

# 热液矿床水相变控矿理论初探

胡宝群<sup>1</sup>, 吕古贤<sup>2</sup>, 孙占学<sup>1</sup>, 李满根<sup>1</sup>, 廖玉婷<sup>1</sup>, 郭国林<sup>1</sup>, 白丽红<sup>1</sup>

HU Bao-qun<sup>1</sup>, LÜ Gu-xian<sup>2</sup>, SUN Zhan-xue<sup>1</sup>, LI Man-gen<sup>1</sup>,

LIAO Yu-ting<sup>1</sup>, GUO Guo-lin<sup>1</sup>, BAI Li-hong<sup>1</sup>

1. 东华理工大学放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室/核资源与环境教育部重点实验室, 江西 南昌 330013;

2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

1. Key Laboratory of Radioactive Geology and Exploration Technology Fundamental Science for National Defense/Key Laboratory of Nuclear Resource and Environment (Ministry of Education), East China Institute of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

**摘要:**在综合水物理化学性质、热液矿床、溶解度实验研究等资料的基础上,曾提出热液矿床水相变控矿理论框架。在此进一步完善该理论:①当水发生相变时可引起热容、水中矿质溶解度、压缩系数、膨胀系数等物理化学性质突变,特别是在临界点处二级相变时还出现“临界奇异性”、部分参数趋于无穷大,与水在非相变区物理化学性质的小幅度渐变区别明显,必将影响成矿物质的活化、迁移和沉淀。而水是否相变及其相变种类取决于构造、岩浆活动、地温梯度等,按岩石圈正常地温线则直接取决于断裂、皱褶、韧性剪切等降压条件是否存在,由此可以通过热液成矿作用研究来探讨区域大地构造演化过程。②该理论有3个关键:水在相变区和非相变区的物理化学性质的明显差异,使含水系统中成矿物质带入、带出成为可能;出现与临近相变温压一致的地质环境,使成矿物质大量活化进入热液;后期局部降压使水相变而释放出成矿物质。总体而言,热液矿床水相变控矿理论研究岩石圈温度和压力变化范围内含水体系的物理化学性质变化及相关的地质响应,属构造物理化学的内容。

**关键词:**水;相变;物理化学性质;突变;渐变;临界奇异性;热液成矿作用

**中图分类号:**P611.1<sup>3</sup>      **文献标志码:**A      **文章编号:**1671-2552(2011)04-0565-08

HU B Q, LÜ G X, SUN Z X, LI M G, LIAO Y T, GUO G L, BAI L H. The theory of water phase transitions controlling hydrothermal mineralization. *Geological Bulletin of China*, 2011,30(4):565-572

**Abstract:** Based on the researches of water physicochemical properties, hydrothermal deposits and solubility experiments, the sketch of the ore-controlling theory of water phase transition in hydrothermal deposit was given ago. Now the following shows the latest version of this theory: (1) the water phase transition may cause some mutations of physicochemical properties, such as the heat capacity, mineral solubility in water, compressibility coefficient and expansion coefficient. Especially the second-order phase transition at the critical point induces the critical singularity which some physicochemical parameters tend to be the infinity. The significant changes of physicochemical properties at water phase transitions are obviously different from small-amplitude and gradual change at the district without phase transition. The differences will significantly influence the dissolution, migration and depositing of ore-forming materials in the lithosphere. The water phase transition and its type depend on the structure, magmatic activity and the geothermal gradient. According to normal geothermal curves in the lithosphere, the pressure reducing from fracture or fold or ductile shear is essential to in-

收稿日期:2010-11-05;修订日期:2011-02-11

资助项目:国家自然科学基金项目《热液铀成矿中水的物理化学行为及与地质作用耦合关系的研究》(批准号:40862005)、《砂岩铀矿地浸采铀过程中的流体-岩石相互作用研究》(批准号:40872165)、江西省自然科学基金项目《铀矿山废渣中的酸性废水形成及其控制的实验研究》(编号:2008GZHH0053)、国防科工委放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室基金项目《相山火山岩型铀矿床成矿机理研究》(编号:2010RGET01)和江西省教育厅科技项目《铀矿山酸性废水形成机制及抑制剂选择研究》(编号:2007-230)

作者简介:胡宝群(1965-),男,博士,教授,从事岩矿地球化学研究。E-mail: bqhu@ecit.edu.cn

duce the water phase transition. Therefore, the study of hydrothermal mineralization can also give some valuable information on the regional tectonic evolution. (2) There are 3 key steps in this theory. Firstly, the significant differences of water physicochemical properties between phase transition area and no-phase transition area in phase diagram, can give the probability to carry the ore-forming materials into or out of water-bearing system in the lithosphere. Secondly, the geological environment with the temperature and pressure near to water phase transition is essential for the thermal geo-fluid to dissolve a large amount of ore-forming materials. Lastly, it is also necessary that reducing pressure in some parts of the lithosphere induces the phase transition of water, in which the ore-forming materials in thermal geo-fluid can be released to form the hydrothermal deposits. Overall, the theory studies physicochemical property of water-bearing system and its relative geological response under temperature and pressure in the lithosphere, and it belongs to the content of tectono-physicochemistry.

**Key words:** water; phase transition; physicochemical property; abrupt change; gradual change; critical singularity; hydrothermal mineralization

热液矿床不仅具有重要的经济价值,更具有重大的地学科学研究意义,可以提供地质作用过程、大地构造演化等多方面的信息<sup>[1-6]</sup>。

之所以称热液矿床,就是在其形成过程中曾有热液的参加,而这些热液的主要组分是水,水是影响热液成矿作用最主要的因素。对水的研究,除了要重视水的来源、不同介质之间的化学反应、地质背景、演化等因素<sup>[7]</sup>外,水的相变和由此引起的物理化学性质突变也是透视热液成矿作用过程的窗口<sup>[8-14]</sup>。

本文介绍了水相变时物理性质的变化规律,引起水物理化学性质突变的特定条件下水相变所对应的地质条件,水的相变线(点)对矿质活化、迁移和沉淀的控制。在此基础上,进一步完善热液矿床水相变控矿理论,并从新的角度思考一些相关的地质现象。

## 1 水在相变线(含临界点)上物理化学性质的突变

在气-液相变线(含临界点)和超临界区拟相变线上,水的物理化学性质突变,明显区别于非相变区的小幅度的渐变<sup>[10,12,15-21]</sup>。使含水系统中成矿物质带人、带出成为可能。

以等压热容为例,给出水在气-液相变线上和临界点处的物理化学性质变化规律<sup>[12]</sup>,如图1所示。

(1)从图1-A可知:当恒压于水的临界压力时,只有当温度达到临界温度时,等压热容值才趋于无穷大。当温度明显偏离临界温度时,即便是温度很高时,水的热容值与常温条件下的热容值相近且变化很小,而不是随温度增高而明显增高。

(2)从图1-B可知:当温度恒定为临界温度时,

只有当压力达到临界压力时,等压热容值才趋于无穷大。当压力明显偏离临界压力,即便是压力很高时,水的热容值与常压条件下的热容值相近且变化很小,而不是随压力增高而明显增高。

(3)从图1-C可知:当温度和压力同时达到临界温度和压力时,热容值趋于无穷大,即出现“临界奇异性”。当温度和压力偏离临界值时,热容值迅速下降,临界奇异性迅速消失。当温度和压力明显偏离了水的临界温度和压力时,即便是温度和压力很大,热容值与标准状态下的热容值相近且变化很小(图1中的两翼)。这意味着尽管在岩石圈深部,高温高压条件下水的性质也与标准状态下水的性质相差无几。

当压力恒定为临界压力附近(如20MPa、24MPa和32MPa)时,随温度变化热容都会出现一个极大值,即在气-液相变线上和超临界区靠近临界点的拟相变线上水的物理化学性质出现极大值。但随着压力对相变线和拟相变线的偏离,这些热容极大值迅速降低<sup>[10]</sup>,如当压力为12MPa时热容值极大值不明显。

## 2 热液成矿作用中降压条件出现的必要性

### 2.1 正常地温梯度、封闭的岩石圈中不出现水的物理化学性质突变

水的物理化学性质明显变化的温度(100~450℃)属中上地壳的温度变化范围,故在热液矿床研究时把地压梯度(0.0265GPa/km)和地温梯度视为线性的。

由图2-A可知,按正常的地温梯度,地温线位于高压液相和超临界流体相区,即因岩石圈中压力太高使地温线明显偏离水的气-液相变线(和临界点)。

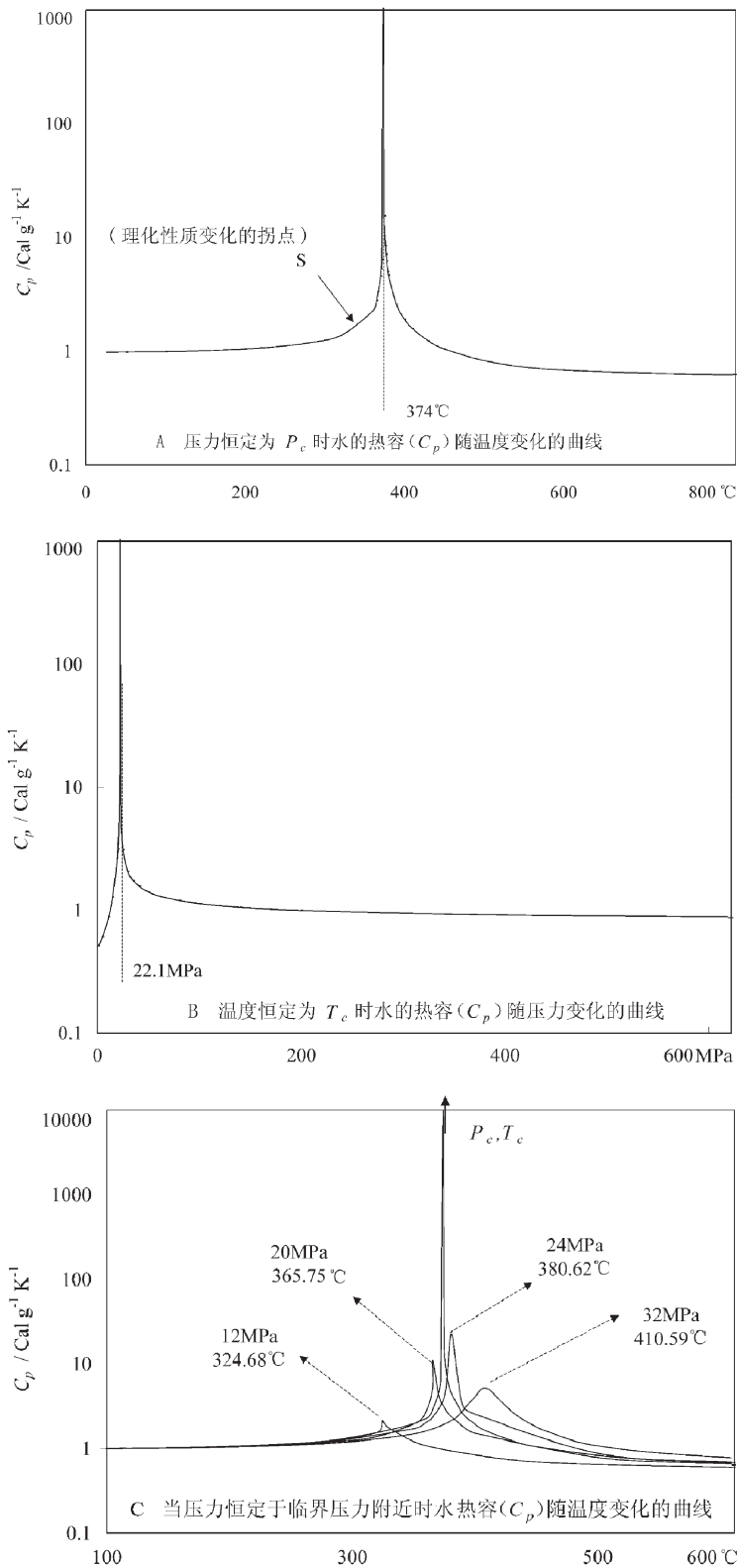


图 1 在临界点水的临界奇异性和不同压力下热容随温度的变化<sup>[12]</sup>  
Fig. 1 Figures showing the critical singularity of water and the variation of heat capacity ( $C_p$ ) according to temperature in various pressures

图 2-B 显示出:按正常的地温梯度,由浅到深热容值变化不大(变化幅度不超过 10%),且均为渐变而非突变。即便是通过水临界温度时(与  $20^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 、 $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 、 $50^{\circ}\text{C}/\text{km}$  相应的深度为  $17.45\text{km}$ 、 $11.63\text{km}$ 、 $6.98\text{km}$ ),热容亦无突变现象。 $5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 、 $10^{\circ}\text{C}/\text{km}$  的情况与  $20^{\circ}\text{C}/\text{km}$  的情况极为相近,只是中间的弧度变小,更接近于为平缓的斜线。换言之,沿着正常的地温线,水的高压液相和超临界态的物理化学性质非常相近,无明显差异。

总之,在正常地温梯度、封闭的岩石圈中,由浅到深,尽管水可能发生超临界流体相—高压液相之间的转变,但热容等物理化学性质只是发生小幅度的渐变,即使经过临界温度时水的理化性质变化也很小,因为此时压力明显高于临界压力。

## 2.2 降压是岩石圈中发生水物理化学性质突变的必要条件

按正常地温线,压力太高使地温线明显偏离水的气—液相变线(和临界点),而不出现物理化学性质的突变。在岩石圈中,水出现物理化学性质突变的关键是:含水体系的温度和压力同时达到相变线(含临界点)上的温度和压力。只有出现一些特殊的地质环境才能满足这一条件。

这些特殊条件大致有:局部降压、局部升温或两者同时出现,才有可能使地壳某处的温度和压力同时达到或接近水的相变线(含临界点)的温度和压力。

局部降压现象出现的典型条件是存在断裂等破碎带。局部升温现象出现的条件主要是岩浆活动,但仅有岩浆活动而无断裂等破碎带存在还是难以同时达到水的温压临界值,除非是地温梯度达  $350^{\circ}\text{C}/\text{km}$  以上的火山或潜火山环境。断裂和岩浆活动同时出现时,即局部降压和局部升温同时出现时,更利于达到水的相变线(含临界点)。

尽管不像临界点处二级相变时所出现的物理化学性质“临界奇异性”变化,在一级相变线和超临界拟临界相变线上,热容

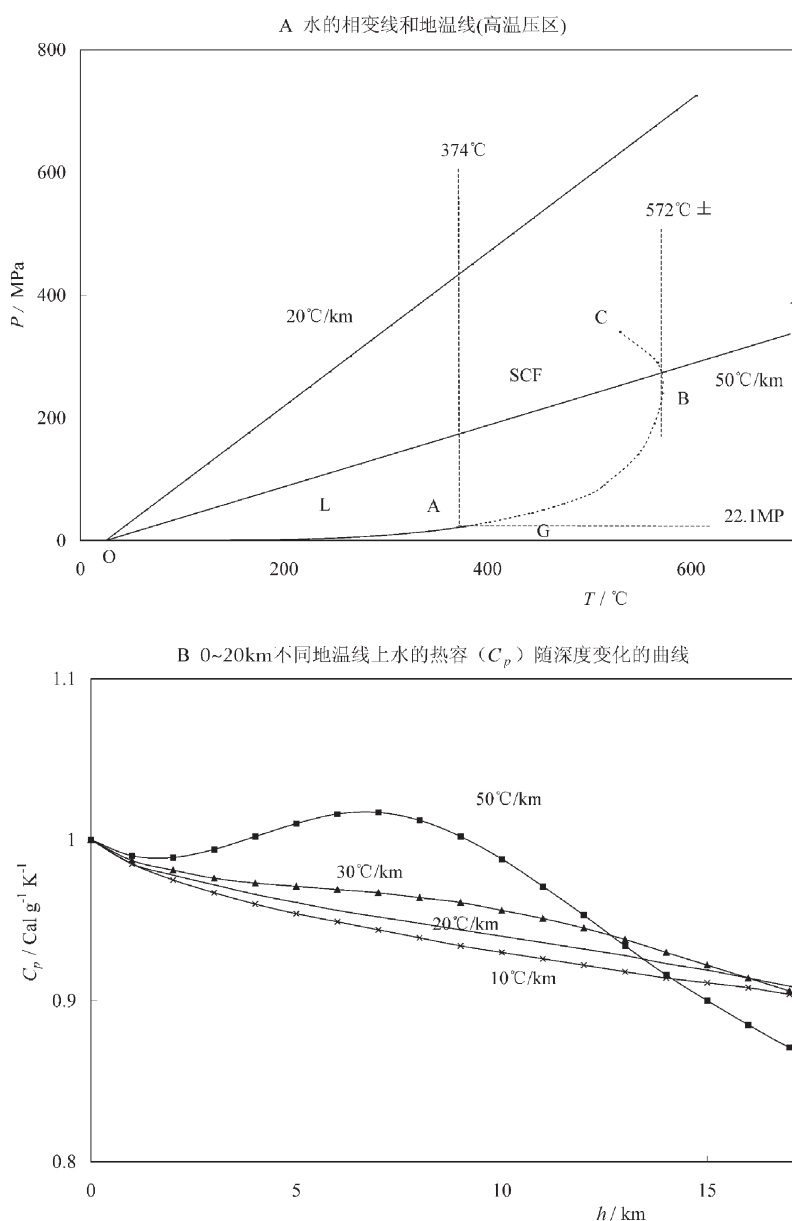


图2 水在不同地温线上热容值的变化曲线<sup>[12]</sup>

Fig. 2 Figures showing the changes of heat capacity  $C_p$  according to various geothermal curves

O—地表; A—水的临界点; B—拟相变线上热容变化不超过 10%的分界点;  
C—拟相变线消失(热容值变化小于 1%); L—液相区; G—气相区; SCF—超临界区

等也会出现极大值。这意味着尽管不是奇异性变化,但变化仍然较明显,对成矿作用也有重要的意义。

总之,岩石圈中降压是促成水发生相变、物理化学性质明显变化的必要条件。在脆性环境中断裂破碎带无疑是降压相对应的地质条件,在塑性环境中韧性剪切、皱褶等也可能造成局部降压。

### 3 水的相变线(含临界点)对矿质活化、迁移和沉淀的控制

据前两节所述,相变区和非相变区的物理化学性质的差异为成矿提供了可能性,降压是岩石圈中造成含水体系的物理性质突变的必要条件。据此进一步分析成矿物质如何进入流体和沉淀的机制。

(1)矿质进入流体的机理。在相变线(含临界点)上热容、溶解度等物理化学性质突然增加或出现临界奇异性,这正是以水为主体的热液溶解成矿物质的时刻,而非直接成矿。因此,含水体系临近相变即“将相变而未相变”状态保持的时间越长,越利于成大矿和富矿。

(2)矿质沉淀发生的机理。在相变线和拟临界相变线上溶解度有极大值,随着温压对相变线的偏离,极大值快速消失(如图1所示)。沉淀速度最大的温压点对应的就是物理化学变化的拐点(图1-A中的S)。矿质及相关的脉石矿物沉淀过程将发生在溶解度等明显降低的温压区,即体系性质变成开放时矿质沉淀才发生。

(3)岩石圈深部高温压的超临界流体不一定具有强的溶解能力,只有温压接近于临界点处的超临界水才具有很强的浸取能力。根据以热容为例的计算,当温压明显偏离相变线和临界点处时,即便是温度和压力很高的超临界态水,其理化性质(包括对矿质的溶解度)也只与标准状态下水的理化性质很接近。这可能是岩石圈中超临界水常有,而热液矿床,特别是大而富的热液矿床不常有(仅出现在一些特殊的区域,如减压环境)的根本原因。

### 4 热液矿床水相变控矿理论

#### 4.1 热液矿床水相变控矿理论的要点及意义

水是成矿热液的主体,水的热容值通常是岩石



的4~5倍,渗透性和流动性强,是成矿物质、能量的携带者和传递者。水发生相变时可引起热容、水中矿物质溶解度、压缩系数、膨胀系数等物理化学参数的突变,特别是在临界点处二级相变时还出现“临界奇异性”,热容、压缩系数、膨胀系数等部分参数趋于无穷大,与水在非相变区理化性质的小幅度渐变区别明显,必将影响成矿物质的活化、迁移和沉淀。水是否相变和相变种类取决于构造、岩浆活动、地温梯度等;按岩石圈正常地温线,则直接取决于断裂、褶皱、韧性剪切等降压条件是否存在。

水的相变是连接微观和宏观控矿因素的纽带。水相变研究从物理化学角度揭示出成矿作用与断裂、岩浆活动等之间的内在联系,可在热液成矿作用中建立起流体系统与构造系统之间的关联,由此还可以通过热液成矿作用研究来探讨区域大地构造演化过程。热液矿床水相变控矿理论研究岩石圈中温度和压力变化范围内含水体系的物理化学性质变化及相关地质响应,属构造物理化学的内容。

#### 4.2 热液矿床水相变控矿理论的几个关键和前提

热液矿床水相变控矿理论的3个关键:水在非相变区和相变区物理化学性质的明显差异,使含水系统中成矿物质带入、带出成为可能;出现与相变线(和临界点)温压一致的地质环境,促使成矿物质大量活化进入热液;后期局部降压使水相变而释放出成矿物质。

热液矿床水相变控矿理论的前提假设:岩石圈中,至少是中上地壳中,水不是罕见的,水的来源可能是多样的。降压可以较快地进行,而降温是相对缓慢的。某一地区地应力等总是有所变化的。

#### 4.3 与热液矿床水相变控矿理论相关的一些思考

仅从热液矿床水相变控矿理论的角度(不试图全面阐述以下各问题)重新审视一些地质现象,会产生一些新思路。

(1)曾论及的一些现象,从水相变控矿理论角度来看更为合理<sup>[12,14]</sup>:大量热液矿床包裹体均一法测温结果显示为100~450℃之间,热液矿床的成矿温度多局限于100~400℃之间<sup>[2]</sup>,这正对应水的气-液相变线和超临界区拟相变线物理化学性质明显变化的温度段。许多热液矿床据包裹体测温算出的压力较小,不能与温度相配套<sup>[23]</sup>,用静岩压力梯度换算出的深度较小,由此计算出地温梯度离奇的高,与产出背

景的非火山环境不协调,这可能是降压引发水相变所致。热液成矿作用时间上的期次性、温度上的期次性和断裂活动的期次性,可通过水相变分析建立它们之间的联系,进而探讨区域大地构造演化规律。在20世纪80年代至2005年之间,发表了不少论文研究沸腾作用对金、铜、铀成矿作用的意义<sup>[24-26]</sup>,所论及的沸腾作用应是断裂降压使高温高压水液体相变为高温气体的一级相变过程,即以水为主体的流体发生一级相变而成矿。

(2)关于深源成矿的思考:现在所见的矿体的位置,不一定是矿质源所在的位置,即富含矿质的热液来源于现在矿体之下的更深部位。如石英脉型金矿和部分铀矿,矿体的品位很高,两侧围岩又无明显的蚀变且品位很低,含矿断裂两侧刀切似的平直,与围岩界线截然,这些矿体的成矿物质显然是来自下部更深的部位。当然,到底深到什么程度、是否到地幔还难于定断。据大量的包裹体均一测温,最大值可达450℃左右(高于此温度后热容等物理化学性质随压力变化不大,与标准状态时的性质相近),因此保守地推测部分矿质可来源于374℃的深部。即使通常被认为是中低温条件下形成的热液铀矿床,其中萤石、石英、方解石等脉石矿物都测到过均一温度超过374℃的数据<sup>[27-34]</sup>。

(3)岩石圈中不同构造降压效果有差异:不同性质断裂的降压效果和时间效果是不同的。在中—上地壳要接近水临界点温压时必须是深大断裂。①若深大断裂快速使含水体系变为开放体系时(如大型张性断裂),则可能形成点多、面广、低富集程度的矿化点或异常点,难于成大矿和富矿。因此,尽管矿体多产于断裂中的张性环境,但若仅是张性性质不变,则难于形成大矿和富矿。②深大断裂达到中上地壳,仅使压力接近临界压力、使某些含水体系的温压临近水的气-液相变线(和临界点)且保持相当长的时间,则该含水体系就可能溶解很多成矿物质。在之后的某一次张性断裂破坏或局部拉张环境下,温度或压力较快地偏离相变线点发生相变,溶解度急剧下降释放出成矿物质而成富矿、大矿。这与构造动力体制转换成矿理论相似<sup>[3-4,35]</sup>。无论是拉张或挤压的断裂,还未见整条断裂均匀含矿的现象,矿体多沿断裂局部、间隔、尖灭再现式地出现。③对于热液铀矿来说,围岩多是脆性的,主要发生脆性剪切、滑动。而对于热液金矿,围岩多是塑性程度高的前寒武系变质

岩,可能发生韧性剪切、滑动。④在区域应力作用下岩层发生褶皱,若在转折端等处形成局部降压区,也有可能引发降压在气-液相变线(点)上的水发生相变,从而使成矿物质或成藏物质被释放出来,形成热液矿床或油气藏。

(4)中生代地壳减薄与热液成矿的关系:在脆性环境中,水的相变控矿以断裂出现为前提。断裂产生、岩石圈破裂,即岩石圈局部的体系性质由封闭变为开放体系,热压存在的条件消失,地压梯度下降。岩石圈封闭和开放时的地压梯度变化,必将影响同一压力值厚度计算的结果,进而影响对矿床形成深度和岩石圈厚度演化的认识<sup>[7,9]</sup>。岩石圈破坏,热压消失,矿物岩石的熔点降低,可造成岩石圈减薄的等同效应。断裂产生起到降压的效果,引发相变而与成矿作用相关。依此思路,可探讨热液成矿大爆发与岩石圈减薄、伸展之间的联系。

(5)构造性质转换控矿的思考:据热液矿床水相变控矿理论,热液矿床多产于断裂性质转换时,而一旦总是张性或挤压性质不变时则难于成大而富的矿床。大多数矿床尽管有不同方向、不同性质的断裂,但大多数情况下只有一组方向发生矿化,即矿体产状大致相近。矿体呈透镜体或尖灭再现等热液矿床中常见的现象,多数情况下可能是先期的X节理后来沿某一枝发生滑动造成局部降压而成矿的结果。由于 $\sigma_1$ 和 $\sigma_3$ 多不在水平面中,即 $\sigma_2$ 不是垂直水平面的,因此在水平坑道中常见不到标准的小菱形,而是近似透镜体状的矿体,并沿节理滑动的一枝发生侧伏。

(6)成矿作用过程中水的来源推测:相当一部分水是因地温状态和地压状态的改变,原赋存在各类岩石裂隙中和矿物中的水被活化迁移出来。华东南铀热液成矿作用的年龄在145~40Ma之间,多集中于120~80Ma这一时段,正是华东南构造伸展、形成断陷盆地的时期<sup>[36~40]</sup>,形成一些深大断裂,深部热物质上拱,地温梯度提高。深大断裂形成,热压存在的封闭条件消失,地压梯度降低<sup>[11]</sup>;压力降低,各种岩石的熔点降低,矿物脱各类水的温度也将下降。这些因素使原赋存于矿物中和岩石裂隙中的水部分脱出,有利于火山岩和侵入岩的形成。脱出的水继续上升至374℃附近,在恰当的地质环境中如“将相变而未相变”时溶解大量的成矿物质,而后进一步降压,水发生相变而使成矿物质被

释放,从而与成矿产生关联。沿上述思路,华东南伸展期次与铀成矿期次的对应关系及成矿的脉动性<sup>[34~35]</sup>可以得到较好的解释。

(7)斑岩型矿床成矿作用的思考:形态上下大小小的斑岩岩枝可以高侵位至近地表1.1~0.7km的深处(此时压力为水临界压力0.0221GPa),由于斑岩所处的地区地温梯度高,温度与水的临界点(374.15℃)接近,在理论上这时的水可以溶解大量的成矿物质。且这时的水是表面张力近于零的超临界水,可在岩体的空隙中近于无阻力地运动,类似于罗照华等<sup>[41~43]</sup>提出的透岩浆流体。这种“临界相变而未相变”状态保持的时间越久对成大矿越有利。深部大岩基是提供大量水和成矿物源的保障,而上侵至地表的小岩株就成为一个成矿物质的“聚集器”,水的温度和压力临界值就是控制成矿的关键“阈值”<sup>[8]</sup>。

(8)分析油气地质演化过程<sup>[44]</sup>:水相变控矿理论认为,油气的运移是和水在一起或溶于水进行迁移的。降压使油水、油气分离,与降压条件相对应的有断裂降压、褶皱降压等。尽管油气分离是在100℃左右的低温下进行的,但油气孕育或源头可能更深,很有可能达374℃左右。这或许有助于油气无机成因的认识。

(9)矿种区域性分布的原因:临相变而未相变时超临界流体可溶解很多成矿物质,但为何会出现成矿类型区域性分布?如赣南和赣北的矿产分布差异明显,一方面是深部基底和围岩不同所致,另外一方面还与各组分在热液中活泼性的差异有关。

(10)相变区和非相变区各组分溶解的差异性对热液成矿作用有着重要的影响,将显示很多成矿作用过程的信息<sup>[45~51]</sup>,是下一步研究的重点。水相变线和拟临界相变线上与远离相变线处水的物理化学性质区别明显,成矿物质、矿化剂、有机质等各种物质在这些变化中表现各异,对成矿、成藏具有重要的意义。如Cu、Au、Pb、Zn、U等溶解度的差异是了解多金属成矿作用具体细节的关键。造岩元素Si、Al、Ca、K、Na等溶解度的差异将决定着蚀变的行为。水的相变对氧化还原反应的影响,对U、Fe、S等变价元素行为的研究非常重要。通过相变区和非相变区水中有机质的溶解、释放可了解油气形成和迁移的细节。此外,在临界点374℃附近,水快速溶解矿物而明显弱化岩石力学性质,因临界奇异性产生瞬时热

高压,还可能触发地震<sup>[13,52]</sup>。

## 5 结 论

(1)当水发生相变时可引起热容、水中矿质溶解度、压缩系数、膨胀系数等物理化学参数突变,特别是在临界点处二级相变时还出现“临界奇异性”,部分参数趋于无穷大,与水在非相变区物理化学性质的小幅度渐变区别明显,必将影响成矿物质的活化、迁移和沉淀。水是否相变和相变的种类取决于构造、岩浆活动、地温梯度等。按岩石圈正常地温线,则直接取决于断裂、皱褶、韧性剪切等降压条件是否存在。由此可以通过热液成矿作用研究来探讨区域大地构造演化过程。

(2)热液矿床水相变控矿理论的 3 个关键:水在相变区和非相变区的物理化学性质的明显差异,使含水系统中成矿物质带入、带出成为可能;出现与相变线(和临界点)温压一致的地质环境,促使成矿物质大量活化进入热液;后期局部降压使水相变而释放出成矿物质。

(3)热液矿床水相变控矿理论研究岩石圈温度和压力变化范围内含水体系的物理化学性质变化及相关地质响应,属构造物理化学的内容。

**致谢:**在工作过程中得到国营 721 铀矿朱国根、胡荣泉、王生、杨松,745 铀矿闭义德和江西银山铅锌矿王振兴等技术人员的大力支持。研究生王运、王志华、张晶、马尧等参与了部分工作。在此一并表示诚挚的感谢。

## 参考文献

- [1]陈衍景,肖文交,张进江.成矿系统:地球动力学的有效探针[J].中国地质,2008,35(6):1059-1073.
- [2]陈衍景,陈华勇,Zaw K,等.中国陆区大规模成矿的地球动力学:以夕卡岩型金矿为例[J].地学前缘,2004,11(1):57-83.
- [3]吕古贤,邓军,倪师军,等.构造物理化学成矿理论问题探讨[J].大地构造与成矿学,2003,27(3):250-263.
- [4]吕古贤,邓军,李晓波,等.构造物理化学的思路、研究和问题[J].地质学报,2006,80(10):1616-1626.
- [5]侯增谦,王二七.印度-亚洲大陆碰撞成矿作用主要研究进展[J].地球学报,2008,29(3):275-292.
- [6]毛景文,谢桂青,李晓峰,等.华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展[J].地学前缘,2004,11(1):45-55.
- [7]邓军,高帮飞,王庆飞,等.成矿流体系统的形成与演化[J].地质科技情报,2005,24(1):49-54.
- [8]胡宝群,王方正.岩石圈中 4 个与水有关的重要温度[J].地学前缘,2001,8(3):110.

- [9]胡宝群,王方正,孙占学,等.岩石圈中的地压梯度[J].地学前缘,2003,10(3):129-134.
- [10]胡宝群,吕古贤,王方正,等.水的临界奇异性及其对热液铀成矿作用的意义[J].铀矿地质,2008,24(3):129-136.
- [11]胡宝群,吕古贤,王方正,等.岩石圈中热压系数的计算[J].地学前缘,2008,15(3):123-129.
- [12]胡宝群,吕古贤,王方正,等.水的相变:热液成矿作用的重要控制因素之一[J].地质评论,2009,55(5):722-730.
- [13]胡宝群,吕古贤,王方正,等.岩石圈中水的临界奇异性与断裂耦合触发地震[J].地震地质,2009,31(2):218-225.
- [14]胡宝群,吕古贤,王方正,等.热液矿床水相变控矿的机制[J].矿物学报,2009,29(S1):278.
- [15]崔晶晶,张宝泉,刘秀凤.超临界流体扩散和反应过程的奇异行为[J].天津科技大学学报,2003,18(1):1-4.
- [16]段黎萍,陆九芳,陈健,等.应用重整化群理论计算超临界水的性质[J].化工学报,2003,62(1):18-23.
- [17]姜涛,韩布兴.超临界流体化学热力学[J].化学进展,2006,18(5):657-669.
- [18]沈伟国,郑国康.溶液的临界现象[J].物理化学学报,1993,9(1):137-143.
- [19]孙大坤.比热异常综述[J].物理学进展,1989,9(4):451-476.
- [20]张丽莉,陈丽,赵雪峰,等.超临界水的特性及应用[J].化学工业与工程,2003,20(1):33-38,54.
- [21]Wagner W, Cooper J R. The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2000, 122(1): 150-183.
- [22]邓晋福,莫宣学,赵海玲,等.岩石圈、软流圈系统的大灾变与巨型矿集区形成[C]//裴荣富,等.深部成矿作用与成矿.1999:36-44.
- [23]黄惠兰,常海亮,付建明,等.西华山脉钨矿床的形成压力及有关花岗岩的侵位深度[J].矿床地质,2006,25(5):562-571.
- [24]倪师军,金景福.302 铀矿床热液的混合和沸腾及其地质意义[J].成都地质学院学报,1992,19(4):9-15.
- [25]肖新建,顾连兴,倪培.安徽铜陵狮子铜-金矿床流体多次沸腾及其与成矿的关系[J].中国科学(D 辑),2002,32(3):199-206.
- [26]张德会.流体的沸腾和混合在热液成矿中的意义[J].地球科学进展,1997,12(6):49-55.
- [27]范洪海,何德宝,顾大钊,等.江西赣南白面石铀矿田流体包裹体特征研究[J].矿物学报,2007,27(Z1):193-194.
- [28]顾大钊,范洪海,林锦荣,等.赣南河草坑地区铀矿床流体包裹体特征研究[J].铀矿地质,2008,24(3):137-142.
- [29]郭国林.棉花坑花岗岩型热液铀床成矿机理研究[D].东华理工大学硕士学位论文,2009:27-29.
- [30]黄锡强,陈正乐,王平安,等.江西相山铀矿田沙洲矿床流体包裹体研究[J].地质力学学报,2008,14(2):176-185.
- [31]潘家永,曹双林,管太阳,等.下庄铀矿田流体包裹体地球化学研究[J].铀矿地质,2007,23(5):257-261.
- [32]王蕾,张树明,蒋振频,等.相山铀矿田沙洲矿床流体包裹体研究[J].大地构造与成矿学,2008,32(4):500-508.
- [33]张鸿,陈正乐,杨农.江西省相山矿田横洞-岗上英矿床构造控



- 矿特征分析[J].地质力学学报, 2009, 15(1): 36-49.
- [34]张树明,王蕾,蒋振频,等. 邹家山铀矿床流体包裹体研究[J].铀矿地质, 2009, 25(5):263-269.
- [35]翟裕生,吕古贤.构造动力体制转换与成矿作用[J].地球学报, 2002, 23(2):97-102.
- [36]胡瑞忠,毕献武,苏文超,等.华南白垩—第三纪地壳拉张与铀成矿的关系[J].地学前缘, 2004, 11(1): 153-160.
- [37]胡瑞忠,毕献武,彭建堂,等.华南地区中生代以来岩石圈伸展及其与铀成矿关系研究的若干问题[J].矿床地质, 2007, 26(2):139-152.
- [38]马东升.华南重要金属矿床的成矿规律——时代爆发性、空间分带性、基底继承性和热隆起成矿[J].矿物岩石地球化学通报, 2008, 27(3): 209-217.
- [39]华仁民,陈培荣,张文兰,等.论华南地区中生代 3 次大规模成矿作用[J].矿床地质, 2005, 24(2):99-107.
- [40]王登红,许建祥,张家菁,等.华南深部找矿有关问题探讨[J].地质学报, 2008, 82(7):865-872.
- [41]罗照华,莫宣学,卢欣祥,等.透岩浆流体成矿作用——理论分析与野外证据[J].地学前缘, 2007, 14(3): 165-183.
- [42]罗照华,卢欣祥,郭少丰,等.透岩浆流体成矿体系[J].岩石学报, 2008,24(12):2669-2678.
- [43]罗照华,高飞.透岩浆流体成矿作用理论简介[J].自然杂志,2009, 31(5): 254-257, 276.
- [44]王志欣,张一伟.油气地质演化过程中的渐变与突变[J].石油大学学报(自然科学版), 2000, 24(4):34-38, 42.
- [45]龚庆杰,韩东昱,王玉荣. 4.0%NaCl 水溶液临界区域内白钨矿溶解度实验测定[J].岩石学报, 2006, 22(12): 3052-3058.
- [46]张荣华,胡书敏.地球深部流体演化与矿石成因[J].地学前缘, 2001, 8(4): 297-309.
- [47]张荣华,张雪彤,胡书敏.临界区流体与矿物和岩石在地球内部极端条件下的反应[J].地学前缘, 2009, 16(1):53-67.
- [48]Foustoukos D I, Seyfried W E. Quartz solubility in the two-phase and critical region of the NaCl-KCl-H<sub>2</sub>O system: Implications for submarine hydrothermal vent systems at 9°50'N East Pacific Rise[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2007, 71(1): 186-201.
- [49]Loucks R R, Mavrogenes J A. Gold Solubility in Supercritical Hydrothermal Brines Measured in Synthetic Fluid Inclusion[J]. Science, 1999, 284(5423): 2159-2163.
- [50]Manning C E. Mobilizing aluminum in crustal and mantle fluids[J]. Journal for Geochemical Exploration, 2006, 89 (1/3): 251-253.
- [51]Newton R C, Manning C E. Thermodynamics of SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O fluid near the upper critical end point from quartz solubility measurements at 10 kbar[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 274 (1/2): 241-249.
- [52]荣代璐.地壳中流体临界温度的重要作用——论“多震层”的成因及大震前兆[C]//马宗晋.大陆多震层研究.北京:地震出版社, 1992: 167-173.