

文章编号: 0258-7106(2009)06-0850-06

流体包裹体在矿床研究中的作用*

池国祥¹ 赖健清²

(1 加拿大里贾纳大学地质系; 2 中南大学地学与环境工程学院, 教育部'有色金属成矿预测'重点实验室, 湖南长沙 410083)

摘要 流体包裹体分析是现代矿床学研究的一个重要手段, 对矿床类型的划分及成矿流体成分、温度、压力的研究有着重要的作用。在矿质沉淀的主要机制中, 流体相分离及流体混合的主要证据来自流体包裹体, 对金属在气相中的搬运的认识, 也主要来自包裹体研究。成矿流体成分对认识金属在热液中的搬运方式起着重要作用, 流体温度和压力数据是成矿流体动力学模式的重要制约。

关键词 地球化学 流体包裹体 热液矿床 成矿热液 矿质沉淀 金属运移 综述

中图分类号: P59

文献标志码: A

Roles of fluid inclusions in study of mineral deposits

CHI GuoXiang¹ and LAI JianQing²

(1 Department of Geology, University of Regina, Regina, Saskatchewan S4SOA2, Canada; 2 School of Geoscience and Environmental Engineering, Central South University, Changsha, Hunan, China, Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract

Fluid inclusion analysis is an important tool in modern studies of mineral deposits, as reflected by the statistics indicating that about a quarter of the papers published in Economic Geology contain fluid inclusion studies. Fluid inclusions play an important role in the classification of mineral deposits and in the study of the composition, temperature and pressure of mineralizing fluids. Among the principal mechanisms of ore precipitation, fluid phase separation and fluid mixing derive their key evidence mainly from studies of fluid inclusions. Data on mineralizing fluid composition obtained from fluid inclusion analysis are key to understanding how metals were transported in hydrothermal fluids. Recent progresses in metal transport in vapor have been mainly contributed by fluid inclusion studies. Data on fluid temperature and pressure from fluid inclusion studies provide important constraints on hydrodynamic models of mineralization.

Key words: geochemistry, fluid inclusions, hydrothermal deposits, mineralizing fluids, ore precipitation, metal transport, review

大部分金属矿床(热液矿床)都是在地质流体中形成的。矿床的成因与热液特征(包括温度、压力和成分)密切相关。尽管这些信息可以通过研究矿床的宏观地质特征及矿物的地球化学特征来获得,但

* 本文得到加拿大自然科学基金(NSERC)和“十一五”国家科技支撑计划“铜陵地区危机铜矿山大比例尺定位预测技术开发”课题(2006BAB01B07)的联合资助

第一作者简介 池国祥,男,1963年生,博士,副教授,主要从事矿床学、地质流体地球化学及流体动力学研究。Email: guoxiang.chi@uregina.ca

收稿日期 2009-08-20; 改回日期 2009-10-13。李德先编辑。

成矿流体的成分、温度和压力来自流体包裹体最直接证据。流体包裹体是唯一保留在矿物里的古成矿流体,因此流体包裹体研究自然成为矿床成因研究的重要手段之一。对《Economic Geology》的抽样调查表明,该期刊关于流体包裹体研究的论文所占比例,由 1975 年的 5% 上升到 1985 年的 9.5%,1995 年为 27%,随后一直保持在 25% 左右,相当于每 4 篇矿床学的论文中就有 1 篇涉及流体包裹体研究。尽管目前流体包裹体研究范围已扩展到石油地质、岩浆及地球内部过程等方面,但其在矿床研究领域的应用还是最主要的(Chi et al., 2003)。关于流体包裹体在矿床学中的应用已有很多论著(Roedder, 1971; 1984; Spooner, 1981; Roedder et al., 1997; Wilkinson, 2001; 卢焕章等, 2004),但这些论著多偏重于流体包裹体研究的基本原理和方法,或着重于阐述不同矿床类型的包裹体特征。本文拟从流体包裹体所解决的主要问题的角度来论述流体包裹体在矿床研究中的应用。文中所用例子主要来自已发表的论文,其中包括作者参加过的一些研究课题。

1 流体包裹体是矿床类型划分的依据之一

矿床类型可按地质特征或成因进行划分,但目前很少完全按照地质特征(如剪切带金矿、层控铅锌矿)或成因(如高温热液、中温热液、同生、后生)来进行矿床类型的划分。通常是将矿床的地质特征、形成环境及形成过程结合在一起将其归为某一类,其名称可以是地质特征(如斑岩铜矿)、形成过程(如喷流型铅锌矿(SEDEX))或典型产区(如密西西比河谷型铅锌矿(MVT)),隐含在每个矿床类型里既有地质特征也有成因。不同类型的矿床形成于不同的地质环境,其包裹体特征也不同,因此流体包裹体可作为鉴别矿床类型的依据之一。例如,造山型金矿床绝大部分含 H_2O-CO_2 低盐度包裹体,斑岩铜矿床以含盐子晶高盐度包裹体及气相包裹体为特征,浅成低温热液矿床的包裹体多为低盐度的水溶液包裹体,MVT 矿床的包裹体盐度普遍较高但不含子晶,多属 $H_2O-NaCl-CaCl_2$ 体系。不同矿床类型的包裹体特征在相关文献中均有论述(Spooner, 1981; Roedder, 1984; Wilkinson, 2001; 卢焕章等, 2004)这里不再赘述。需要指出的是,虽然包裹体可以作为矿床类型划分的主要依据,但并不是唯一

依据,例如,富 CO_2 包裹体虽然在造山型金矿床中最常见,但在伟晶岩矿床(卢焕章等, 2004)与花岗岩有关的钨锡矿床(Chi et al., 1993) IOCG 型铜-金矿床(Williams et al., 2005)等其他类型矿床中也很常见。反之,用包裹体特征来排除某些矿床类型则是比较有效的,例如,浅成低温热液矿床中不应出现高密度的富 CO_2 包裹体。在对一个新矿床或矿点进行初步研究的时候,选少数几个样品进行包裹体观测,对认识矿床类型可以起到事半功倍的指导作用。

2 流体包裹体对成矿条件的制约

研究矿床的形成条件,最重要的是要了解成矿热液的成分、温度和压力。在这方面,流体包裹体有着不可替代的作用。前述《Economic Geology》期刊中,有关包裹体的研究论文绝大部分属于对成矿热液成分、温度和压力的研究。

在所有地球化学方法中,对成矿流体化学成分的研究最直接、最有效的方法就是对流体包裹体的化学分析。成矿流体的主要成分可以通过流体包裹体的显微测温法配合激光拉曼测定,次要组分及微量组分可通过各种各样的开放和封闭的方法配以不同的分析方法测定。Chi 等(2003)对流体包裹体的各种测试方法进行了详细的总结,这里不再细述。

成矿温度的测定主要有同位素地质温度计和流体包裹体测温。同位素地质温度计的优点是计算的温度不受压力影响,缺点是很难独立评价矿物对同位素平衡是否达到,且单矿物分离比较费时,包裹体测温的优点是方法直接、简单,缺点是所测均一温度只代表最低温度,另外均一温度是否有效也是一个潜在问题。在大多数情况下(主要是水溶液包裹体),包裹体的均一温度与捕获温度很相近,通常均一温度即被认为是成矿温度,不用作压力校正。均一温度是否有效的问题,涉及到流体包裹体显微测温的基本原理。流体包裹体分析的有效性取决于 3 个基本假设,即 Roedder 三原则(Bodnar, 2003a; 2003b):① 包裹体捕获了一个单一的、均匀的流体相;② 包裹体的体积自捕获后未发生变化(等容体系);③ 包裹体的成分自捕获后未发生变化(Roedder, 1984)。如果这 3 个条件中的任何一个没被满足,所测的包裹体数据即为无效。一个包裹体的体积或成分在捕获后是否发生了变化很难确定,因为无法知道包裹体被捕获时的大小和成分,因此,在很

多流体包裹体研究中,尤其是上世纪90年代以前, Roedder三原则往往不加检验就被假定是成立的。但是,自 Goldstein等(1994)提出流体包裹体组合(Fluid Inclusion Assemblage,简称FIA)的概念以来,可以通过简单的岩相学和测温法来判断测温数据是否有效。简单地说,如果一组在岩相学上看来是同时被捕获的包裹体有相同或很相似($< 15^\circ$)的均一温度,那么这组包裹体很可能满足Roedder三原则,其测温数据是有效的,反之则是无效的。关于流体包裹体组合的应用可参见相关文献(池国祥等,2008)。

成矿流体的压力是一个比成矿温度更难确定的参数。虽然从理论上说只要测出包裹体的均一温度和成分,就可以计算流体的密度,进而算出等容线;有了等容线,再知道成矿温度(如通过同位素地质温度计)就可算出压力。但是,由于水溶液包裹体的等容线在温度-压力空间的斜率很大,很小的温差都可以造成很大的压力误差。而 CO_2 、 CH_4 及石油包裹体的等容线斜率比较小,用它们来估计压力的误差就比较小。因此,如果矿床中只有水溶液包裹体,一般不建议用包裹体测温数据去计算压力,如果矿床形成时除水溶液外还有不混溶的 CO_2 、 CH_4 或石油相,可以用这些包裹体的等容线,结合水溶液包裹体的均一温度或用其他方法计算的成矿温度来计算流体压力。还有一个需要注意的问题是,有了流体压力,不等于就能知道成矿深度,还必须知道压力体系是静岩压力还是静水压力,或在两者之间,根据不同压力体系计算出来的成矿深度可差别2.5倍甚至更多。

3 流体包裹体是成矿过程的关键证据

流体包裹体的研究对认识某些成矿过程亦是关键的证据。众所周知,造成矿质沉淀的主要机制(温度压力降低、水-岩反应、流体混合、流体相分离)中,对流体混合和流体相分离(包括沸腾)的认识主要来自流体包裹体研究,这是流体包裹体对现代成矿理论的重要贡献之一。

很多与岩浆侵入体有关的矿床(如斑岩铜矿床),主要矿化作用之所以发生在接触带,与成矿流体从岩体内进入到接触带时压力剧降所引发的流体相分离有关(池国祥等,1991)。大量含子晶的高盐度水溶液包裹体与均一成气相的包裹体共生,已成

为斑岩铜矿矿化带的一个普遍特征(Roedder, 1984)。很多造山型金矿床的金沉淀被认为是剪切带内压力周期性升降导致的 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 流体相分离所造成的,其主要依据也是来自包裹体研究(如Robert et al., 1987; Guha et al., 1991)。

许多产于沉积盆地的热液矿床(如密西西比河谷型铅锌矿床),其矿质沉淀所需的 H_2S 主要来自盆地流体中的硫酸根被烃类还原的产物,或者是成矿流体穿过古油气藏的结果。这方面的证据虽然可以来自稳定同位素及地层的有机地球化学研究,但最有说服力的证据还是来自流体包裹体。例如,产于加拿大东部Maritimes盆地碳酸盐地层中的Jubilee铅锌矿,其中的方解石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 $-17\text{‰} \sim -27\text{‰}$,被认为是有机碳参与了成矿。通过流体包裹体研究,发现该矿床成矿前、后都有大量的石油包裹体,闪锌矿中也有无数细小的石油包裹体沿生长环带分布。根据这些发现,Chi等(1995)提出Jubilee矿床在成矿前是个古油藏,其中的石油与盆地卤水中的硫酸根长期反应产生 H_2S 气体,聚集在油藏顶部;后来成矿热液流经古油藏时,与其中的 H_2S 反应形成铅锌矿。云南金顶铅锌矿也被认为在成矿前是个古油气藏(Xue et al., 2009),其中一个主要证据就是大量油、气包裹体的存在。

火山岩中的块状硫化物矿床(VMS)在所有矿床类型中研究程度最高,即使对这种矿床,流体包裹体研究对其成因模式也有新的重要启示。一般认为,VMS的成矿热液来源于海水,海水沿海底裂隙循环到深处,被加热并提取围岩中的金属,然后再喷流至海底,形成块状硫化物矿床。这种模式已被广泛接受,很少有人考虑其他可能性。Yang等(1996)发现Manus盆地现代海底火山岩中含大量富含金属的岩浆-流体包裹体,据此提出VMS矿床的成矿流体并非全部来自海水,至少有一部分来自岩浆流体。这一认识促使人们在研究古VMS矿床时也要考虑岩浆流体的可能性。

4 流体包裹体对成矿物质搬运方式的揭示

金属在成矿热液中主要以络合物的形式溶解,而 Cl^- 是最重要的络阴离子。这个认识虽然最终来自高温高压实验,但流体包裹体研究所提供的盐度资料也是一个很重要的因素。目前,矿床学研究中

流体包裹体所指示的流体成分(包括盐度)仍然是讨论成矿物质搬运方式的主要依据之一。近年来,流体包裹体研究对成矿物质搬运方式方面的贡献,主要在于认识气体在金属搬运中的作用。

正如 Williams 等(2005)在《Economic Geology》一百周年特刊中指出,过去一百多年来,对热液矿床成因的解释(除了 Hg 和 S 以外),基本上都认为金属是在液体水溶液中被搬运的。然而现在已经认识到有些元素,特别是 Au、Cu、As,在气体中比在液体中的溶解度更大,这个认识的取得主要来自流体包裹体研究。在斑岩铜矿的研究早期,人们就已经注意到气体包裹体中的黄铜矿子矿物,说明气体可以搬运很高浓度的铜(Roedder, 1971)。自 LA-ICP-MS 应用到包裹体分析以来,人们对气体搬运金属的认识取得了突破性进展。Ulrich 等(1999)和 Heinrich 等(1999)通过对斑岩矿床中共生的高盐度液体包裹体和气体包裹体的 LA-ICP-MS 研究发现,气体包裹体普遍比液体包裹体更富含 Au、Cu、As 等元素;富含于气体中的元素还有 Li、B、Bi、Sb 等(Williams et al., 2005)。这些研究表明,斑岩矿床不是矿化作用的终点,很多金属还可以在气相中进一步往浅部搬运,这对于深入认识斑岩矿床与浅成低温热液矿床的关系至关重要。

造山型金矿床普遍富含 CO₂ 流体包裹体,但 CO₂ 在金成矿过程中所起的作用还存在很大争论:有人认为 CO 或 CO₃²⁻ 可能与 Au 络合(Kerrick et al., 1981),也有人认为 CO₂ 可调节流体的 pH 值,从而有利于金的搬运(Phillips et al., 2004)。一些特大型金矿床独特的流体包裹体特征,可能为深入理解 CO₂ 与金的成矿的关系提供了契机。加纳的 Ashanti 金矿和加拿大的 Campbell-Red Lake 金矿都是世界级的金矿,这 2 个矿床的共同特点是都含大量几乎不含水的、以 CO₂ 为主的包裹体(Schmidt et al., 1997; Chi et al., 2006)。对这种成矿流体,很难用 CO₃²⁻ 络合或调节流体 pH 值来解释 CO₂ 与金的关系。实验研究表明,在高温高压条件下,金主要与 HS⁻ 及 H₂S 络合,金的溶解度在 550~725℃、1×10⁸~4×10⁸ Pa 的条件下可达几百×10⁻⁹g (Loucks et al., 1999)。金在气态 H₂S 中溶解度在 400℃ 时也高达 96×10⁻⁹g (Zevin et al., 2007)。根据这些观察,Chi 等(2009)认为,金之所以与 CO₂ 密切相关,是因为 H₂S 与 CO₂ 密切相关,CO₂ 和 H₂S 的挥发性都高于水,在地壳深部,富含 CO₂ 的流体也相对富含

H₂S, 因此具有较强的“吸金”能力。由于 CO₂ 是流体的主要成分,很容易被注意,而 H₂S 是次要或微量组分,往往被忽视,所以人们只注意 CO₂ 与金有关,而没有认清这种关系的本质。

前已述及,富 CO₂ 的包裹体除了在造山型金矿床中大量出现外,在其他类型矿床中也常见,但目前 CO₂ 与成矿的关系还不清楚,如 IOCG 型铜-金矿床。有人认为富 CO₂ 的流体不利于铜及其他贱金属的搬运,反映在造山型金矿上就是,这种金矿很少有 Cu-Pb-Zn 的富集(Phillips et al., 1987)。但 Lai 等(2007)发现,安徽铜陵凤凰山铜矿床有些富 CO₂ 的包裹体中含黄铜矿子矿物,说明富 CO₂ 的流体可以携带大量的 Cu。在加拿大纽芬兰的 Rambler VMS 型铜-金矿床中也发现富 CO₂ 的包裹体含不透明子矿物。这些现象说明,富 CO₂ 的流体对贱金属的搬运的重要性还需要进一步研究。

5 流体包裹体对成矿流体动力学的制约

热液矿床的形成牵涉到许多复杂的化学过程,因此地球化学成为矿床成因研究的主要手段,即矿床地球化学。另一方面,热液矿床的形成牵涉到大量流体的流动,而流体流动需要驱动力,此为流体动力学的研究内容。相对于矿床地球化学,成矿流体动力学的研究比较少,这与地质流体流动的尺度大、时间长、其过程很难在实验室模拟有关。随着计算机技术的发展,通过数值模拟来研究地质流体的流动正受到越来越多的重视。为了检验数值模拟的有效性,需要对一些参数进行制约,其中最有效的参数是流体的温度和压力。在这方面,流体包裹体再次起到重要的作用。最近 30 年来,成矿流体动力学取得的最重要的成果之一,就是对密西西比河谷型(MVT)矿床的形成与造山带隆起及由此产生的地势差所驱动的盆地流体大规模迁移的关系的认识(Garven et al., 1993),而促成这一认识的一个重要因素,是对美国中部地区 MVT 型矿床的流体包裹体均一温度的区域性变化趋势的总结(Leach et al., 1986)。在其他一些地区,如加拿大东部的 Maritimes 盆地的、产于碳酸盐地层中的铅锌矿床(归于 MVT 型或爱尔兰型)数值模拟表明,成矿流体的流动很难用地势差的驱动来解释,有更可能是盆地流体超压所致,而制约这一模式的主要因素也同样来

自流体包裹体的研究 (Chi et al., 1998)。

流体流动的直接动力是水势 (Hydraulic potential) 差, 其与高程及流体压力有关。尽管用流体包裹体来估计流体压力有很多制约因素, 但它仍不失为一个有效的手段, 尤其是有 CO_2 、 CH_4 及石油包裹体的时候。有时简单的流体包裹体研究也能为流体动力学模型提供重要的信息。例如, 对云南金顶铅锌矿兔子山矿段富 CO_2 包裹体的研究表明, 成矿流体的压力可达 1.3×10^8 Pa, 这样高的压力很难用地表水在盆地内循环来解释, 有可能是深部来源的高压流体所致, 这与矿区观察到的砂岩灌入构造等指示高压环境的地质特征是一致的 (Chi et al., 2007)。

6 结 语

流体包裹体作为成矿古流体的唯一样品, 在矿床研究中起着其他方法不可替代的作用。简单的岩相学观测可以为矿床类型的划分提供重要依据; 包裹体所提供的流体成分、温度、压力的信息, 是研究矿床成因的重要参数; 对于有些成矿过程, 如流体相分离及流体混合, 流体包裹体可以提供最直接的证据; 包裹体研究还对金属的搬运方式的研究有重要作用, 近年来对金属在气相中的搬运的认识, 主要来自包裹体研究; 流体包裹体所提供的温度和压力数据可为成矿流体动力学模式提供重要的制约。因此, 流体包裹体对现代成矿理论有着重要的贡献。

志 谢 谨将此文献给导师吴延之教授。值此吴老师从事地质科学工作 60 周年和 80 寿辰之际, 回想起二十多年前在吴老师指导下的野外和室内学习经历, 心中充满感激之情。当年老师细心、严格的教育, 使学生终身受益。衷心祝福吴延之教授健康长寿。

References

Bodnar R J. 2003a. Introduction to fluid inclusions. In: Samson I, Anderson A and Marshall D, eds. Fluid inclusions: Analysis and interpretation [M]. Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, 32: 1-8.

Bodnar R J. 2003b. Reequilibration of fluid inclusions. In: Samson I, Anderson A and Marshall D, eds. Fluid inclusions: Analysis and interpretation [M]. Mineralogical Association of Canada, Short

Course Series, 32: 213-231.

Chi G X and Lu H Z. 1991. Characteristics of fluid phase separation fields in depth-temperature coordinates with emphasis on their significance on localization of hydrothermal deposits [J]. Acta Mineralogica Sinica, 11: 355-362 (in Chinese with English abstract).

Chi G, Guha J and Lu H Z. 1993. Separation mechanism in the formation of proximal and distal tin-polymetallic deposits, Xinlu ore field, southern China: Evidence from fluid inclusion data [J]. Econ. Geol., 88: 916-933.

Chi G, Savard M M and Héroux Y. 1995. Constraints from fluid inclusion data on the origin of the Jubilee carbonate-hosted Zn-Pb deposit, Cape Breton, Nova Scotia [J]. The Canadian Mineralogist, 33: 709-721.

Chi G and Savard M M. 1998a. Basinal fluid flow models related to Zn-Pb mineralization in the southern margin of the Maritimes Basin, eastern Canada [J]. Econ. Geol., 93: 896-910.

Chi G, Kontak D J and Williams-Jones A E. 1998b. Fluid composition and thermal regime during base-metal mineralization in the lower Windsor Group, Nova Scotia [J]. Econ. Geol., 93: 883-895.

Chi G, Chou I M and Lu H. 2003. An overview on current fluid-inclusion research and applications [J]. Acta Petrologica Sinica, 19: 201-212.

Chi G, Dube B, Williamson K and Williams-Jones A E. 2006. Formation of the Campbell-Red Lake gold deposit by H_2O -Poor, CO_2 -dominated fluid [J]. Mineralium Deposita, 40: 726-741.

Chi G, Xue C, Lai J and Qing H. 2007. Sand injection and liquefaction structures in the Jinding Zn-Pb deposit, Yunnan, China: Indicators of an overpressured fluid system and implications for mineralization [J]. Econ. Geol., 102: 739-743.

Chi G X and Lu H Z. 2008. Validation and representation of fluid inclusion microthermometric data using the fluid inclusion assemblage (FIA) concept [J]. Acta Petrologica Sinica, 24(9): 1945-1953 (in Chinese with English abstract).

Chi G, Liu Y and Dube B. 2009. Relationship between CO_2 -dominated fluids, hydrothermal alterations, and gold mineralization in the Red Lake greenstone belt, Canada [J]. Applied Geochemistry, 24: 504-516.

Garven G, Ge S, Person M A and Sverjensky D A. 1993. Genesis of stratabound ore deposits in the midcontinental basins of North America. 1. The role of regional groundwater flow [J]. American Journal of Science, 293: 497-568.

Goldstein R H and Reynolds T J. 1994. Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals [J]. SEPM Short Course, 31: 199.

Guha J, Lu H Z, Dubé B, Robert F and Gagnon M. 1991. Fluid characteristics of vein and altered wall rock in Archean mesothermal gold deposit [J]. Econ. Geol., 86: 667-684.

Heinrich C A, Gunther D, Audédat A, Ulrich T and Frischknecht R. 1999. Metal fractionation between magmatic brine and vapor, determined by microanalysis of fluid inclusions [J]. Geology, 27: 755-758.

- Kerrick R and Fyfe W S. 1981. The gold-carbonate association: Source of CO₂, and CO₂ fixation reactions in Archean lode deposits[J]. *Chemical Geology*, 33: 265-294.
- Lai J and Chi G. 2007. CO₂-rich fluid inclusions with chalcopyrite daughter mineral from the Fenghuangshan Cu-Fe-Au deposit, China: Implications for metal transport in vapor[J]. *Mineralium Deposita*, 42: 293-299.
- Leach D L and Rowan E L. 1986. Genetic link between Ouachita fold-belt tectonism and the Mississippi Valley-type lead-zinc deposits of the Ozarks[J]. *Geology*, 14: 931-935.
- Loucks R R and Mavrogenes J A. 1999. Gold solubility in supercritical hydrothermal brines measured in synthetic fluid inclusions[J]. *Science*, 284: 2159-2163.
- Lu H Z, Fan H R, Ni P, Ou G X, Shen K and Zhang W H. 2004. *Fluid Inclusions*[M]. Beijing: Science Press. 487p(in Chinese with English abstract).
- Phillips G N, Groves D I and Brown I J. 1987. Source requirements for the Golden Mile, Kalgoorlie: Significance to the metamorphic replacement model for Archean gold deposits[J]. *Canadian Journal of Earth Science*, 24: 1643-1651.
- Phillips G N and Evans K A. 2004. Role of CO₂ in the formation of gold deposits[J]. *Nature*, 429: 860-863.
- Robert F and Kelly W C. 1987. Ore-forming fluids in Archean gold-bearing quartz veins at Sigma mine, Abitibi greenstone belt, Quebec, Canada[J]. *Econ. Geol.*, 82: 1464-1482.
- Roedder E. 1971. Fluid inclusion studies on the porphyry-type ore deposits at Bingham, Utah, Butte, Montana, and Climax, Colorado [J]. *Econ. Geol.*, 66: 98-118.
- Roedder E. 1984. Fluid inclusions[J]. *Mineralogical Society of America*, *Reviews in Mineralogy*, 12: 644.
- Roedder E and Bodnar R J. 1997. Fluid inclusion studies of hydrothermal ore deposits. In: Barnes H L, ed. *Geochemistry of hydrothermal ore deposit*[M]. John Wiley & Sons Inc. 657-698.
- Schmidt Mumm A, Oberthür T, Vetter U and Blenkinsop T G. 1997. High CO₂ content of fluid inclusions in gold mineralizations in the Ashanti Belt, Ghana: A new category of ore forming fluids[J]. *Mineralium Deposita*, 32: 107-118.
- Spooner E T C. 1981. Fluid inclusion studies of hydrothermal ore deposits. In: Hollister L S and Crawford M L, eds. *Fluid Inclusions: Applications to Petrology*[J]. Mineralogical Association of Canada Short Course Handbook, 6: 209-240.
- Ulrich T, Gunther D and Heinrich C A. 1999. Gold concentrations of magmatic brines and the metal budget of porphyry copper deposits [J]. *Nature*, 399: 676-679.
- Wilkinson J J. 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits[J]. *Lithos*, 55: 229-272.
- Williams P J, Barton M D, Johnson D A, Fontbote L, De Haller A, Mark G, Oliver N H S and Marschik R. 2005. Iron oxide copper-gold deposits: Geology, space-time distribution, and possible models of origin[J]. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 371-405.
- Williams-Jones A E and Heinrich C A. 2005. Vapor transport of metals and the formation of magmatic-hydrothermal ore deposits[J]. *Economic Geology 100th Anniversary volume*: 1287-1312.
- Xue C, Chi G, Leach D and Gao Y. 2009. A former oil-gas reservoir in the giant Jinding Zn-Pb deposit, SW-China: Implications for ore accumulation[J]. 10th Biennial Meeting of the SGA (Townsville, Australia, 17-20 August, 2009).
- Yang K H and Scott S D. 1996. Possible contribution of a metal-rich magmatic fluid to a sea-floor hydrothermal system[J]. *Nature*, 383: 420-423.
- Zezin D Y, Migdisov A A and Williams-Jones A E. 2007. The solubility of gold in hydrogen sulfide gas: An experimental study[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 71: 3070-3081.

附中文参考文献

- 池国祥, 卢焕章. 1991. 流体相分离的深度(压力) 温度场特征及其对热液矿床定位的意义[J]. *矿物学报*, 11: 355-362.
- 池国祥, 卢焕章. 2008. 流体包裹体组合对测温数据有效性的制约及数据表达方法[J]. *岩石学报*, 24(9): 1945-1953.
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 欧光习, 沈昆, 张文淮. 2004. *流体包裹体* [M]. 北京: 科学出版社. 487页.