

相山矿田低温热水及其与铀矿化关系

邵 飞^{1,2}

1. 中国地质大学研究生院, 湖北武汉 430074

2. 核工业 270 研究所, 江西南昌 330200

摘要: 从矿田现代温热水入手, 运用水文地球化学、同位素水文地质等手段, 结合地热基础理论与方法, 剖析了典型矿床地温特征, 对温热水的补给源、热源进行了研究; 结合铀成矿机理分析, 探讨了热水与铀成矿作用的关系。认为相山矿田温热水属隆起断裂型热水, 大气降水为温热水的主要补给源, 地下水深循环及放射性生热为温热水获得热量的主要途径, 热水活动对铀成矿作出了重要贡献, 铀源主要来自水—岩作用, 形成了受基底构造和火山盖层构造联合控制的地温高场、温热水及铀矿化于一体的空间组合。

关键词: 低温热水; 水文地球化学; 同位素; 铀矿化; 水—岩作用。

中图分类号: P611

文章编号: 1000-2383(2005)02-0206-05

收稿日期: 2004-07-15

Low-Temperature Hot-Water in Xiangshan Orefield and Its Relation with Uranium Mineralization

SHAO Fei^{1,2}

1. Graduate School, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. No. 270 Institute of CNNC, Nanchang 330200, China

Abstract: Xiangshan uranium orefield is one of the largest volcanic rock type hydrothermal uranium orefield in China. Beginning with modern warm hot-water in the orefield, and applying hydrogeochemistry and isotopic hydrogeology, this paper analyzes the geothermal characteristics of typical deposits, studies supply and heat sources of warm hot-water, and discusses the relation between hot-water and uranium mineralization according to the mechanism of uranium metallogenesis. The warm hot-water in Xiangshan orefield is hot-water of uplift fault type, meteoric water is the major supply source of warm hot-water; deep circulation of groundwater and radioactive heat are the main channels for warm hot-water to obtain heat energy; hot-water activity made an important contribution to uranium metallogenesis; the uranium source mainly comes from water-rock interaction; a space unit is formed on integration with geothermal high field, warm hot-water and uranium mineralization which are controlled by base tectonics and volcano cover structure.

Key words: low-temperature hot-water; hydrogeochemistry; isotope; uranium mineralization; water-rock interaction.

0 引言

相山矿田是我国著名的火山岩型热液铀矿田, 先后发现了数十个铀矿床, 在其勘探过程中于矿田西部和北部观测到了较多孔口混合水温介于 20~30℃间的低温热水钻孔。低温热水(以下称温热水)

钻孔主要集中于矿田西部的 6122 矿床及北部的 6110 矿床, 温热水的空间展布与构造及深部铀矿化具直观的依存关系。因此, 对温热水分布规律、形成机制及其与铀矿化关系的研究, 不仅有助于相山矿田铀成矿机理的深入研究, 而且可以指导相山矿田的找矿实践。

1 地质及水文地质概况

相山矿田位于赣杭构造带西南端的相山火山盆地中,该火山盆地由一个大型的破火山口组成(邱爱金等,2002)。破火山口基底为震旦系浅变质岩系及上三叠统安源组砂砾岩、砂岩夹炭质页岩、煤线等;盖层为一套上侏罗统火山岩系,其岩性主要为打鼓顶组、鹅湖岭组酸性、中酸性火山熔岩、陆相碎屑沉积岩、局部夹火山碎屑岩。大规模火山活动期后,次火山岩沿环盆断裂、推覆构造面及各种层间离张断裂充填(图 1)。

遂川大断裂的演化对赣杭带西南段构造—岩浆活动起着重要的控制作用,相山火盆是赣杭构造带西南段火山活动最为剧烈的一个火盆,东西向构造是该火盆基底构造的主构造线,火盆盖层构造表现为以东北向断裂构造为主导的线环交织的构造格局,将火山盆地西部及北部切割成菱形块体及不规则形状的块体。

相山火盆内铀矿床的空间分布,主要集中于北部和西部,铀矿床多定位于东北向主断裂与环状或弧形火山构造、火山塌陷构造、火山界面构造等的复合部位。矿田内围岩蚀变强烈,矿前蚀变北部为钠长石化、西部为水云母化,成矿期的蚀变有:赤铁矿化、水云母化、绿泥石化、碳酸盐化、萤石化、黄铁矿化

等。铀矿化在北部以单铀型为主,而在西部则以铀、钍混合型为特征。

相山矿田地处中国东部第二构造隆起热水活动带,气候温暖、潮湿,年平均气温 16.5℃,地貌形态为中度切割的构造剥蚀中低山区。地下水按其埋藏和赋存条件可分为 3 种类型:第四系松散层孔隙潜水、风化壳网状裂隙潜水和构造裂隙脉状承压水,前两者地下水动态及富水性受水文、气象因素控制明显,后者地下水动态较稳定,富水性与构造性质、开启程度及规模大小等有关,北东向构造及构造交汇部位富水性较强,矿田内钻孔揭见的温热水均为构造脉状承压水。

地下水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3-\text{Ca} \cdot \text{Na}$ 、 $\text{HCO}_3-\text{Na} \cdot \text{Ca}$ 及 HCO_3-Na 型,潜水矿化度一般为 0.03~0.10 g/L, pH 值介于 5.5~7.5 之间,温热水的矿化度和 pH 值均相应增高, $M=0.10 \sim 0.35$ g/L, $\text{pH}=7.0 \sim 9.0$ 。

2 矿田温热水分布规律及其成因

2.1 矿田地温场特征

地温测量采用热敏电阻仪实测井液温度,矿田内共测钻孔 160 个,经数理统计得出的温度(T)—深度(H)回归方程为:

$$T=4.01H+16.36 \quad (n=160, \gamma=0.9996)$$

对矿田测温资料及地温分布状况进行系统分析,矿田地温特征可概括如下:(1)地温分布与东西向基底构造及北东向盖层主干断裂密切相关。矿田内实测地温梯度较高的钻孔,主要分布于矿田北部东西向基底构造带及中部东西向基底构造带的西端,中部东西向基底构造带西端 14 个钻孔实测的平均地温梯度达 4.06℃/100 m。矿田西部盖层北东向主干断裂带上钻孔的平均地温梯度较非主干断裂带上钻孔的平均地温梯度高 0.64℃/100 m。显然,基底构造对矿田地温场分布具重要控制作用,而盖层主干断裂是深部热流向上传导的重要通道。(2)地温分布与盖层构造导水性相关。地温分布与盖层导水构造空间位置相关,即北东向构造、火山塌陷构造或其复合部位地温梯度值较高,特别是钻孔揭见这些导水构造中的构造脉状承压水时,地温增幅明显,如矿田西部 6122 矿床 ZK31—10 孔在孔深 516 m 处揭见北东向构造与火山塌陷构造复合部位,钻孔涌水,地温梯度达 4.22℃/100 m; ZK31—52 孔于

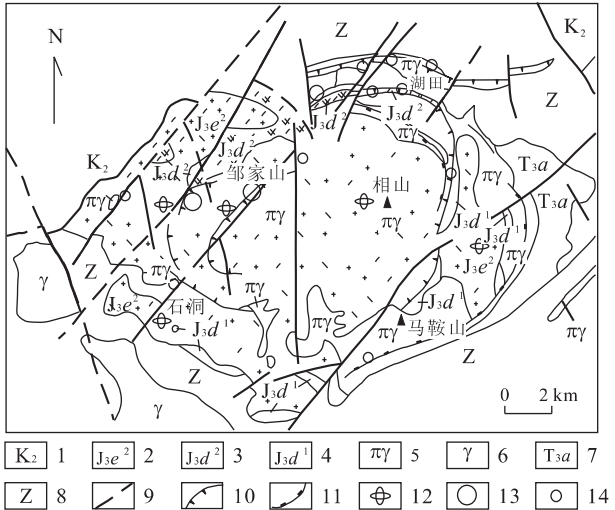


图 1 相山火山盆地

Fig. 1 Volcanic basin in Xiangshan

1. 砂砾岩;2. 鹅湖岭组碎斑熔岩;3. 打鼓顶组流纹英安岩;4. 打鼓顶组砂岩、砂砾岩;5. 次斑状花岗岩;6. 花岗岩;7. 安源组砂砾岩、砂岩;8. 浅变质岩;9. 断裂;10. 火山塌陷构造;11. 火山层间离张构造;12. 火山口;13. 大型铀矿床;14. 中小型铀矿床

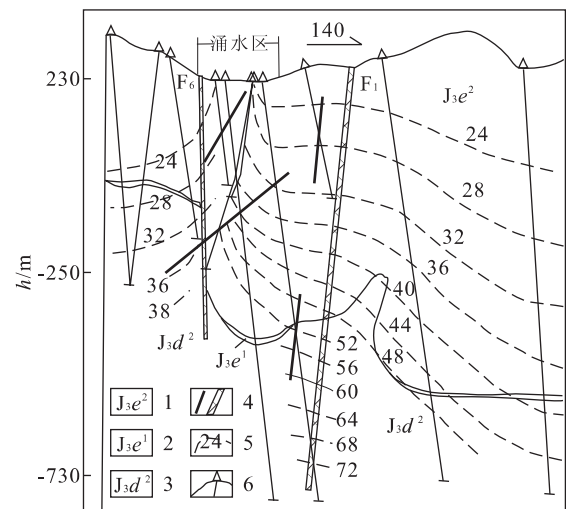


图 2 相山矿田 6122 矿床 31 线井温剖面示意

Fig. 2 Schematic map of logging temperature in line 31 cross section of No. 6122 deposit in Xiangshan orefield

1. 鹅湖岭组碎斑熔岩; 2. 鹅湖岭组晶屑玻屑凝灰岩; 3. 打鼓顶组流纹英安岩; 4. 含水的断裂及裂隙构造; 5. 等温线(℃); 6. 钻孔

表 1 相山矿田若干铀矿床地温梯度值

Table 1 Geothermic gradient of several uranium deposits in Xiangshan orefield

矿床代号	矿床规模	测温孔深/m	地温梯度值/(℃·10 ⁻² m ⁻¹)
6122	特大型	400~1 000	4. 01
6134	小型	300~1 000	3. 24
6124	中型	250~900	2. 94
6121	小型	250~900	3. 39
6110	中型	500~700	3. 00

878 m处揭见北东向构造, 钻孔涌水, 地温梯度高达 6. 04℃·10⁻² m⁻¹. 受构造及裂隙连通性的影响, 温热水还有一定的侧向运动, 在剖面上形成宽达 300~700 m 的地温增高场(图 2). (3)地温分布与铀矿化具一定的相关性. 矿田内特大型铀矿床的地温梯度值较中、小型铀矿床的地温梯度值高(表 1). 对某一矿床而言, 矿体相对集中的标高区间, 其地温梯度值也有相应的增高. 可以推认, 放射性物质的积聚对地温场分布具一定的影响.

2. 2 矿田温热水分布

深、大断裂对火山、岩浆活动、地热、温泉等具明显控制作用. 与遂川断裂演化具成生联系的相山火盆的北部及西部钻孔均揭见了温热水, 温热水的平面展布总体呈两条东西走向的带状, 盖层构造—火山塌陷构造、北东向主干断裂及其复合部位是温热

表 2 温热水的铀同位素比值

Table 2 Ratio of uranium isotope in warm hot-water

水源点	水源类型	水温/℃	ARu	备注
朱源温泉	上升泉	21	1. 75	受矿田北部东西
6110 矿床温热水	钻孔	23	1. 96	向基底构造控制
马鞍坪温泉	上升泉	43	2. 69	受遂川
临川温泉	上升泉	41. 5	2. 72	断裂控制

水产出的主要地段.

矿田北部 6110 矿床温热水受东西向基底构造控制, 该构造带两端延伸方向上还见有西段的朱源温泉和东段的宜黄温泉, 6110 矿床温热水与朱源温泉具相似的放射性铀同位素比值(ARu), 并且其比值明显低于受遂川断裂控制的温泉的铀同位素比值(表 2). 可见, 相山矿田北部及其两端延伸方向上的温(泉)热水, 属相同地质背景下的产物(Osmond *et al.*, 1983). 矿田中部东西向基底构造控制的温热水主要产于火山盖层构造发育的西段, 该地段—90 m中段地温等值线呈北东向展布, 而—250 m中段地温等值线东西向迹象清晰. 据此, 火山盖层构造是矿田温热水活动的有利空间.

综合分析矿田温热水的分布及地温场特征, 认为受东西向基底构造控制的深部温热水是良好的载热流体, 其主要上升通道是火山盖层主干断裂及火山塌陷构造, 在上升途中与浅部冷水相混合, 为此形成了受基底及盖层构造联合控制的孔口水温较低的矿田温热水的空间展布格局(邵飞, 2000).

2. 3 矿田温热水成因

2. 3. 1 温热水的水化学特征 矿田温热水属偏高矿化度(>0. 10 g/L)的中性—弱碱性重碳酸盐型水, 其水质类型与当地冷水相同, 但其矿化度和 pH 值较冷水均有增高, 并且温热水的 HCO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻、Na⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 含量随矿化度的增高而呈线性增高, 表明温热水的水化学成分属溶滤作用成因.

此外, 温热水的 F⁻、SiO₂ 含量及 H₂S、Rn、He 等气体浓度较当地冷水高出若干倍, 部分温热水中热液元素 Mo、Sr 及碱金属元素 Li 等组分也高于当地冷水. 比较前人总结的反映各类地下热水的水文地球化学指标, 确认相山矿田温热水属隆起断裂型地下热水(贾苓希, 1992).

2. 3. 2 温热水的氢、氧同位素组成 据周文斌等的研究成果, 相山矿田附近马鞍坪地区大气降水线方程为: δ(D)=8. 31δ(¹⁸O)+11. 06(该降水线方程近于平行 Carig 降水线方程), 氧同位素高程效应方

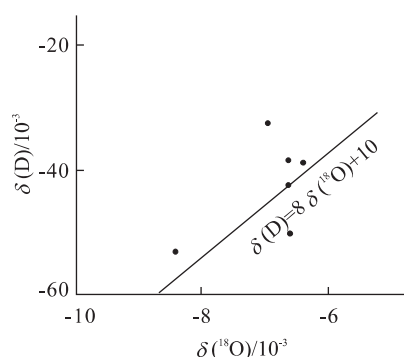


图3 相山矿田温热水的氢、氧同位素组成

Fig. 3 Istone formation of hydrogen and oxygen in warm hot-water in Xiangshan orefield

程为:

$$\delta(^{18}\text{O}) = -4.82 - 0.0032\delta(\text{H}).$$

相山矿田温热水的氢、氧同位素组成均临近于 Carig 降水线(图3), 大气降水是温热水的补给源. 借助马鞍山地区氧同位素高程效应方程, 计算得出的温热水的补给高程介于 500~1 135 m. 显然矿田东南部 500 m 以上的中低山区是矿田温热水的补给区.

2.3.3 温热水获得热量的途径 温热水氧同位素未发现明显的“氧漂移”, 表明深部热储温度不高, 据 SiO_2 温标计算的矿田温热水基础温度为 70~90 °C, 按基础温度计算的温热水循环深度约为 1 500~2 000 m, 这一深度与重力延拓反映的矿田西部北东向主干断裂切割的深度大致相同(邱爱金等, 2002; 邵飞, 2000). 可见, 地下水沿火山盖层主干断裂的深循环作用是获得热量的重要途径之一.

相山矿田平均大地热流量为 (81.53 ± 12.10) mw/m², 最高可达 101.04 mw/m² (李学礼, 1992). 据矿田西部岩石中分散及富集的放射性元素铀、钍、钾含量, 计算的放射性元素生热总量为 16.117 mw/m², 约占矿田最高大地热流量的 16%, 由此可见放射性生热的贡献, 放射性生热显然也是温热水的热源之一(李建威等, 2000).

2.3.4 温热水成因分析 综上所述, 矿田温热水属大气降水深循环对流作用成因, 是与地质背景和水文地质条件密切相关的客观产物.

地下水获得大气降水补给后, 在重力作用下沿火山盖层构造作深循环, 在下渗过程中不断获得包括放射性生热在内的热量, 水温逐渐增高, 溶解能力不断增强, 矿化度及微量元素含量也随之增高, 获得足够热量的地下水, 在“热引擎”作用下, 沿与东西向

基底构造相贯通的火山盖层主干断裂及火山塌陷构造上升. 由于含水构造热储直接或间接与地表连通, 热量沿途散失, 加之在浅部受到冷水的混合(井温等温线下密上疏(邵飞, 2000)), 致使钻孔孔口水温较低, 一般小于 30 °C.

3 矿田温热水与铀矿化关系

相山矿田存在两期铀矿化作用, 第一期为铀—赤铁矿化作用, 成矿年龄为 (115 ± 0.6) Ma 和 113 Ma; 第二期为铀—萤石、水云母化作用, 形成年龄为 (99 ± 6) Ma 和 (98 ± 8) Ma. 两期成矿作用是两期成矿热液(水)活动的产物, 并且铀矿化受火山盖层主干断裂及火山塌陷构造等控制明显(范洪海等, 2003).

热液铀矿床实质上是古水热活动的遗迹, 是水—岩相互作用的产物(周文斌等, 2000). 如前所述, 相山矿田内围岩蚀变强烈. 成矿期的矿化蚀变明显受构造控制, 而且分带明显, 蚀变岩石的 U、Th 等元素含量均增高(表3). 显然, 控制铀矿化的火山盖层主干断裂及火山塌陷构造等也控制了水热活动空间, 并且水—岩作用导致了物质的带进与带出(黄志章等, 1999; 张荣华等, 2002). 事实上, 矿田西部水云母化形成的灰色蚀变带, 不仅制约了铀矿化的空间产出, 而且也是矿田西部现代温热水的重要活动空间, 表明了水热活动的延续性和继承性(邵飞, 2000).

成矿前的围岩蚀变, 增加了赋矿围岩的有效孔隙度, 并使铀产生预富集. 成矿期相山火山盆地的地温梯度较高, 构造的导水性也较现在强, 为大气降水深循环、较快地演化为热水提供了有利的地质背景, 热水对富铀层(体)中的铀发生浸取、淋滤, 水—岩作用使得铀在液相中进一步富集, 并演化为含矿热液, 当其与来自深部富含矿化剂(CO_2 、 CO 、 CH_4 、 H_2S 等)的热液相混合时, 含矿热液的物理化学条件发生改变. 相山矿田东西向基底构造带, 可能是发生这种混合作用的场所, 混合后的含矿热液沿断裂构造、火山构造上升, 随着温度下降、压力降低, CO_2 、 H_2O 、F 等气相组分逸出, 在有利的地球化学环境条件下, 含矿热液物理、化学性质迅速改变, 铀酰络合物分解、铀矿物沉淀富集. 由此而形成相山矿田受基底构造及火山盖层构造联合控制的地温高场、温热水、铀矿化于一体的空间组合(费红彩和肖荣阁, 2002; 周涛

表 3 相山矿田 6122 矿床蚀变岩石的微量元素(据黄志章等,1999)

Table 3 Content of trace elements in altered rock of No. 6122 deposit in Xiangshan orefield $w_B/10^{-6}$

元素	W	Mo	Bi	Sb	Cu	Pb	Zn	Li	Rb	Cs	U	Th
矿化中心带	6.34	1.29	2.30	11.0	42.97	49.59	64.6	311.4	173	32.35	602.3	64.8
近矿蚀变带	3.27	1.69	3.87	6.20	33.01	37.43	52.6	116.6	327	26.05	15.9	22.0
远矿蚀变带	2.14	1.47	1.46	6.14	26.57	48.06	59.5	129.8	315	19.72	12.2	20.4
围岩	1.59	0.8	1.37	3.11	30.78	23.33	49.7	62.9	274	16.41	7.01	22.6

发等,2002).

4 结论及讨论

(1)相山矿田地温场受构造控制明显,火山盖层构造导水性及铀矿化对地温分布有一定的影响. 矿田地温类型属温热水—构造混合型,地温场较好地反映了矿田地质构造格架.(2)矿田温热水的水文地球化学指标,表明其属隆起断裂型地下热水,温热水的分布受基底构造及盖层主干断裂和火山塌陷构造联合控制,温热水属大气降水深循环对流作用成因,放射性生热也为温热水形成提供了热源.(3)热水活动对相山矿田成矿作出了重要贡献,铀源主要来自水—岩作用,深部热液提供了重要的矿化剂. 至今尚存的温热水活动,在一定程度上说明了现代温热水是矿田水热活动的延续地质事件,同时也说明了水—岩作用时间长,水动力条件稳定.(4)基底及火山盖层构造、地温高场、温热水、铀矿化“四位一体”的空间组合,有助于指导相山矿田的进一步勘探实践;同时也可以利用找热的方法、手段间接指导找铀,该思路值得在相山矿田找矿实践中探索和总结.

References

Fan, H. H. , Ling, H. F. , Wang, D. Z. , et al. , 2003. Study on metallogenetic mechanism of Xiangshan uranium ore-field. *Uranium Geology* , 19(4): 208—213 (in Chinese with English abstract).

Fei, H. C. , Xiao, R. G. , 2000. Ore-forming fluid evolution and metallogenetic physical chemistry. *Bulletin of Mineralogy and Geochemistry* , 21(2): 139—144 (in Chinese with English abstract).

Huang, Z. Z. , Li, X. Z. , Cai, G. Q. , 1999. Alteration field and type in hydrothermal uranium deposits. Atomic Energy Press, Beijing (in Chinese with English abstract).

Jia, L. X. , 1992. Geophysical and geochemical investigation methods for geothermal water. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

Li, J. W. , Li, Z. J. , Fu, Z. R. , et al. , 2000. Heat sources and hydrothermal uranium mineralization in the Suichuan-Reshui strike-slip fault zone. *Geological Science and Technology Information* , 19(3): 39—43 (in Chinese with English abstract).

Li, X. L. , 1992. On the mineralization model of “there sources—Heat, water and uranium”. *Journal of East China Geological Institute* , 15(2): 101—112 (in Chinese with English abstract).

Osmond, J. K. , Cowart, J. B. , Kaufman, M. I. , 1983. Uranium isotopic disequilibrium in groundwater as an indicator of anomalies. *Int. J. Appl. Isot.* , 34(1): 283—308.

Qiu, A. J. , Guo, L. Z. , Zheng, D. Y. , et al. , 2002. Continental tectonic constraint on formation of Xiangshan large scale uranium deposits with high grade. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

Shao, F. , 2000. Genesis of low-thermal water and its relation with uranium mineralization in Zoujiashan deposit. *Journal of East China Geological Institute* , 23(1): 24—27 (in Chinese with English abstract).

Zhang, R. H. , Hu, S. M. , Wang, J. , et al. , 2002. Water-rock interaction in typical volcanic rock areas in middle-lower Yangtze valley. China Dadi Press, Beijing (in Chinese).

Zhao, T. F. , Yuan, F. , Yue, S. C. , et al. , 2002. Water-rock interaction during formation of skarn-type deposits in Yueshan orefield, Anhui Province. *Mineral Deposits* , 21(1): 1—9 (in Chinese with English abstract).

Zhou, W. B. , Sun, Z. X. , Li, X. L. , 2000. Fossil hydrothermal system and uranium metallogenesis. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

范洪海, 凌洪飞, 王德滋, 等, 2003. 相山铀矿田成矿机理研究. 铀矿地质, 19(4): 208—213.

费红彩, 肖荣阁, 2002. 成矿流体溶化与成矿物理化学. 矿物岩石地球化学通报, 21(2): 139—144.

黄志章, 李秀珍, 蔡根庆, 1999. 热液铀矿床蚀变场及蚀变类型. 北京: 原子能出版社.