

初论浅成作用和热液矿床成因分类

陈衍景^{1,2}

1. 北京大学 造山带与地壳演化重点实验室, 北京 100871
2. 中国科学院 广州地球化学研究所 成矿动力学重点实验室, 广东 广州 510640

Chen Yanjing^{1,2}

1. Key Laboratory of Orogen and Crust Evolution, Peking University, Beijing 100871, China
2. KLMD, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

Chen Yanjing. On epizonogenism and genetic classification of hydrothermal deposits. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(2): 027-034

Abstract: This paper, through listing the genetic type names of hydrothermal gold deposits presented in literatures, reveals that the existing genetic classifications of hydrothermal deposits are scientifically illogical, confusing and abusive, without satisfactory connection to logics in other geoscience disciplines. This greatly hinders the ore geological training, research and exploration targeting, and is resulted from a conceptual gap of the geological processes occurred at depths less than 10 km and temperatures of 50–300 °C. Hence we propose a concept of epizonogenism to describe the geological processes occurred at depths of <10 km and temperatures of 50–300 °C. In correspondence, hydrothermal deposits are classified into three end-members, namely epizonogenic, metamorphic and magmatic. It is confirmed that the epizonogenic fluids are characterized by low-salinity and CO₂-poor, the metamorphic fluids by low-salinity and high-content of CO₂-rich, and the magmatic fluids by high-salinity and variable content of CO₂. The magmatic hydrothermal systems contain multiple daughter-crystals-bearing and CO₂-rich high-salinity fluid inclusions; the metamorphic deposits contain low-salinity CO₂-rich fluid inclusions; and the epizonogenic hydrothermal systems contain neither daughter-crystal-bearing nor CO₂-rich/bearing fluid inclusions, but are populated by aqueous fluid inclusions.

Key words: epizonogenism; ore-fluid; fluid inclusion; hydrothermal deposit; genetic type of ore deposit

摘要:通过简单列举现有金矿床类型的名称,发现热液矿床分类命名混乱、繁杂、缺乏科学逻辑,严重制约着教学、科研和找矿勘探事业的发展,原因是对于深度<10 km、温度为50~300 °C条件下的地质作用研究薄弱,缺乏概念描述,构成认识盲区,因此提出了浅成作用(epizonogenism)的概念,用于概括深度<10 km、温度为50~300 °C条件下的地质作用。藉此将热液矿床划分为浅成热液、变质热液和岩浆热液等3个成因端员;确定浅成、变质和岩浆流体的特征分别是低盐度-贫CO₂、低盐度-富CO₂和高盐度-CO₂含量变化大;岩浆热液矿床发育含多子晶包裹体和高盐度富CO₂的包裹体,变质热液矿床发育低盐度富CO₂包裹体,浅成热液矿床只发育水溶液包裹体,缺乏含子晶包裹体和富/含CO₂包裹体。

关键词:浅成作用;成矿流体;流体包裹体;热液矿床;矿床类型

中图分类号:P611 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2010)02-0027-08

收稿日期:2010-03-10

基金项目:国家重点基础研究发展计划“973”项目(2006CB403508);国家自然科学基金项目(40425006,40730421)

作者简介:陈衍景(1962—),男,教授,从事矿床地质学研究。E-mail: yjchen@pku.edu.cn

1 热液成矿系统分类的问题

任何矿床都是由地质作用形成的产于某种地质环境的与周围岩石具有成分差异的特殊地质体。热液成矿过程受构造、岩浆、地层、流体等多种地质因素的制约,矿床产出形式多种多样,加之流体成矿系统的复杂性和地球科学家对于各类地质作用的物理化学条件、过程及其产物特征等认识的不确定性或分歧,致使:(1) 成矿系统分类的思路、依据不一致,分类方案繁多、混乱,甚至个别类型名称是没有依据地随意提出的;(2) 一些重要或典型的矿床类型叫法不一,成因纷争;(3) 一些概念“形同意异”或“形异意同”或“亦此亦彼”^[1],更严重地表现在概念之间相互涵盖。以热液金矿床为例,文献中至少出现过如下名称^[2-3](参见原文评述;恕不一一列举文献):石英脉型、重晶石脉型、碳酸盐脉型、白钨矿-石英脉脉型、辉锑矿-石英脉型、黄铁石英脉型、硫化物石英脉型、构造蚀变岩型、蚀变破碎带型、断裂破碎带型、剪切带型、韧性剪切带型、层控型、BIF 层控型、含金铁建造型、炭质层控型、VHMS 或 VMS 型(块状硫化物型)、不整合型、海相/陆相火山岩型、细碧岩型、滑石菱镁岩型、微细粒浸染型、沉积岩型、浊积岩型、砾岩型、砂岩型、黑色页岩型、碳硅泥岩型、浅变质碎屑岩型、板岩型或 VSH(Victoria slate hosted)型、绿岩带型、花岗岩型、碱性岩型、侵入体内外接触带型、夕卡岩型、爆破/隐爆角砾岩(筒)型、斑岩型、铁氧化物型或 IOCG 型、铜镍硫化物型、火山热液型、岩浆热液型、变质热液型、海底热液型、大气降水热液型、低温热液型(low-temperature hydrothermal)、浅成低温热液型(epithermal)、中温热液型、中温中深成热液型(mesothermal)、高温热液型、改造型(reworking)等,更有以典型矿床名称命名的 Carlin 型、Carlin-like 型、Witwatersrand(或 Rand 兰德)型、Hemlo 型、Homestake 型、Olympic Dam 型、Abitibi 型或 Kolar 型、Murutau 型以及焦家式、玲珑式、河台式、上宫式、祁雨沟式、团结沟式、阿希式、沃溪式,还有各种各样的成矿系列及其亚系列名称,成矿元素组合分类的多种名称,等等。如果考虑到其他成矿元素或矿种的类型名称,恐怕世界上很难有一位矿床学家能够说清楚究竟有多少个矿床类型名称。而且,新的名词还在涌现,充分显示了对矿床类型命名的随意性,也使人怀疑当前矿床类型名

称的科学性。

对于年轻学者或缺乏时间阅读文献的勘查人员来说,单就搜索、记忆繁多的矿床类型名称,已经不堪重负,更难理解和掌握其内涵、特征、成因、富集规律以及勘查评价技术要领,在使用上难免偏差和错误。目前文献中出现的矿床类型名称与《矿床学》、《普通地质学》、《岩石学》等教材的内容、科学逻辑等无法衔接,成为固体地球科学研究中的“不相容元素”,已经给矿床学教学和研究造成了极大的困难。因此,摒弃一些不合理的命名,建立简单易行、科学实用又与其他学科内容谐和、逻辑贯通的矿床分类方案,已经非常迫切和必要。

事实上,热液矿床是成矿流体活动的产物,成矿流体的起源、运移,萃取和搬运成矿物质的能力和规律,卸载成矿物质的条件、场所,自然成为热液矿床研究的主要问题和难题。成矿流体活动记录在热液矿物及其流体包裹体中,流体包裹体是记录流体成矿系统的“化石”,也是研究古流体成矿作用的“探针”。近年,流体包裹体研究技术、思路 and 结果解释获得了飞速进步,使得科学家对于成矿流体的性质有了更为深刻而准确的认识,进而使基于流体性质而进行热液成矿系统^[4]分类成为可能^[3]。

鉴于上述情况,考虑到现有《普通地质学》、《岩石学》、《地球化学》和《矿床学》等教材的概念、内容及其科学逻辑关系,结合热液矿床流体包裹体研究的最新进展,本文采用比较矿床学研究思路^[5],提出浅成作用的概念,分析了浅成热液的物理化学特点,将热液矿床分为岩浆热液、变质热液和浅成热液 3 个大类或系列,初步确定了不同类型成矿热液的性质,特别是成矿系统的流体包裹体特征及其差异。

2 浅成作用及其重要性

矿床类型的划分总体上是按照成矿地质作用的性质而进行的。根据《普通地质学》等相关分支学科将地质作用划分为内营力和外营力两部分,矿床也被相应地分为内生矿床和外生矿床。外生矿床被区分为机械沉积矿床(砂矿)、胶体沉积矿床、生物化学沉积矿床、蒸发沉积矿床、生物沉积矿床、风化壳矿床、风化沉积矿床等,内生矿床被分为岩浆矿床、伟晶岩矿床、夕卡岩矿床、热液矿床、变质矿床等^[6]。除热液矿床之外,其他类型矿床的成因基本清楚,认

识一致,很少争议。在很大程度上,这种地质作用类型和矿床类型的划分是成功的、科学的、实用的,分类依据实为成矿地质作用性质及其温度、压力(深度)差异。然而,在《普通地质学》、《岩石学》等学科教材中,沉积等外生地质作用的温度上限为 50°C ,变质作用的起始温度为 $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ (起始温度随岩性变化而有所不同),岩浆作用温度至少为岩浆结晶分异的最低共结点温度 573°C 。如此,存在一个明显的盲区,即没有概念描述 $50\sim 300^{\circ}\text{C}$ 温度范围的地质作用。以地温梯度 $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 计算, $50\sim 300^{\circ}\text{C}$ 温度范围的相应深度是 $0\sim 10\text{ km}$,属于地壳或岩石圈的浅层。恰恰是在这一认识盲区($50\sim 300^{\circ}\text{C}$ 、 $0\sim 10\text{ km}$ 深度)环境下,不可避免地发生着地质作用和成矿作用,形成了大量热液金属、非金属矿床以及能源矿床(油气、煤、铀矿)^[1]。因此,有必要将发生在温度 $50\sim 300^{\circ}\text{C}$ 、深度 $0\sim 10\text{ km}$ 的地质作用定义为浅成作用(epizonogenism)^[7](图1),由浅成作用形成的热液矿床为浅成热液矿床(epizonogenic hydrothermal deposit)。

值得强调,当前人类对于矿产资源的勘查和开采活动,甚至工程地质活动等,都是在浅成作用的空间范围进行的,地质勘探还未能达到浅成作用空间的最大深度,这充分显示了研究浅成作用的重要性。换句话说,即使是变质矿床、变质热液矿床、岩浆矿床、岩浆热液矿床等,其成矿晚期或成矿后,都必定经历浅成作用或强或弱的改造之后,才能被人类所触及或开发。那么,认识、筛分或剔除浅成作用的改造,也是正确认识各类成矿系统特征及其差异的关键问题之一。例如,华南地区与陆壳改造型花岗岩有关的钨锡石英脉矿床和胶东金矿省的变质热液型金矿床都曾被错误地作为大气降水热液作用的产

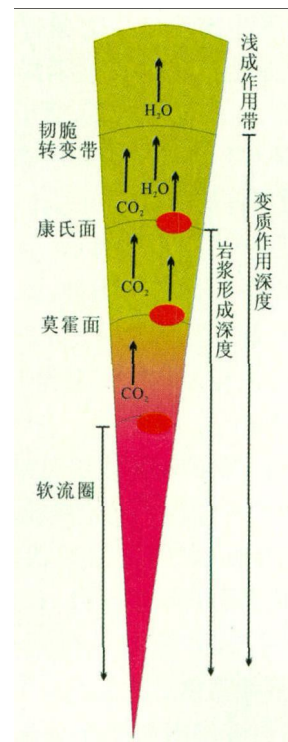


图1 浅成作用及其与岩石变质、熔融作用的空间关系

Fig. 1 Space of epizonogenism and its relation to metamorphism and magma generation

物^[8],原因就是片面地强调了浅成作用的叠加改造,忽视了成矿系统的发育机制和流体成矿过程早、中阶段的重要性^[3]。最近研究表明,很多岩浆矿床(如铜镍硫化物矿床、钒钛磁铁矿矿床)也在成矿后发生了浅成热液蚀变^[7]。

可见,认识的盲区——浅成作用,很大程度上导致了热液成矿系统分类的混乱,造成一些热液成矿系统成因认识的争论,制约了教学和科研工作的深入开展。

事实上,很多学者早就认识到浅成作用的重要性,并从各自的研究领域或侧面予以命名。成岩作

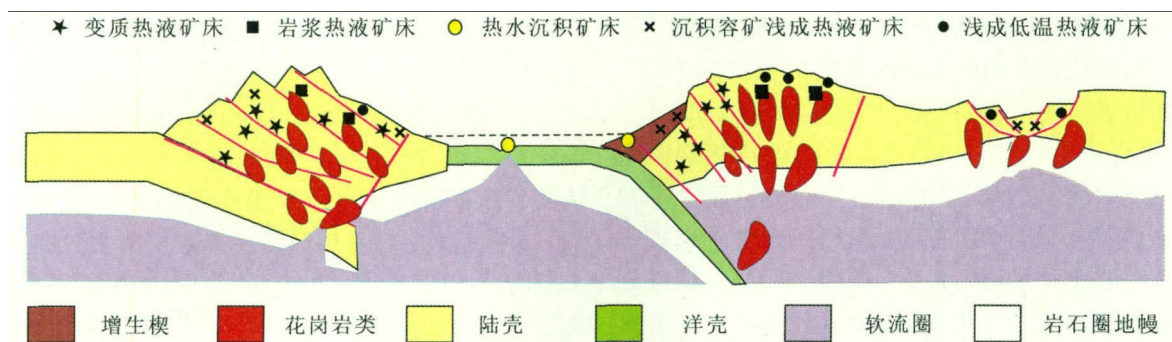


图2 各类热液成矿系统的构造背景

Fig. 2 Tectonic settings of different type hydrothermal systems

用(diagenesis)发生的温度压力条件^[9]与前述浅成作用相当,但其运用已被共识性地局限于沉积岩的沉积作用之后。值得说明的是,Winkler 强调成岩作用与区域变质作用的应力变形状态和流体压力系统有差异:变质条件的构造作用总体属于韧性变形,流体为静岩或超静岩压力体系($p_f \geq p_l$);成岩作用条件的构造变形总体属于脆性,流体系统的压力介于静水压力与静岩压力之间($p_l > p_f > p_h$),并以静水压力体系为主导;同时,认识到 H_2O 和 CO_2 是流体的最主要成分^[9]。

与岩浆活动有关的流体作用及成矿作用长期受到重视,曾一度呈现岩浆一元论统治矿床成因研究的局面^[6]。Lindgren 曾将与岩浆活动有关的热液矿床划分为汽化高温热液矿床(hypothermal)、中温热液矿床(mesothermal)和浅成低温热液矿床(epithermal)^[10],其界线温度分别是 350 °C 和 200 °C^[11]。显然,浅成低温热液作用和部分中温热液作用的温度条件属于前述浅成作用的范畴。但是,epithermal(浅成低温热液)作用被普遍限定为岩浆驱动的发生于中酸性火山岩中的大气降水主导的热液作用,浅成低温热液矿床被限定为产于陆相火山岩中的低温热液矿床^[12]。对于发生在沉积岩中的同样属于浅成、低温的热液作用及其形成的矿床,则不能称为 epithermal(浅成低温热液),文献中用低温热液(low-temperature hydrothermal)来描述。这种情况一方面反映了用词的严格,另一方面也说明了由于缺乏浅成作用的概念所造成的混乱。实际上,二者的流体来源和温度、压力等物理化学条件是非常相似的。

基于大量热液矿床实例研究,涂光炽提出了改造作用(reworking)的概念^[13-16],用于概括在沉积作用与变质作用之间的 50~300 °C 温度范围的地质作用和成矿作用,从而将成矿地质作用分类方案由“三分法”(沉积、变质和岩浆)拓展为更完善的“四分法”,即岩浆作用、变质作用、改造作用和沉积作用。而且,涂光炽还指出变质热液矿床与改造热液矿床的差别在于前者发育富 CO_2 流体包裹体,后者不发育^[14]。然而,改造作用有时被理解为先成矿床或地质体在后期地质作用中发生物质成分、结构构造或产出形式等方面的变化过程,包括遭受岩浆作用或变质作用的改造。如此,改造作用的温度、压力范围被扩大,包括了岩浆作用、变质作用和浅成作用,也过分强调了多次地质/成矿作用的叠加,与涂先生提

出的改造作用的含义差别较大。所以,在某种程度上说,“改造作用”易使人误解为先成矿床或地质体遭受后期构造热事件的叠加作用,偏离了浅成作用的内涵。

总之,浅成作用概括了发生在地下 10 km 以内、50~300 °C 温度范围各类内生地质作用过程,包括了浅成低温热液作用(岩浆驱动)、改造作用(按照涂光炽先生 1986 年定义)、成岩作用(限于沉积岩)等,但含义更准确,与变质作用、岩浆作用以及沉积等表生作用的界线清楚。

3 热液成矿系统的新分类

明确了浅成作用的特征及其与变质和岩浆作用的差异之后,我们即可将热液成矿系统简单地划分为与《普通地质学》、《矿床学》和《岩石学》等教材内容相一致的 3 个端员性的类型或系列,即浅成热液、变质热液和岩浆热液矿床,简单说明如下。

(1) 岩浆热液矿床(magmatic hydrothermal deposit)。该类矿床包括文献中常见的斑岩型、爆破角砾岩型、夕卡岩型、铁氧化物型或 IOCG 型(iron oxide copper-gold system)、云英岩型、碳酸岩型和脉型矿床(intrusion-related vein)。此类矿床的突出特点就是产于岩浆侵入体内部或侵入体附近的围岩中,初始成矿热液来自岩浆热液,后演化为岩浆热驱动的大气降水热液,通常早阶段成矿温度较高(> 350 °C),也称“浆控高温热液型(intrusion-related hypothermal type)”^[17],相关研究工作较多,认识较为深入。其中,脉型矿床的典型代表有华南的钨锡石英脉、东秦岭的辉钼矿石英脉^[18](如寨洼钼矿)和辉钼矿萤石脉^[19](如土门钼矿)以及一些含金石英脉^[20-21]。值得说明,无论岩浆热液矿床形成深度如何,岩浆及岩浆热液的起源深度都是较大的,一般大于 12 km。

(2) 变质热液矿床(metamorphic hydrothermal deposit),又称造山型矿床(orogenic-type deposit)。该类矿床系由造山型金矿概念和成因模式拓展而来^[22],缘于派生成矿热液的区域变质作用总是伴随于造山作用(包括俯冲增生造山、大陆碰撞造山、陆内走滑造山和陆内挤压造山)。造山型金矿是指由变质热液形成的构造控制的脉状金矿床,在时间和空间上与造山作用有关,包括了文献中常见的石英脉型、韧性剪切带型、构造蚀变岩型、绿岩带型、浊积

表 1 内生成矿作用分类 (设地温梯度为 30 °C/km)

Table 1 Classification of endogenic metallogenesis (geothermal gradient: 30 °C/km)					
地质作用	深度范围/km	温度范围/°C	固体产物	热液类型	热液成矿系统
岩浆作用	康氏面及以下	>573	岩浆岩/岩浆矿床	岩浆热液	岩浆热液矿床
变质作用	>5	>200	变质岩/变质矿床	变质热液	变质热液矿床
浅成作用	<10	50~300	浅成岩/浅成矿床	浅成热液	浅成热液矿床

岩型等金矿床^[22-23],涵盖了 23 个储量>500 t 的金矿床,是最重要的黄金资源^[24]。最近,我国学者识别了一批造山型的银矿床、铜矿床、铅锌矿床、钼矿床^[7],国外学者识别了变质热液型的钨钼矿床^[25]。值得特别重视的是,我国寻找此类矿床的潜力巨大。这类矿床可根据产状进一步划分为断控脉状矿床和层控脉状矿床。

(3) 浅成热液矿床 (epizonogenic hydrothermal deposit)。该类矿床包括了 3 种情况:①产于陆相火山岩、次火山岩中,由岩浆驱动的循环大气降水热液作用形成的后生低温热液型的金、银、铅、铜、铀等金属元素矿床和一些非金属矿床,惯称浅成低温热液型 (epithermal),本文称为火山容矿浅成热液型 (volcanic-hosted epithermal/epizonogenic hydrothermal, 简称为 VHE 或 VHEH),可进一步划分为高硫型和低硫型。②产于沉积建造中的由循环大气降水热液或活化盆地卤水作用形成的后生低温热液矿床,可称为沉积容矿浅成热液型 (sedimentary-hosted epithermal/epizonogenic hydrothermal, 简称为 SHE 或 SHEH),包括了文献中常见的卡林型金矿、MVT 型铅锌矿、砂岩型铜矿、砂岩型铀矿、汞矿床和一些低温分散元素矿床。③由海底热液喷流沉积作用(发生在岩石圈-水圈界面)形成的同生热液矿床,常称热水沉积矿床或块状硫化物矿床,根据容矿地层中火山岩的多寡区分为 VMS 或 VHMS 型 (volcanogenic massive sulfide 或 volcanic-hosted massive sulfide) 和 SEDEX 型 (sedimentary exhalation)。很明显,热水沉积作用是介于内生与外生之间的成矿地质作用,即沉积成矿作用发生在地壳表面,具有外生作用的特征,但由地球内部能量驱动。

需要说明,上述只是 3 个端员,其标志性地质和流体包裹体特征可参见陈衍景等^[3]和卢焕章等^[26]的研究,形成的构造背景见图 2。事实上,它们之间的过渡和叠加现象是难免甚或常见的。过渡于岩浆热液与变质热液之间的可能就是混合岩化热液矿床,火山岩中过渡于岩浆热液与浅成热液之间的矿

床可能是高硫型浅成低温热液矿床,沉积岩中过渡于变质热液与浅成热液之间的可能是类卡林型金矿、部分 MVT 型铅锌矿等。叠加于 VMS 和 SEDEX 型矿床之上的变质热液矿化的实例繁多,如阿勒泰南缘的阿巴宫铅锌矿带,狼山—渣尔太山的铜、铅、锌、金、银矿化,辽宁红透山铜矿田;叠加于 VMS 之上的岩浆热液矿化也已被广泛报道,如大厂锡多金属矿田,长江中下游成矿带等;叠加于岩浆热液矿床之上的变质热液矿化的典型实例是挪威的造山型钨钼矿床。

4 不同类型成矿热液的性质及其差异

科学而实用的成矿作用分类使得很多复杂的问题简单化,而且能够使我们运用中学、大学阶段已经掌握的物理、化学等知识理解和把握不同类型成矿热液及矿床的特征和差异。

物理化学知识告诉我们,热液中的气相组分含量随压力增高而增高,随温度增高而降低;溶质在热液中的溶解度或盐度随温度的增高而增高^[3]。由于 H、C、O 是地球的主要元素组成,热液的最主要成分是 H₂O 和 CO₂^[9];CO₂ 汽化温度显著高于 H₂O,决定了富 CO₂ 流体通常形成于较大的压力条件下。因此,盐度、CO₂ 含量、H₂O 含量 (或 CO₂/H₂O 含量比值)可以很好地标定热液的特征和来源,即浅成热液的盐度低、贫 CO₂,变质热液盐度高、富 CO₂,岩浆热液盐度高、CO₂ 含量变化范围大 (图 3)。与成矿热液的性质相对应,浅成热液矿床只发育低盐度、贫 CO₂ 的水溶液包裹体,罕见 CO₂ 包裹体或含子晶包裹体;变质热液矿床大量发育低盐度的富 CO₂ 包裹体,但流体沸腾或相分离之后可出现含子晶包裹体发育;岩浆热液矿床大量发育高盐度的含子晶包裹体,特别是含 CO₂ 的多子晶包裹体,甚至出现熔融包裹体^[3]。

下面根据 3 类热液的起源,分析解释其特征。

(1) 浅成热液来自于地壳浅部 (<10 km),因地

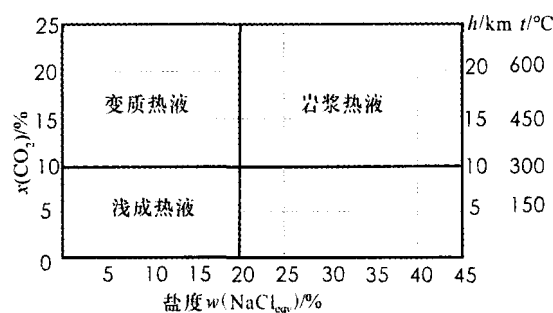


图3 不同类型热液的盐度和 CO_2 含量
及其与温度、压力的关系

Fig. 3 The salinity and CO_2 content in different hydrothermal fluids and their relations to temperature and pressure

壳浅部断裂系统多为脆性而可与地表水联通^[9],成分受地表水(海水和大气降水)制约明显。在浅成作用温度范围(50~300 °C),多数硅酸盐矿物不发生变质。沉积物等表壳岩(supracrustal rock)脱孔隙水、结晶水、吸附水、矿物层间水等自由水而形成浅成热液。同时,碳酸盐矿物因热分解温度较高而无法向流体系统提供较多 CO_2 ,且流体系统因压力低、深度浅而有利于 CO_2 逃逸。因此,浅成热液以 H_2O 为主, CO_2 含量低。又因为硅酸盐等矿物不能热分解,只有一些 NaCl 、 KCl 、 CaSO_4 等可以分解或溶解,所以流体盐度低,即使出现含子晶的流体包裹体,子晶也只能是盐类矿物。不难理解,浅成热液及其产物具有变化范围较大的各种同位素比值,原因是它来自性质差异较大的流体储库和岩性组合,且在热液作用过程中因温度低而很难达到同位素分馏平衡(均一化)。

(2)变质热液的产生深度一般大于 10 km,温度高于 200 °C。由于浅成作用使大量自由水脱出,变质热液只能主要来自矿物热分解作用,即含羟基矿物(云母、绿泥石、蛇纹石等)变质分解和碳酸盐矿物热分解而脱 CO_2 作用(如 $\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2$),因此, $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 比值明显高于浅成热液,阳离子以 K、Na、Ca、Mg 和一些成矿金属为主。由于多数硅酸盐矿物不能溶解或融化,而盐类矿物已经在浅成作用阶段分解,因此流体盐度仍然偏低,甚至低于浅成热液。当此类流体上升并与围岩反应时,硅化、钾化、碳酸盐化成为不可缺少的蚀变类型。特别说明,流体因 CO_2 活度高,一方面可促进围岩中富 K、Na、Ca、Mg 等矿物(如长石类、角闪石、云母等)的溶解,使成矿物质被活化萃取再沉淀,另一方面有利于 CO_2 渗透到围岩而发生碳酸盐化,例如,

上官金矿蚀变组合中就发育大量铁白云石^[27]。显然,与浅成热液相比,变质热液及其水岩作用产物的各种同位素比值的变化范围较小。

(3)岩浆热液伴随岩浆熔融、分异而产生,初始起源温度不低于 600 °C,按地温梯度 30 °C/km 计算深度 > 20 km,按照地温梯度 50 °C/km 则计算为 12 km。在一定程度上,岩浆相当于超高级变质作用所派生的熔体-流体系统,是多种硅酸盐、氧化物、碳酸盐等矿物分解的综合产物。随岩浆上侵、结晶分异及其与围岩相互作用的进行,分泌出高盐度、富 CO_2 的岩浆热液,这种热液进一步上升、演化和与围岩-流体系统相互作用,形成浆控高温热液成矿系统。由于浆控高温热液成矿系统与围岩中的流体系统之间存在悬殊的盐度、温度和 CO_2 含量等方面的差异,成矿系统自然向降低盐度、温度和 CO_2 含量的方向演化,使成矿系统中心和早阶段发育高温蚀变组合,发育含子晶的富 CO_2 包裹体^[17],外围和晚阶段发育低温蚀变以及低盐度、低 CO_2 含量的水溶液包裹体。自然,岩浆热液和岩浆热液矿床具有更小变化范围的各种同位素比值,甚至部分同位素比值表现为地幔物质的特征。

需要补充说明,由于岩浆热液成矿系统和变质热液成矿系统往往在成矿过程的中、晚阶段混入大气降水热液——浅成热液作用,致使成矿中、晚阶段捕获的流体包裹体不能有效地指示矿床成因,因此,只有成矿早阶段的流体包裹体才能作为成因判别依据。

5 结论

(1)当今固体地球科学研究对于深度 < 10 km、温度为 50~300 °C 条件下地质作用的研究薄弱,缺乏概念描述,构成认识盲区,导致热液矿床分类命名的混乱和繁杂,严重制约着教学、科研和找矿勘探事业的发展。因此,有必要将发生在温度 50~300 °C、深度为 0~10 km 的地质作用定义为浅成作用(epizonogenism),由浅成作用形成的热液矿床为浅成热液矿床(epizonogenic hydrothermal deposit)。

(2)热液矿床可划分为 3 个成因端员,即浅成热液、变质热液和岩浆热液。浅成热液以低盐度、贫 CO_2 为特征,变质热液以低盐度、富 CO_2 为特征,而岩浆热液则以高盐度、 CO_2 含量变化大为特征。岩浆热液矿床发育含多种子晶包裹体和高盐度富 CO_2

的包裹体,变质热液矿床发育低盐度富 CO₂ 包裹体,浅成热液矿床只发育水溶液包裹体,缺乏含子晶包裹体和富/含 CO₂ 包裹体。

笔者曾有幸跟随涂光炽院士开展野外地质考察,聆听先生教诲,受益颇多。在涂先生 90 诞辰之际,谨以此文追忆和纪念! 本文是与众多同行共同研究和讨论的结晶,特此致谢!

References

- [1] Tu G C. Mineralization and Ore Exploration [M]. Shijiazhuang: Hebei Education Press, 2003: 454(in Chinese).
- [2] Chen Y J, Fu S G. Gold mineralization in West Henan, China [M]. Beijing: Seismological Press, 1992: 234 (in Chinese).
- [3] Chen Y J, Ni P, Fan H R, et al. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(9): 2085-2108(in Chinese).
- [4] Zhai Y S, Deng J, Tang Z L. Metallogenic Systems of Paleontinental Margin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 384(in Chinese).
- [5] Tu G C, Li C Y. On comparative metallogeny [J]. Geochimica, 2006, 35: 1-5(in Chinese).
- [6] Hu S X. Mineral Deposits [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1982: 1-200(in Chinese).
- [7] Chen Y J, Zhai M G, Jiang S Y. Significant achievements and open issues in study of orogenesis and metallogenesis surrounding the North China continent [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(11): 2695-2726(in Chinese).
- [8] Zhang L G. Petrogenic and Metallogenic Theory and Ore Exploration [M]. Beijing: Beijing Industrial University Press, 1990: 200(in Chinese).
- [9] Winkler H G F. Petrogenesis of Metamorphic Rocks [M]. Berlin: Springer, 1976: 1-334.
- [10] Lindgren W. Mineral Deposits [M]. 4th ed. New York: McGraw Hill, 1933: 930.
- [11] Hu S H. Petrology of Metasomatic Rocks and Implications for Ore Exploration [M]. Beijing: Science Press, 2002: 264 (in Chinese).
- [12] Pirajno F. Hydrothermal Processes and Mineral Systems [M]. Berlin: Springer, 2009: 1-1250.
- [13] Tu G C. On multiple origins of ore deposits [J]. Geology and Prospecting, 1979(6): 1-5(in Chinese).
- [14] Tu G C. On the formation of ore deposits by reworking, with remarks on the weakness of the present genetic classification of ore deposits [G]// Geochemical Collections. Beijing: Science Press, 1986: 1-7(in Chinese).
- [15] Tu G C. Geochemistry of Strata-bound Deposits in China (Vol. 2) [M]. Beijing: Science Press, 1987: 1-298(in Chinese).
- [16] Tu G C. Geochemistry of Strata-bound Deposits in China (Vol. 3) [M]. Beijing: Science Press, 1988: 1-380(in Chinese).
- [17] Chen Y J, Li N. Nature of ore-fluids of intracontinental intrusion-related hypothermal deposits and its difference from those in island arcs [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(10): 2477-2508(in Chinese).
- [18] Deng X H, Chen Y J, Yao J M, et al. Fluid inclusion constraints on the origin of the Zhaiwa Mo deposit, Luoning County, Henan Province [J]. Geology in China, 2008, 35(6): 1250-1266(in Chinese).
- [19] Deng X H, Mei M, Yao J M. Study of fluid inclusions and ore genesis of the Tumen Mo-fluorite vein deposit, Henan Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(10): 2537-2549(in Chinese).
- [20] Baker T. Emplacement depth and carbon dioxide-rich fluid inclusions in intrusion-related gold deposits [J]. Economic Geology, 2002, 97: 1111-1117.
- [21] Mernagh T P, Bastrakov E N, Zaw K, et al. Comparison of fluid inclusion data and mineralization processes for Australian orogenic gold and intrusion-related gold systems [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(1): 21-32.
- [22] Chen Y J. Orogenic-type deposits and their metallogenic model and exploration potential [J]. Geology in China, 2006, 33: 1181-1196(in Chinese).
- [23] Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, et al. Orogenic Au deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other Au deposit types [J]. Ore Geology Reviews, 1998: 13: 7-27.
- [24] Bierlein F P, Groves D I, Goldfarb R J, et al. Lithospheric controls on the formation of provinces hosting giant orogenic gold deposits [J]. Mineralium Deposita, 2006, 40: 874-886.
- [25] Larsen R B, Stein H J. Re-Os dating of orogenic W-Mo deposits in the mid Norwegian Caledonides [J]. Abstracts with Programs, Geological Society of America, 2007, 39(6): 276.
- [26] Lu H Z, Fan H R, Ni P, et al. Fluid Inclusion [M]. Beijing: Science Press, 2004: 487(in Chinese).
- [27] Chen Y J, Pirajno F, Qi J P, et al. Ore geology, fluid geochemistry and genesis of the Shangong gold deposit, eastern Qinling Orogen, China [J]. Resource Geology, 2006, 6: 99-116.

参考文献

- [1] 涂光炽. 成矿与找矿[M]. 石家庄: 河北教育出版社, 2003: 454.
- [2] 陈衍景, 富士谷. 豫西金矿成矿规律[M]. 北京: 地震出版社, 1992: 234.
- [3] 陈衍景, 倪培, 范洪瑞, 等. 不同类型热液金矿床的流体包裹体特征[J]. 岩石学报, 2007, 23(9): 2085-2108.
- [4] 翟裕生, 邓军, 汤中立. 古陆边缘成矿系统[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 384.
- [5] 涂光炽, 李朝阳. 浅议比较矿床学[J]. 地球化学, 2006, 35: 1-5.
- [6] 胡受奚. 矿床学[M]. 北京: 地质出版社, 1982: 1-200.
- [7] 陈衍景, 翟明国, 蒋少涌. 华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题[J]. 岩石学报, 2009, 25(11): 2695-2726.
- [8] 张理刚. 成岩成矿理论和找矿[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1990: 200.
- [11] 胡受奚. 交代蚀变岩岩石学及其找矿意义[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 264.
- [13] 涂光炽. 矿床的多成因问题[J]. 地质与勘探, 1979(6): 1-5.
- [14] 涂光炽. 论改造成矿兼评现行矿床成因分类中的弱点[G]//地球化学文集. 北京: 科学出版社, 1986: 1-7.
- [15] 涂光炽. 中国层控矿床地球化学(第二卷)[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 1-298.
- [16] 涂光炽. 中国层控矿床地球化学(第三卷)[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 1-380.
- [17] 陈衍景, 李诺. 大陆内部浆控高温热液矿床成矿流体性质及其与岛弧区同类矿床的差异[J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2477-2508.
- [18] 邓小华, 陈衍景, 姚军明, 等. 河南省洛宁县寨凹钼矿床流体包裹体研究及矿床成因[J]. 中国地质, 2008, 35(6): 1250-1266.
- [19] 邓小华, 糜梅, 姚军明. 河南土门萤石脉型钼矿床流体包裹体研究及成因探讨[J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2537-2549.
- [22] 陈衍景. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力[J]. 中国地质, 2006, 33: 1181-1196.
- [26] 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 487.

2010 年《地学前缘》征订启事

中国地质大学(北京)与北京大学出版的《地学前缘》(联订代号:5198)由天津全国非邮发报刊联合征订服务部总发行;请我刊原订户和需要订购的客户直接与天津联合征订服务部联系订购事宜。2010 年订价为 300 元/年(全年 6 期,50 元/期)。

联系地址:天津市大寺泉集北里别墅 17 号

邮政编码:300385

电 话:022-23962479,022-23973378

传 真:022-23973378

网 址:www.LHZD.com

E-mail:LHZD@public.tpt.tj.cn