

固定铝 $\log(Q/K)$ 图解在温泉中的应用

张展适^{1,2}, 孙占学², 李满根², 王素娟²

1. 南京大学地球科学系, 江苏南京 210093

2. 东华理工学院地球科学与资源信息管理系统, 江西抚州 344000

摘要: 为探讨常规和固定铝 $\log(Q/K)$ 图解法对温泉系统是否有效, 采用 WATCH 程序, 对江西 3 个温度较高的温泉, 即庐山温泉、汤湖温泉和横泾温泉, 进行了探测性的研究. 采用常规 $\log(Q/K)$ 图解法计算时, 由于参加计算的 4 个水样的铝含量均未检出, 计算结果显示只有不含铝的矿物玉髓和方解石相交于温度 100 °C 附近, 热储总体上没有达到平衡. 在采用了固定铝 $\log(Q/K)$ 图解法并同时考虑冷水的稀释作用计算后, 中低温地热系统中常见的蚀变矿物如浊沸石、纤蛇纹石、萤石和玉髓均显示了较好的收敛性, 收敛的温度大致在 100~140 °C. 并且上述矿物组合可见于某些温泉的深部钻孔中, 计算结果与实际地质情况相吻合. 结果表明固定铝 $\log(Q/K)$ 图解法可以恢复温泉系统的热平衡状态.

关键词: 固定铝; WATCH 程序; $\log(Q/K)$ 图解; 温泉.

中图分类号: P314.1

文章编号: 1000-2383(2004)03-0352-05

收稿日期: 2003-09-29

Application of Fixed-Al Modified $\log(Q/K)$ Graph in Hot Spring System

ZHANG Zhan-shi^{1,2}, SUN Zhan-xue², LI Man-gen², WANG Su-juan²

1. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2. Department of Geosciences and Geomatics, East China Institute of Technology, Fuzhou 344000, China

Abstract: A comparative study was conducted to probe the feasibility of conventional and fixed-Al modified $\log(Q/K)$ graph on hot spring system. Lushan hot spring, Tanghu hot spring and Hengjing hot spring in Jiangxi Province were selected to reconstruct the reservoir equilibrium by $\log(Q/K)$ graph, and all the calculation were carried out by WATCH program. Due to the lack of Al in the water analytical data, only chalcedony and calcite intersected around 100 °C in normal $\log(Q/K)$ graph. So no equilibrium status or temperature could be reconstructed by this method. Calculated by the method by combining the fixed-Al method with the mixing factor, minerals association of laumontite, chrysotile, fluorite and chalcedony converged around 100–140 °C in fixed-Al modified $\log(Q/K)$ graph, which means the equilibrium status could be successfully reconstructed. These mineral assembles occurred in the borehole of Tanghu hot spring field. The calculating result corresponds with the real hot spring system, which might infer that the fixed-Al $\log(Q/K)$ graph could be used to reconstruct the reservoir equilibrium in hot spring system.

Key words: fixed-Al; WATCH program; $\log(Q/K)$ graph; hot spring.

温泉作为一种热能水, 温度是其重要的利用指标, 在某种程度上温度决定温泉的利用价值, 准确地确定深部热储的温度是地热资源评价的主要任务之一. 确定热储温度的方法有很多, 其中最主要的是地球化学方法, 如地热温标法、混合模型法及矿物饱和指数法等都是常用的地球化学方法. 这些方法应用

的基本前提是要求热储内部的化学反应达到平衡, 因此对于高温热田的应用非常成功 (Arnórsson, 2000).

对于中低温地热系统的研究远远不及高温地热系统, Zhang(2001)选择冰岛 Bakki 低温温泉系统, 采用矿物饱和指数法获得了 120~160 °C 的深部热

储平衡温度. Pang (1996)、Pang and Reed (1998)选择世界及我国一些典型的中低温地热系统采用固定铝(fixed-Al)方法做了一些开创性的工作,研究结果表明在中等温度(150 ℃)条件下绝大多数矿物也能达到平衡.但对我国大量的中低温地热系统,特别是温泉系统采用矿物饱和指数法开展的研究工作就更少,Sun(1998)、孙占学和吴红梅(1999)选择江西的几个典型温泉做了一些对比工作,结果表明江西大部分温泉水并未达到平衡,往往只有少数几种矿物(如方解石、文石、石英、玉髓)达到局部平衡,根据矿物饱和指数方法并未能得到深部热储的温度.但应用 SiO₂ 地热温标,Zhang(1999)估算了江西横泾地区若干温泉的热储温度.张展适等(2003)选择江西温度最高的汤湖温泉就矿物饱和指数法对中低温温泉系统的适用性作了进一步的探讨,研究结果表明,由于化学分析无法获得准确的铝含量(分析结果中铝含量为 0),采用常规的化学平衡法同样不能获得平衡温度.但根据前人的研究成果和思路:在常见的地热系统中总是有 2 种以上的含铝硅酸盐矿物达到了平衡,采用 SOLVEQ 程序固定铝方法(Spycher and Reed, 1998)可以恢复中温地热田热平衡状态,采用 WATCH97(Bjarnason, 1994)程序和固定铝方法可以弥补铝分析数据缺乏的弊端.本次研究不仅获得了相应的矿物共生组合,还得到了深部热储的温度,同时将该方法从中低温地热系统推广到低温热泉系统.

1 样品的分布及水化学成分特点

江西地处环太平洋地热带东南地热区的西北缘,是我国温泉分布较多的省份之一.全省温泉水温 ≥ 25 ℃ 的温泉共 82 处,较集中分布于江西的东部、南部和西部,而赣东北温泉分布较少.在江西的 82 处温泉中,绝大多数为中低温温泉($t < 60$ ℃),高于当地沸点的高温温泉(80 ℃ $\leq t < 100$ ℃)仅 1 处,即汤湖温泉(黄尚瑶,1993).

本次研究选择的 3 个温泉:庐山温泉、汤湖温泉和横泾温泉,分别位于江西的北部、西南和南部(图 1),试样的采集和测试是课题组在不同研究时期所完成的,所有试样的易变组分全部在野外现场测定,待测阳离子成分的试样现场用 1:1 的硝酸酸化至 pH<2,液相成分测定由东华理工学院现代测试中心完成.本次研究选用上述 3 个温泉系统中现场测

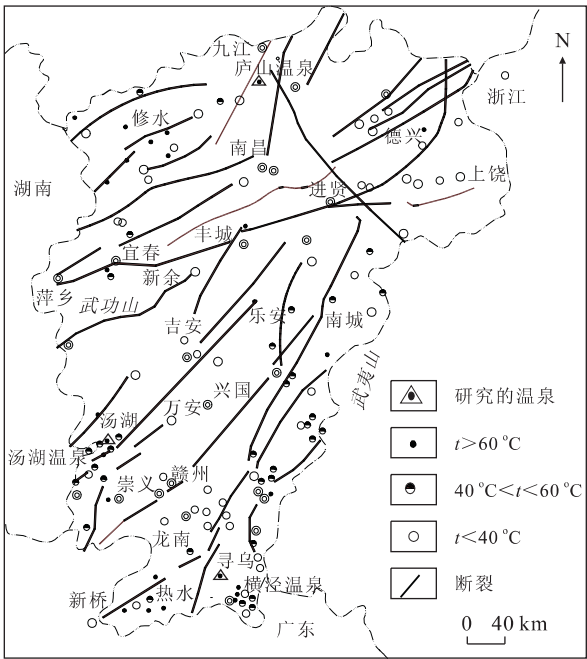


图 1 研究的温泉分布位置示意图[据李学礼等(2000)修改]
Fig. 1 Location of selected hot springs (modified after Li et al., (2000))

定温度最高的 4 个泉点作为研究对象,它们各自的水化学分析结果列于表 1.

从表 1 可知,汤湖温泉和横泾温泉为重碳酸—钠型硅质水,庐山温泉是重碳酸—钙型硅质水,3 个温泉的矿化度和总固体溶解物量均低.

2 水化学平衡状态的估算

矿物饱和指数法是根据一组矿物活度积(Q)和其理论平衡常数(K)的比值,即 $\log(Q/K)$ 值,并以此值为纵坐标、温度为横坐标来制作 $\log(Q/K)$ 相对温度图解,在该图解中如果有一些矿物会集中相交到某一点,则该点表示这些矿物共生,由此来判断这些矿物达到了平衡,则这些矿物所对应的温度是体系的平衡温度,也是热储的平衡温度.

2.1 $\log(Q/K)$ 相对温度图解(矿物平衡温度图解)

采用 WATCH97 程序,分别计算了汤湖温泉、庐山温泉、横泾温泉的共 4 个水点的矿物平衡温度图解(图 2).由于上述研究的温泉水中铝、镁和铁等构成硅酸盐矿物的基本元素的含量均为 0,因此只能形成一些不含这些元素的矿物,在矿物平衡温度图解上,HJ06、TH01 和 TH04 号温泉点都只有玉髓和方解石相交于温度 100 ℃ 附近,结合野外现场

表 1 江西代表性温泉水化学分析结果

Table 1 Chemical composition of Tanghu, Lushan and Hengjing hot springs $\rho_B/(mg \cdot L^{-1})$									
样品号	TH01	TH04	HJ06	LS3	样品号	TH01	TH04	HJ06	LS3
测试时间/年	2003	2003	1999	1997	Fe ²⁺	0	—	—	0
电导率/(mg · L ⁻¹)	318	315	—	—	Al ³⁺	—	—	—	—
现场温度/℃	79.9	79.8	73	59	B	0.087	0.072	—	—
pH	7.84	7.35	7.3	8.27	SiO ₂	106	105.7	81	80
pH 温度/℃	20	20	20	20	SO ₄ ²⁻	11.49	10.31	17	72
Na ⁺	68.684	68.66	71.47	13.5	Cl ⁻	11.45	9.16	8.51	2.49
K ⁺	2.72	2.82	3.09	15.5	F ⁻	12.59	12.11	—	6
Ca ²⁺	3.81	4.17	9.85	61.1	HCO ₃ ⁻	149.4	148.4	106.14	129.07
Mg ²⁺	0	0	0.09	2.19	TDS	324	324	—	—
Li ⁺	0.41	0.4	—	—	游离 CO ₂	0	0	8.8	—

水化学分析由东华理工学院现代测试中心完成,分析者:宋金茹、牛建国。—表示未检出或未分析,测试方法采用 IAEA 国际地热水分析推荐方法,即 HCO₃⁻、Cl⁻ 为容量法测定, Li⁺、Fe²⁺、Al³⁺、B、SiO₂ 为 ICP-AES 测定, Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 为原子吸收测定。

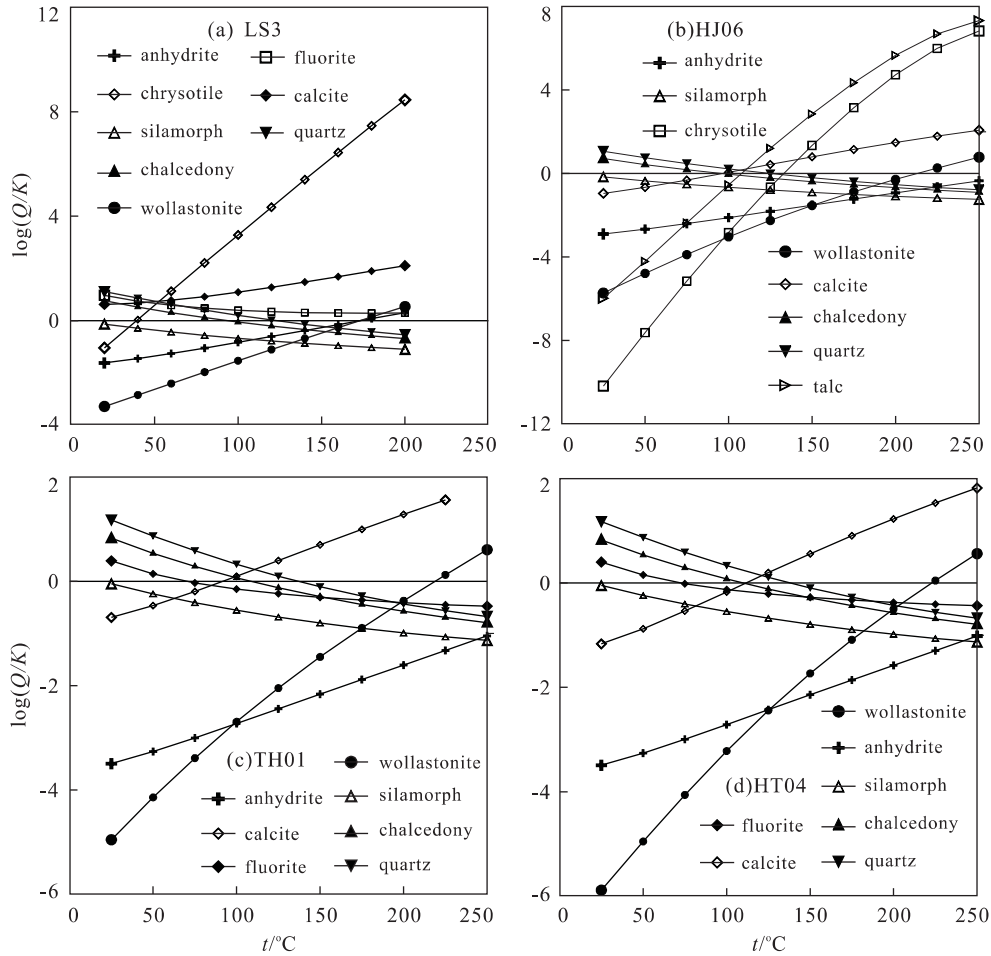


图 2 江西选择性温泉的 log(Q/K)图解

Fig. 2 log(Q/K)-t diagram for selected hot springs in Jiangxi Province

观察,在江西的大部分温泉露头均有玉髓沉淀,这表明这 2 个温泉有可能在这个温度达到平衡。

2.2 固定铝的 log(Q/K) 相对温度图解

由于铝的分析结果为 0,因此在图 2 中无法生

成含铝的硅酸盐矿物,而事实上在大多数的地热系统中,均有 1~2 种含铝的硅酸盐矿物已经达到了平衡,据此 Pang and Reed(1998)首创了固定铝(fixed-Al)恢复地热系统中含铝硅酸盐矿物平衡的方法,

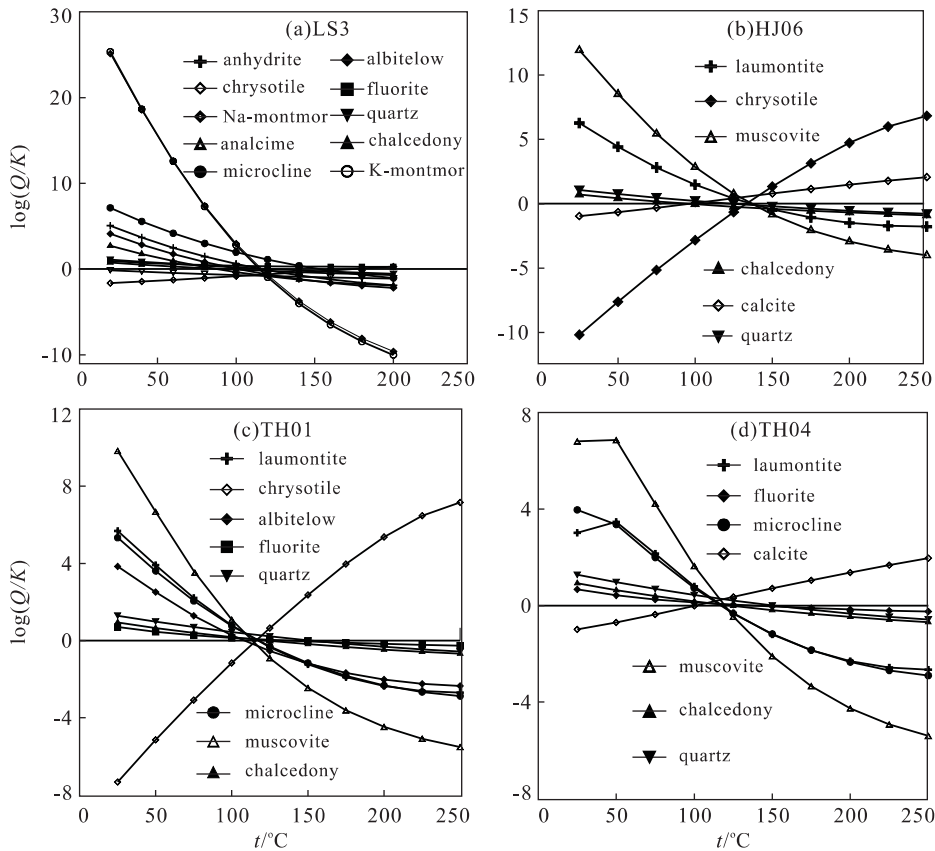


图 3 江西选择性温泉的固定铝 $\log(Q/K)$ 图解

Fig. 3 Fixed-Al $\log(Q/K)$ diagram for selected hot springs in Jiangxi Province

他们采用 SOLVEQ 程序在中国漳州地热田、冰岛 Reykhot 温泉及美国 Belknap 温泉等中低温地热系统中取得了良好的效果. 张展适等 (2003) 选用 WATCH97 程序, 探讨了固定铝方法的原理并据此方法成功恢复了汤湖温泉的深部热储温度.

图 3 是本次计算的 4 个泉点的固定铝图解, LS3、HJ06、TH01 和 TH02 各泉点假定的铝的浓度分别为 1, 0.2, 0.05 和 0.05 mg/L, 结合野外的实际情况, 即温泉水在上升过程中与冷泉水会发生混合作用或有地表冷泉水的加入, 对 TH01 和 TH04 号泉点其余组分的水化学成分分别乘系数 1.3 和 1.25 来消除 (张展适等, 2003).

图 3 显示在矿物平衡温度图解上, 上述 4 个泉点均表现良好的收敛性, 如对 TH01、TH04 两个泉点, 浊沸石 (laumontite)、纤蛇纹石 (chrysotile)、钠长石 (albite low)、萤石 (fluorite)、微斜长石 (microcline)、白云母 (muscovite)、玉髓 (chalcedony) 等中低温地热系统中常见的蚀变矿物收敛于温度 120 °C, 而对 HJ06 号温泉点, 石英、玉髓和方解石收敛于

100 °C, 而浊沸石、白云母、纤蛇纹石及玉髓、石英收敛于 140 °C. 而 LS3 泉点的矿物组合也在 120 °C 相对收敛, 因此模拟表明这些泉点均显示出附近大部分矿物与温泉水在 100~140 °C 范围内达到了平衡.

3 讨论与结论

自 1934 年以来, 国内外很多学者的研究成果均表明温度、原岩、水化学成分及反应时间等是影响地热系统中蚀变矿物组合的主要因素 (Fenner, 1936; Browne, 1978; Kristmannsdóttir, 1978, 1982; Kristmannsdóttir and Tómasson, 1978), 在冰岛、美国黄石公园及菲律宾的很多地热田中, 相同的矿物组合总是出现在相同的温度带, 至少对大量的玄武质岩石 (碎屑岩和熔岩) 是如此; 同时海水起源的流体和大气降水起源的流体生成的矿物共生组合也是相同的 (Kristmannsdóttir, 1978). 现有的研究成果表明, 在地热系统中钠长石与石英的矿物组合形成的温度范围是 150~250 °C, 而浊沸石、斜钙沸石

与石英的组合形成的温度范围是 100 ~ 200 ℃ (Browne, 1978), 浊沸石与玉髓组合出现的温度范围主要是 110 ~ 140 ℃ (Kristmannsdóttir and Tómasson, 1978; Zhang, 2001), 蛋白石与玉髓组合的形成温度接近或低于 100 ℃.

在江西很多温泉泉口均可见到大量的非晶质硅沉淀, 常规的地球化学模拟计算也能得方解石、文石、石英、玉髓等矿物的共生组合 (Sun, 1998; 孙占学和吴红梅, 1999), 而前人通过对钻孔地质编录也发现在汤湖温泉存在蛇纹石、萤石、石英及沸石类的矿物组合 (江西地质局水文地质大队, 1974. 汤湖地热田地质勘探报告).

本文的研究再次证实用普通的矿物饱和指数法可以计算无法获得缺铝或铝分析不准的温泉系统的水化学平衡, 如研究的 3 个温泉均获得了深部可能的热储温度. 本文的研究意义还在于确定了固定铝方法对江西的中低温温泉系统是适用的.

References

Arnórsson, S., 2000. Isotopic and chemical techniques in geothermal exploration, development and use: Sampling methods, data handling, interpretation. International Atomic Energy Agency, Vienna.

Bjarnason, J. Ö., 1994. The speciation program WATCH, version 2. 1. Orkustofnun, Reykjavik, 7.

Browne, P. R. L., 1978. Hydrothermal alteration in active geothermal fields. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 6: 229—250.

Fenner, C. N., 1936. Bore-hole investigations in Yellowstone Park. *J. Geol.*, 44: 225—315.

Huang, S. Y., 1993. Hot spring resources in China. China Cartographic Publishing House, Beijing (in Chinese).

Kristmannsdóttir, H., 1978. Alteration of basaltic rocks by hydrothermal activity at 100—300 ℃. International Clay Conference, 359—367.

Kristmannsdóttir, H., 1982. Alteration in the IRDP drill hole compared with other drill holes in Iceland. *Journal of Geophysical Research*, 87(8): 6525—6531.

Kristmannsdóttir, H., Tómasson, J., 1978. Zeolite zones in geothermal areas in Iceland. In: Sand, L. B., et al., eds., *Natural zeolites, occurrence, properties, use*. Pergamon Press Ltd., Oxford, 277—284.

Li, X. L., Sun, Z. X., Zhou, W. B., 2000. Fossil hydrothermal

system and the mineralization of uranium. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

Pang, Z. H., 1996. The fixed-Al method applied to Zhangzhou geothermal system, Southeast China. In: Pang, Z. H., Zhang, J. D., Sun, J. H., eds., *Advances in solid earth sciences*. Science Press, Beijing, 144—153.

Pang, Z., Reed, M., 1998. Theoretical chemical thermometry on geothermal waters: Problems and methods. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 62: 1083—1091.

Spycher, N. F., Reed, M. H., 1998. SOLVEQ: A computer program for computing aqueous-mineral-gas equilibria. Revised preliminary edition. Department of Geological Sciences, University of Oregon, Eugene, OR 97403.

Sun, Z. X., 1998. Geothermometry and chemical equilibria of geothermal fluids from Hveragerdi, SW-Iceland, and selected hot springs, Jiangxi Province, SE-China. *Geothermal training in Iceland*, 373—402.

Sun, Z. X., Wu, H. M., 1999. Calculation of the mineral-fluid equilibrium and the reservoir temperature in geothermal system. *Acta Geoscientia Sinica*, 20 (Suppl.): 595—598 (in Chinese with English abstract).

Zhang, W. M., 1999. Origin analysis of geothermal water and evaluation of geothermal reservoir temperature in the Hengjing area, south Jiangxi Province, China. *Geotectonica et Metallogenia*, 23(2): 155—165.

Zhang, Z. S., 2001. Water-rock interaction in the Bakki low-temperature geothermal field, South-west Iceland. Report 17. In: *Geothermal training in Iceland 2001*. UNU G. T. P., Iceland, 405—434.

Zhang, Z. S., Sun, Z. X., Wang, S. J., 2003. Successful reconstructing the equilibrium status of Tanghu hot spring by using fixed-Al method and its meaningness. *Journal of East China Geological Institute*, 26(4): 306—310 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

黄尚瑶, 1993. 中国温泉资源. 北京: 中国地图出版社.

李学礼, 孙占学, 周文斌, 2000. 古水热系统与铀成矿作用. 北京: 地质出版社.

孙占学, 吴红梅, 1999. 地热系统中矿物—流体化学平衡的判断及热储温度的估计. *地球学报*, 20(增刊): 595—598.

张展适, 孙占学, 王素娟, 2003. 固定铝方法成功恢复汤湖温泉热储平衡温度及其研究意义. *华东地质学院学报*, 26(4): 306—310.