硅温标计算公式:

$$T = \frac{731}{4.52 - \log \text{SiO}_2} - 273.15 \quad (6)$$

式中: T 为热储温度, °C; SiO_2 为水中二氧化硅浓度, mg/L。

3.2. 阳离子温标

阳离子温标基于阳离子(如 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+})交换作用, 主要包括: ① Na-K 温标, 适用于 150℃以上热水(尤其钻孔水); ② Na-K-Ca 温标, 用于富钙中低温热水(沸腾会使估算值偏高); ③ K-Mg 温标, 适用于低温地热(估算温度高于出水温度, 为钻探可及温度)。阳离子温标计算公式如下:

Na-K 温标计算公式:

$$T = \frac{1217}{1.483 + \log\left(\frac{N_a}{K}\right)} - 273.15 \quad (7)$$

式中: T 为热储温度, °C; N_a 和 K 分别为水中钠和钾离子的浓度, mg/L。

Na-K-Ca 温标计算公式:

$$T = \frac{1647}{\log\left(\frac{N_a}{K}\right) + \beta \left[\log\left(\frac{\sqrt{C_a}}{N_a}\right) + 2.06 \right] + 2.47} - 273.15 \quad (8)$$

式中: T 为热储温度, °C; N_a , K 和 C_a 分别为水中钠、钾和钙离子的浓度, mg/L; β 为系数, 有以下两种情况: ① 当 $T < 100^\circ\text{C}$ 时, $\beta = 4/3$; ② 当 $T > 100^\circ\text{C}$ 时, $\beta = 1/3$ 。

K-Mg 温标计算公式:

$$T = \frac{4410}{14.00 - \log\left(\frac{K^2}{M_g}\right)} - 273.15 \quad (9)$$

式中: T 为热储温度, °C; K 和 M_g 分别为水中钾和镁离子的浓度, mg/L。

4. 温标方法的选取和计算

4.1. 水化学特征

荆门城区地下水勘查施工的钻孔 ZK1、ZK2 和 JK1 均揭露了目标热储层：三叠系嘉陵江组(T_{1j})灰质白云岩、含白云质灰岩热储层，水化学分析结果见表 1。

Table 1. Chemical composition analysis of the hot water samples

表 1. 热水化学组分分析结果表

序号	化学组分/(mg)	ZK1	ZK2	JK1
1	K ⁺	15.25	15.33	10.00
2	Na ⁺	57.92	55.50	38.94
3	Ca ²⁺	473.89	449.79	341.23
4	Mg ²⁺	80.38	75.51	55.25
5	Cl ⁻	31.73	28.71	23.79
6	SO ₄ ²⁻	1235.49	1253.01	874.43
7	HCO ₃ ⁻	272.12	290.26	305.79
8	F ⁻	2.91	2.86	2.35
9	PO ₄ ³⁻	0.02	0.02	-
10	可溶性 SiO ₂	38.00	38.02	-
11	pH 值	7.57	7.55	7.61
12	总矿化度	2099.64	2069.90	1529.02

注：“-”为缺失数据。

从地下热水的水化学成分来看，该地热田的地下水按成因类型可划分为溶滤水，热储层为灰岩、白云岩，故 Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻ 离子较多，阳离子以 Ca²⁺为主，阴离子以 HCO₃⁻ 为主。地热流体总矿化度属于低矿化度热水，pH 值属于弱碱性水，地热流体水化学类型为 SO₄-Ca 型。钻孔地下水中的偏硅酸含量达到理疗热矿水标准浓度，属于硅酸水，具有一定的理疗价值。

4.2. 矿物 - 流体平衡判断

地热温标的使用有一个基本前提：作为地热温标的某种溶质或气体和热储中矿物达到了平衡状态。但在某些情况下，由于热储温度低、与浅部冷水混合作用或可能的化学反应，某些作为地热温标的化学组分并没有真正和矿物达到平衡。因此，必须认真研究热水和矿物的平衡状态、检验所使用地热温标的可靠性。常用的方法为 Na-K-Mg 三角图法和多矿物饱和度图解法。

4.2.1. Na-K-Mg 三角图法

Na-K-Mg 三角图法原理：Na、K 的平衡调整较缓慢，但是 K、Mg 含量的平衡调整很快，即使在温度较低时也如此。将三口井的 Na、K 和 Mg 离子的浓度转换为百分含量投影到 Na-K-Mg 三角图中，如图 2 可知：三口井地热流体实验数据全部落在“未成熟水”区域。这说明该地区地热流体水 - 岩反应温度不高，还未达到平衡。因此，不能采用阳离子温标来计算热储温度。

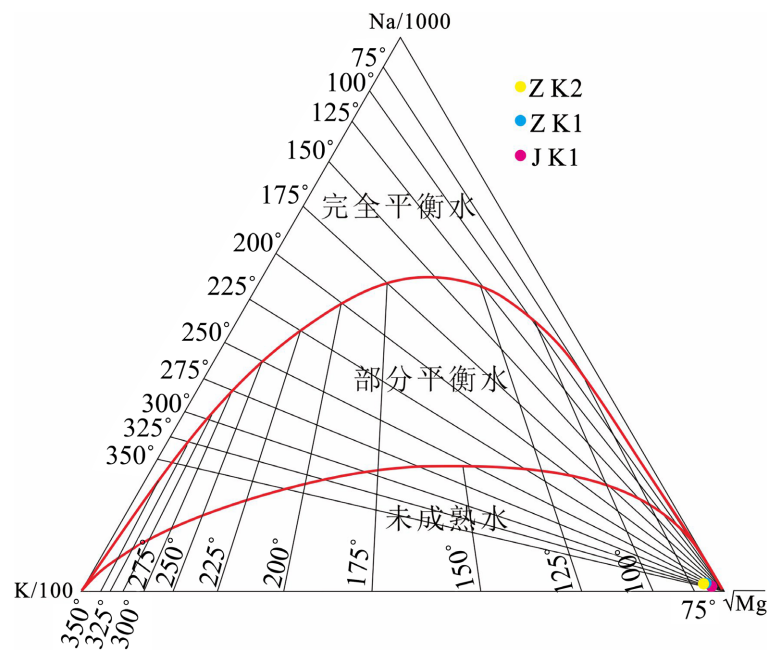


Figure 2. Triangular diagram for Na-K-Mg
图 2. Na-K-Mg 三角图

4.2.2. 多矿物饱和度图解法

多矿物饱和度图解法原理：将水中多种矿物的溶解状态当成温度的函数，若一组矿物在某一特定温度下同时接近平衡，则可判断热水与这组矿物达到平衡，平衡时的温度即为深部热储温度。采用 PHREEQCI 程序计算矿物的饱和指数(SI)，计算公式：

$$SI = \log \frac{Q}{K} = \log Q - \log K \tag{10}$$

式中：Q 为计算的离子活度积，mol/L；K 为平衡常数，mol/L。

当 SI > 0，表示过饱和；当 SI = 0，表示平衡状态；当 SI < 0，表示未饱和。利用水分析资料，采用 PHREEQCI 程序计算热水井各种矿物在不同的温度下的 SI，计算结果见表 2，方解石、白云石和石英饱和指数大于 0，表明这三种矿物处于过饱和状态。因此，石英温标可以用来计算荆门城区地热热储温度。

Table 2. Saturation index of minerals
表 2. 各矿物饱和指数

井名	硬石膏	石膏	方解石	白云石	玉髓	石英
ZK1	-0.24	-0.2	1.33	2.19	-0.43	0.08
ZK2	-0.26	-0.21	1.3	2.13	-0.42	0.07
JK1	-0.58	-0.39	1.12	1.78	-0.43	0.04

4.3. 石英温标确定热储温度

荆门城区三口地热井中，JK1 井为 2008 年~2009 年地热普查阶段施工的钻孔，由于年代较久远，有部分水分析资料缺失；ZK1 和 ZK2 两口井为 2015 年荆门城区地下水勘查施工的钻孔，水分析资料相对较全。因此，在地热热储温度计算中，采用 ZK1 和 ZK2 两口井水分析资料计算，计算结果见表 3。从表

3 中可知, 玉髓地热温标计算结果为 58.66℃, 比两口井的井口水温稍高, 指示的是荆门城区深部热储的最低温度; 而石英温标计算结果为 89.43℃, 指示的则是热储可能的最高温度。

Table 3. The calculated result of geothermal reservoir temperature
表 3. 热储温度计算结果

井名	孔深 (m)	热储 层位	热储 岩性	SiO ₂ (mg/L)	井口水温 (℃)	玉髓温标计算结果 (℃)	石英温标计算结果 (℃)
ZK1	641.88	T _{ij}	灰质白云岩	38.00	50.20	58.66	89.43
ZK2	769.55	T _{ij}	灰质白云岩	38.00	49.20	58.66	89.43

5. 结论

无论采用二氧化硅温标还是阳离子温标方法计算热储温度, 首先必须判断矿物-流体平衡。

采用 Na-K-Mg 三角图方法, 发现荆门城区地热流体实验数据全部落在“未成熟水”区域, 说明该地区水-岩反应未达到平衡或热水由断裂向地表上升的过程中受到浅层冷水的混合, 不能采用阳离子温标计算地热热储温度。

利用地热流体水质分析数据结合多矿物饱和度图解方法, 确定石英达到平衡状态, 采用石英温标计算得到热储温度为 89.43℃。

参考文献

- [1] Shortall, R., Davidsdottir, B. and Axelsson, G. (2015) Geothermal Energy for Sustainable Development: A Review of Sustainability Impacts and Assessment Frameworks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **44**, 391-406. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.020>
- [2] Gunnarsson, I. and Arnórsson, S. (2000) Amorphous Silica Solubility and the Thermodynamic Properties of H₄SiO₄ in the Range of 0° to 350°C at P_{sat}. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **64**, 2295-2307. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00426-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00426-3)
- [3] Dosenovic, P., von Boehmer, L., Escolano, A., Jardine, J., Freund, N.T., Gitlin, A.D., et al. (2015) Immunization for HIV-1 Broadly Neutralizing Antibodies in Human Ig Knock-In Mice. *Cell*, **161**, 1505-1515. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2015.06.003>
- [4] Lavergne, T., Malyshev, D.A. and Romesberg, F.E. (2011) Major Groove Substituents and Polymerase Recognition of a Class of Predominantly Hydrophobic Unnatural Base Pairs. *Chemistry—A European Journal*, **18**, 1231-1239. <https://doi.org/10.1002/chem.201102066>
- [5] Aref Lashin, (2012) The Geothermal Potential of Jizan Area, Southwestern Parts of Saudi Arabia. *International Journal of the Physical Sciences*, **7**, 664-675. <https://doi.org/10.5897/ijps11.1369>
- [6] Srinivasamoorthy, K., Vasanthavigar, M., Vijayaraghavan, K., Sarathidasan, R. and Gopinath, S. (2011) Hydrochemistry of Groundwater in a Coastal Region of Cuddalore District, Tamilnadu, India: Implication for Quality Assessment. *Arabian Journal of Geosciences*, **6**, 441-454. <https://doi.org/10.1007/s12517-011-0351-2>
- [7] Soulsby, C., Malcolm, I.A. and Youngson, A.F. (2001) Hydrochemistry of the Hyporheic Zone in Salmon Spawning Gravels: A Preliminary Assessment in a Degraded Agricultural Stream. *Regulated Rivers: Research & Management*, **17**, 651-665. <https://doi.org/10.1002/rrr.625>
- [8] Trabelsi, S., Makni, J., Bouri, S. and Dhia, H.B. (2014) Hydrochemistry of Thermal Waters in Northeast Tunisia: Water-Rock Interactions and Hydrologic Mixing. *Arabian Journal of Geosciences*, **8**, 1743-1754. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1293-2>
- [9] 袁飞, 杨波涌, 付强, 等. 恩施盆地北部小龙潭地热田水化学特征及成因研究[J]. 资源环境与工程, 2022, 36(3): 337-343.
- [10] Luigi, M., Monia, P. and Carmine, A. (2022) Through a Glass, Darkly: Trying to Understand Geothermal Systems by Means of Geothermometers and f_{CO2}-Indicators. *Journal of Geochemical Exploration*, **243**, Article ID: 107097. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2022.107097>