

文章编号:1673-9469(2009)03-0054-05

地热温标在地热系统中的应用研究

王皓, 柴蕊

(煤炭科学研究总院西安研究院 水文所, 陕西 西安 710054)

摘要:在地热系统中,地热温标通常被用来评价地下热储温度,但是如果作为地热温标的化学组分在热储内部没有达到平衡,则估算出的热储温度往往与实际温度相差很远。本文以平顶山八矿地下热水为例,通过 Na-K-Mg 三角图及以 WATCH 程序等建立起来的多矿物平衡图在地热系统中的运用,对地热系统中矿物和流体的化学平衡做出了定量和定性的判断,从而为地热温标的选取提供依据。

关键词:地热温标;水岩平衡;热储温度;地下热水;平顶山八矿

中图分类号: TU111

文献标识码: A

Application of geothermometers in the geothermal system

WANG Hao, CHAI Rui

(Institute of Hydrogeology of Xi'an Research Institute, CCRI, Shanxi Xi'an 710054, China)

Abstract: The geothermometer is usually used to calculate the deep temperatures of geothermal reservoirs in the geothermal system, but if the chemistry component is not balanceable in the geothermal reservoirs, the equilibrium temperature of the deep reservoir estimated by the geothermometer is not true. Taking thermal groundwater of the eighth coal mine in Pingdingshan for example, both the Na-K-Ca diagram and the lg(Q/K) figure are employed to exam the mineral-fluid equilibrium state qualitatively and quantificationally, which may lay a theoretical foundation for the choice and application of geothermometers.

Key words: geothermometer; water-rock equilibrium; temperature of geothermal reservoirs; thermal groundwater; the eight coal mine in Pingdingshan

在热水地球化学的研究中,深部热储层温度的估算是一个至关重要的问题。确定热储温度的方法有直接测量法和算法法两种。直接法是指根据钻井揭露或穿透热储层,直接测量井中的温度,用顶、底板温度的平均值作为热储的温度。这种方法准确可靠,但是耗时、价高,在实际工作中不太容易实现,因此大多数情况下,多采用算法法对热储温度进行估算^[1]。其中,应用最广泛的就是地球化学温标法,这是一种经济有效的手段。但是,通过在工程实际中的应用情况来看,直接利用传统地球化学温标估算出的热储温度往往与实际温度相差甚远,应用效果较差。这主要是因为地

热温标的使用有一个基本前提,那就是作为地热温标的某种溶质或气体和热储中的矿物达到了平衡状态。这是因为热水溶液在向上运移的过程中会因沸腾、蒸汽逃逸改变热流体化学组分含量,或者深部热储层的热水与浅层冷水的稀释混合会使原有的高温平衡环境遭到破坏。而各种温标的经验公式都是利用水溶液中相应组分的平衡反应与温度的关系确立起来的。所以必须认真研究热水和矿物的平衡状态,选取可靠的地热温标。本文以平顶山八矿为例,利用 WATCH 程序以及 Na-K-Mg 平衡图来研究矿物-流体的平衡状态,为地热温标的选取以及在实际工程中的应用提供实例。

收稿日期:2009-03-25

作者简介:王皓(1981-),男,江苏连云港人,硕士,从事水文地质方面的研究。

1 模拟区概况

平顶山矿区位于河南省中西部,是一个遭受热害威胁的矿区,井下热水突出,工作面气温偏高。区内平均地温梯度约为 $3.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,比邻区高,也高于华北地台的正常地温梯度($3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)。本区恒温带深度(h)为 25m 左右,温度(t)为 17.2°C 。

八矿位于平顶山矿区开采的深部边界,其深度至李口集向斜南翼轴部,几个突水点的水温在 $29.5^{\circ}\text{C} \sim 47^{\circ}\text{C}$ 。八矿地表标高为 100m ,地下水位为 -430m ,即埋深(H)为 530m ,水温($t_{\text{热}}$)为 47°C 。利用下式计算地温梯度。

$$K = (t_{\text{热}} - t)/(H - h) = (47 - 17)/(530 - 25) = 6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$$

这个结果比平顶山矿区常规下的地温梯度 $3.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 要大得多。根据这一情况,将八矿确定为地热异常区。通过分析,认为该地热异常与地下水循环有关,而且根据水循环对围岩温度场的影响规律,可以确定是高温热水上行循环的结果^[2]。

2 常用地热温标

水热系统里的对流循环运动总是伴随着各种物质的溶解-沉淀反应,如果某种反应产生的平衡浓度值和反应的温度有关,就可以根据这一浓度来反推反应温度,建立在这一原理基础上的估算地下温度的方法称之为地热地球化学温标^[1]。地球化学温标用于评价热储温度以及预测热储在生产过程中可能的冷却。

目前,采用的地热温标大体可以分为两类,一类是硅温标,像石英、玉髓等这些矿物,溶解度是温度的函数,可以直接用作地热温标;另一类是阳离子温标,如 Na/K 、 K/Mg 、 $\text{Na}-\text{K}-\text{Ca}$ 等,其在水中溶解组分比例的交换反应依赖于温度,可以用这些组分的比值来做为地热温标^[3]。

2.1 SiO_2 温标

SiO_2 温标是目前被广泛用于推算地下热储温度的一种方法,它是基于水溶液中硅的浓度是由

水-岩相互作用时的温度下硅的溶解性决定的^[4]。天然水中溶解的 SiO_2 一般不受其它离子的影响,也不受络合物的形成和挥发散失的影响,并且沉降随温度降低而降低的速度相当缓慢,因此在地表水中硅的浓度能很好地指示地下热储的温度^[1]。硅的总浓度是温度的函数。不同的等式表明这种函数是基于实验室试验数据、测量数据以及地热系统中不同井中热水的硅浓度的数学过程。研究表明,石英传导温标可以说明该部分地下热水曾经达到过的最高温度。

$$\text{石英温标: } T = 1309 / (5.19 - \lg \text{SiO}_2) - 273.15$$

$$\text{玉髓温标: } T = 1032 / (4.69 - \lg \text{SiO}_2) - 273.15$$

2.2 阳离子温标

阳离子地热温标是基于热水与固相物质间的 K 、 Na 、 Ca 、 Mg 等阳离子的交换与温度的关系建立起来的。所有阳离子温标方法都是经验性的近似方法^[5],被广泛的用于热储温度的评价。常用的有 $\text{Na}-\text{K}$ 温标、 $\text{K}-\text{Mg}$ 温标等。

$\text{Na}-\text{K}$ 温标: $\text{Na}-\text{K}$ 温标是以热矿水中钠、钾离子与钠长石偶的离子交换平衡受控于温度的原理建立起来的,在具备钠、钾长石平衡环境的天然水中, Na 、 K 的含量比值是温度的函数。适合的温度是 $25^{\circ}\text{C} \sim 250^{\circ}\text{C}$ ^[5]。

$$\text{Na}-\text{K} \text{ 温标: } t = \frac{933}{\log(\text{Na}/\text{K}) + 0.993} - 273.15$$

$\text{K}-\text{Mg}$ 温标: $\text{K}-\text{Mg}$ 温标是基于钾长石转变为白云母和斜绿石的离子交换反应,其对于温度的变化反应非常迅速,在溶液中达到平衡也最为快速,因此,它适用于低温热水系统^[6]。

$$\text{K}-\text{Mg} \text{ 地热温标: } t = \frac{4410}{14.0 - \log\left(\frac{\text{K}^2}{\text{Mg}}\right)} - 273.15$$

3 地热温标的选取

3.1 热储温度的计算

本文选取了平顶山八矿 5 个钻孔的热水水样进行了水化学分析测试,其水化学成分分析结果见表 1。

利用上述各种地热温标方法对这些热水水样数据进行初步的热储温度估算,估算结果见表 2。

表 1 热水水样水化学成分表
Tab. 1 Chemical composition of the hot water samples

编号	水化学成分/mg·L ⁻¹								
	K ⁺ + Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SiO ₂	TDS	PH
1	143	67.10	30.20	61.30	191.60	388.10	25.0	882.1	7.1
2	143	69.14	29.17	62.75	155.90	390.50	24.0	855.4	7.1
3	144.9	68.10	29.50	61.30	194.00	300.10	24.4	805.9	7.05
4	130.6	61.12	30.30	58.50	205.17	373.42	24.0	888.2	7.05
5	135.7	66.13	29.17	58.50	206.03	384.41	25.2	908.6	7.5

表 2 不同地热温标对八矿地下热储温度的估算表

Tab. 2 Temperature of geothermal reservoirs calculated by various geothermometers

温标	石英温标 /°C	玉髓温标 /°C	Na-K 温标 /°C	K-Mg 温标 /°C
温度	73.4	40.6	222.7	121.30

从表 2 可以看出,由于温标方法众多,水溶液中达到平衡的矿物尚不清楚,再加上相关干扰因素的影响,对于同一水点来说,不同的温标方法计算出的热储温度常常差异很大。说明任何温标在没有达到平衡状态的情况下必然无法给出正确的结果。这就需要寻找其他化学分析方法进行更深入的分析、筛选,确定达到水-岩平衡的矿物,选取合适的温标方法,最后确定热储的温度范围。

3.2 矿物-流体平衡判断

地热流体中溶解物的浓度是热储温度的函数。从理论上讲,受温度控制的化学反应中的组分都可以用来做地热温标。但是,作为地热温标方法,还须满足以下基本条件:(1)反应物必须充足;(2)水-岩之间必须达到平衡;(3)水(气)向取样点运移的过程中没有发生再平衡。因此,必须研究热水和矿物的平衡状态以检验地热温标方法的可靠性。

Na-K-Mg 三角图法。Na-K-Mg 三角图由 Giggensbach 于 1988 年提出,在图中分为完全平衡、部分平衡和未成熟水 3 个区域,常被用来评价水-岩平衡状态和区分不同类型的水样。其应用原理是,钠、钾的平衡调整较缓慢,但钾、镁含量的平衡调整的很快,即使在温度较低时亦如此,因此对 中低热田热储温度的计算较为有利。

三角图中的坐标可以计算如下

$$S = C_{Na} / 1000 + C_K / 100 + C_{Mg^{2+}}$$

$$Na\% = C_{Na} / 10S$$

$$K\% = C_K / S$$

$$Mg\% = 100 \sqrt{C_{Mg^{2+}} / S}$$

式中 C_{Na^+} , C_{K^+} , $C_{Mg^{2+}}$ 分别代表水中钠,钾和钙离子的浓度,单位为 mg/L。

此方法优点在于可在同一幅图上同时判断出大量水样的平衡状态,能把混合水和平衡水很好地分开。

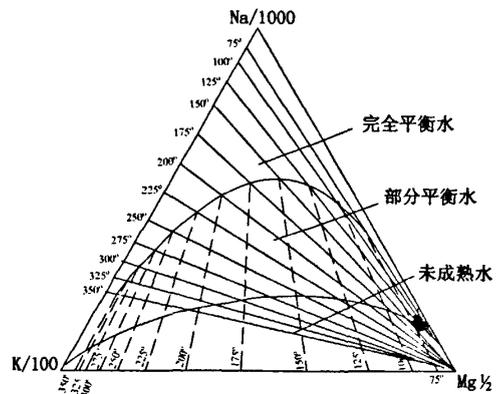


图 1 八矿地下热水的 Na-K-Mg 三角图

Fig. 1 Diagram of Na-K-Mg of the water samples in eight mine

通过图 1 中的 Na、K 以及 Mg 含量的分析数据,可以判断水样是否适合应用离子型溶解性地温计。图中水样点均落在 Partial equilibrated waters 的范围内,即为部分平衡水。反映了水-岩反应的平衡温度偏低,水样不能完全达到平衡,也说明了八矿的地下热水可能来自较热的环境,在由热水向地表上升的过程中受到浅层冷水的稀释作用,从而使热水中元素的含量变低。通过对八矿热水沉淀物成分的分析得知,热水在向上运移的过程中混入了煤系砂岩水,印证了这一结论。因此,阳离子型地温计不会得出合理的平衡温度值的,八矿不适合用阳离子型地温计来计算深部热水温度。

多矿物平衡法。多矿物平衡图解法用来判断地热系统中热液与矿物之间总体的化学平衡状态。其原理是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了平衡,平衡时温度即为深部热储温度^[7]。

用 WATCH 程序计算出的矿物-溶液的平衡数据,可判断出已达到平衡的矿物。WATCH 程序可以利用地下热流体水质分析数据,通过计算深层水中水溶物种的活度系数,模拟出地热流体中的化学成分和物种的形成,并进一步模拟出水中溶解矿物的情况。

结合收集到的八矿地下热水的水质资料,应用 WATCH 程序计算矿物的饱和程度。饱和指数 SI 可判断每种矿物的饱和程度, $SI > 0$, 表示过饱

和; $SI = 0$, 表示饱和; $SI < 0$, 表示未饱和。

$$SI = \log Q - \log K = \log\left(\frac{Q}{K}\right)$$

式中 K - 矿物在地下热水中的溶解度 (mol/L); Q - 实际溶解在地下热水中的矿物的离子活度积 (mol/L)。

在 WATCH 程序计算出各矿物在不同温度下的 $\log(Q/K)$ 值后,以温度为横坐标, $\log(Q/K)$ 值为纵坐标,作出表示矿物-溶液的平衡状态的 $T - \log(Q/K)$ 曲线图。我们选取了常见的 5 种矿物(硬石膏、温石棉、玉髓、石英、滑石),做出其 $T - \log(Q/K)$ 曲线图。从图 2 中可以看出,在这五种矿物中只有玉髓和石英的饱和指数在平衡线之上,其余蚀变矿物均未达饱和状态。而石英处于过饱和状态,只有玉髓接近平衡状态。因此也证

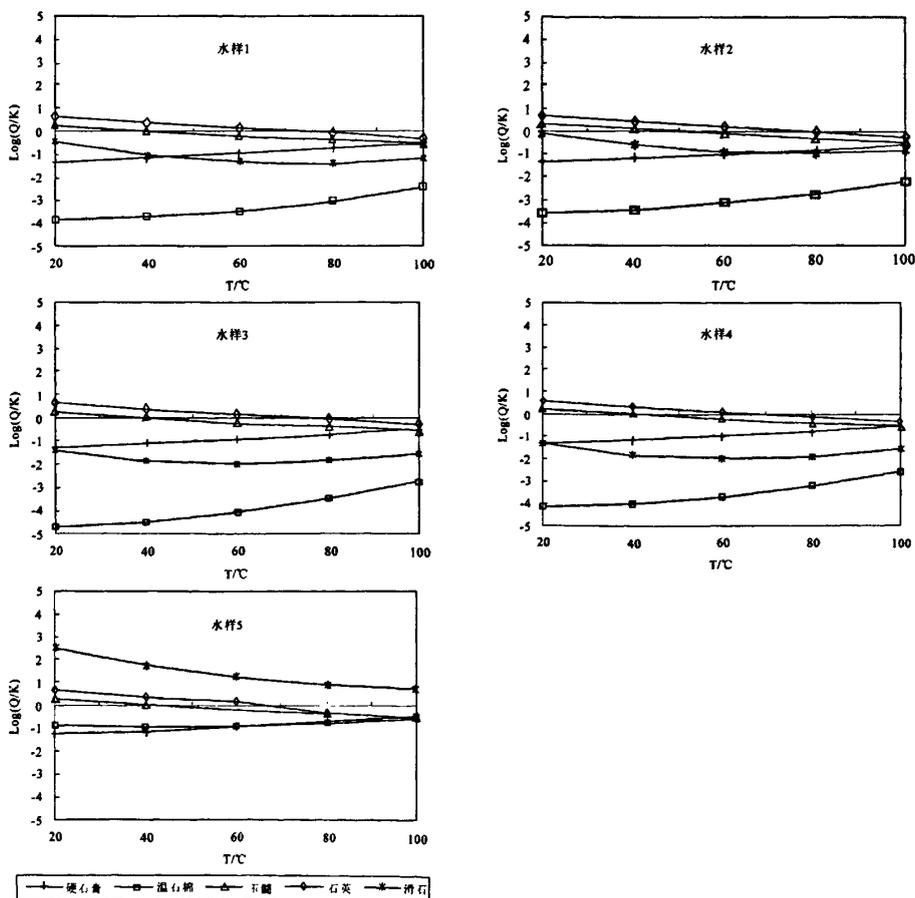


图2 各水样溶解矿物的 $T - \log(Q/K)$ 曲线图
Fig. 2 Diagram of $\lg(Q/K)$ of mineral dissolved in the water samples

实了玉髓地热温标是最适合估算该矿区热水温度的地热温标,而从不严格的意义上讲,石英温标给出的温度是深层热储的最高温度。

4 热储温度的确定和验证

通常,若某种矿物在水溶液中达到了平衡,这种矿物的平衡曲线和 $SI = 0$ 轴的交点对应的温度就是它的理论平衡温度,交点周围一个较小的温度区间就是热储中的平衡温度,这种矿物可作为该热储的地热温标。玉髓的平衡曲线与 $SI = 0$ 轴交点的温度对应应在 $40^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 间,表示为该热储的平衡温度;石英的平衡曲线与 $SI = 0$ 轴交点的温度对应应在 $70^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ 间,则反映出该区深层热储的最高温度。

实测平顶山矿区恒温带深度为 25m, 温度 17.2°C , 东部地区地温梯度为 $4^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 代入热水的循环深度公式中得

$$H = q(t_H - t_B) + h$$

式中 H - 循环深度, 单位 m; t_B - 恒温带温度, 单位 $^{\circ}\text{C}$; t_H - 热水深部最高温度, 单位 $^{\circ}\text{C}$; q - 地温梯度, 单位 $^{\circ}\text{C}/100\text{m}$; h - 恒温层厚度, 单位 m。

计算得出八矿地下水的循环深度为 1 425m, 这个深度与李口集向斜轴部灰岩最大深度基本吻合。

八矿距地表 600 多米 (-430m 水平) 处, 温度是 47°C 左右, 而在深度 1 425m 处具有 73.4°C 的高温, 东风井等出水点水温为 36°C 左右, 说明深部热水在上升过程中还有温度偏低水的混入。再次印证了 Na - K - Mg 三角图得出的结论。

5 结论

1) 地热温标法目前广泛应用在地热勘探工作

中, 但是任何温标在使用前都要进行水岩平衡判断, 不能直接应用。

2) 利用 Na - K - Mg 平衡图可以来评价水样的平衡状态。当大部分水样未达到平衡, 不能用阳离子地热温标估算热储温度。

3) 利用热流体水质分析数据可以由 WATCH 程序计算出的矿物 - 溶液的平衡数据, 从而判断出已达到平衡的矿物, 进而来估算地下热储的温度。

4) 无论是 WATCH 程序还是 Na - K - Mg 平衡图, 都可以用来评价地热系统中水 - 岩平衡状态, 但在实际工作中, 要将这些方法结合起来, 互相对比, 互相验证, 互相补充。

(5) 玉髓地热温标是最适合估算该矿区深部热水温度的地热温标, 该区深部热储温度为 $40^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 。

参考文献:

- [1] 柳春晖. 白庙温泉、赤城温泉及塘子庙温泉的水化学及同位素研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2006.
- [2] 张发旺, 王贵玲, 侯新伟, 等. 地下水循环对围岩温度场的影响及地热资源形成分析[J]. 地球学报, 2000, 21(2): 142 - 146.
- [3] 郑西来, 刘鸿俊. 地热温标中的水 - 岩平衡状态研究[J]. 西安地质学院学报, 1997, 18(1): 74 - 79.
- [4] 于 濂. 北京城区地热田地下水的水化学及同位素研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2005.
- [5] 汪集暘, 熊亮萍, 庞忠和. 中低温对流地热系统[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [6] 吴红梅, 周立岱, 郭 宇. 阳离子温标在中低温地热中的应用研究[J]. 黑龙江科技学院学报, 2006, 16(1): 27 - 30.
- [7] 王 莹, 周 训, 于 濂, 等. 应用地热温标估算热储温度[J]. 现代地质, 2007, 21(4): 605 - 612.

(责任编辑 刘存英)

作者: [王皓](#), [柴蕊](#), [WANG Hao](#), [CHAI Rui](#)
作者单位: [煤炭科学研究总院西安研究院水文所](#), 陕西, 西安, 710054
刊名: [河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 
英文刊名: [JOURNAL OF HEBEI UNIVERSITY OF ENGINEERING \(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)
年, 卷(期): 2009, 26(3)
被引用次数: 1次

参考文献(7条)

1. 柳春晖. 白庙温泉、赤城温泉及塘子庙温泉的水化学及同位素研究[学位论文] 2006
2. 张发旺;王贵玲;侯新伟. 地下水循环对围岩温度场的影响及地热资源形成分析[期刊论文]-[地球学报](#) 2000(02)
3. 郑西来;刘鸿俊. 地热温标中的水-岩平衡状态研究 1997(01)
4. 于媛. 北京城区地热田地下水的水化学及同位素研究 2005
5. 汪集旸;熊亮萍;庞忠和. 中低温对流地热系统 1993
6. 吴红梅;周立岱;郭宇. 阳离子温标在中低温地热中的应用研究[期刊论文]-[黑龙江科技学院学报](#) 2006(01)
7. 王莹;周训;于媛. 应用地热温标估算热储温度[期刊论文]-[现代地质](#) 2007(04)

本文读者也读过(10条)

1. [王奎峰](#). [WANG Kui-feng](#) 山东省聊城市东部地热田地热资源特征[期刊论文]-[中国地质](#)2009, 36(1)
2. [赵玉祥](#). [李常锁](#). [邢立亭](#). [ZHAO Yu-xiang](#). [LI Chang-suo](#). [XING Li-ting](#) 济南北部地热田的成生条件[期刊论文]-[济南大学学报\(自然科学版\)](#) 2009, 23(4)
3. [赵刚](#). [马文娟](#). [王军](#). [何案华](#). [ZHAO Gang](#). [MA Wen-juan](#). [WANG Jun](#). [HE An-Hua](#) 我国地热前兆观测台网的现状及对汶川地震的响应[期刊论文]-[地震研究](#)2009, 32(3)
4. [赵刚](#). [王军](#). [何案华](#). [郭藐西](#). [郭柏林](#). [秦久刚](#). [ZHAO Gang](#). [WANG Jun](#). [HE An-hua](#). [GUO Miao-xi](#). [GUO Bo-lin](#). [Qing Jiu-gang](#) 地热正常动态特征的研究[期刊论文]-[地震](#)2009, 29(3)
5. [孙颖](#). [许辉熙](#). [刘久荣](#). [薛万蓉](#). [何政伟](#). [张院](#) 中低温地热田的地热资源计算评价——以北京市小汤山地热田为例[期刊论文]-[安徽农业科学](#)2009, 37(14)
6. [龚革联](#). [李盛华](#). [孙卫东](#). [郭锋](#). [夏斌](#). [吕宝凤](#). [GONG Ge-Lian](#). [LI Sheng-Hua](#). [SUN Wei-Dong](#). [GUO Feng](#). [XIA Bin](#). [L\(U\) Bao-Feng](#) 石英热释光——沉积盆地热史研究中另一种潜在的古温标[期刊论文]-[地球物理学报](#)2010, 53(1)
7. [柴蕊](#). [CHAI Rui](#) 平顶山八矿地热温标的选取及热储温度估算[期刊论文]-[煤田地质与勘探](#)2010, 38(1)
8. [徐纪人](#). [赵志新](#). [石川有三](#). [XU Ji-Ren](#). [ZHAO Zhi-xin](#). [Ishikawa Yuzo](#) 青藏高原中南部岩石圈扩张应力场与羊八井地热异常形成机制[期刊论文]-[地球物理学报](#)2005, 48(4)
9. [周安朝](#). [赵阳升](#). [郭进京](#). [张宁](#). [ZHOU Anchao](#). [ZHAO Yangsheng](#). [GUO Jinjing](#). [ZHANG Ning](#) 西藏羊八井地区高温岩体地热开采方案研究[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#)2010, 29(z2)
10. [柯柏林](#). [KE Bai-lin](#) 北京城区地热田西北部地热地质特征[期刊论文]-[现代地质](#)2009, 23(1)

引证文献(1条)

1. [王海波](#). [薛晓青](#). [邵景力](#). [李江](#) 内蒙古临河市地热田水化学研究[期刊论文]-[内蒙古农业大学学报\(自然科学版\)](#) 2013(1)