

交代热液成矿学说 ——热液矿床成因的佐证

季克俭 吕凤翔 著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书是一部有关热液矿床成因的专著,系统地介绍了各种矿种(铁、铜、钨、锡、铅、锌、金、铀等)、各种类型(斑岩型、矽卡岩型、玢岩型等)矿床的热液来源,特别是热液中的矿、水和热三种源的测定方法和结果;论证了绝大多数矿床(原被定为岩浆热液成因)的热液生成于交代过程,属交代成因热液。热液矿床为异常地温梯度体系、大气降水或海水的水-岩反应体系和交代蚀变体系的演化产物。据此总结出交代热液矿化一系列独有的地质特征、成矿条件、控矿因素、成矿机理和矿床的分布规律等,使“三源成矿论”升华为交代热液成矿学说;同时还建立了三源交代热液无矿—成矿系列模式,创立了三源预测方法;介绍了三源的标志、预测的内容、预测实例和预测的效果等。

本书既有先进的成矿理论,又有科学的矿床预测方法、内容丰富、资料系统、观点独到,是从事矿产资源勘查的生产、科研和教学人员的重要参考书。

图书在版编目(CIP)数据

交代热液成矿学说 / 季克俭等著. —北京:地质出版社,
2007.3

ISBN 978 - 7 - 116 - 05258 - 1

I. 交... II. 季... III. 热液矿床—成矿理论—研究
IV. P611.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 032374 号

组稿编辑:王大军

责任编辑:白 铁 邢瑞玲 刘建三

责任校对:王素荣

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

电 话:(010) 82324508 (邮购部);(010) 82324579 (编辑部)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京地大彩印厂

开 本:787mm × 1092mm¹/₁₆

印 张:21.5 插页:1 页

字 数:450 千字

印 数:1—1200 册

版 次:2007 年 3 月北京第 1 版·第 1 次印刷

定 价:40.00 元

书 号:ISBN 978 - 7 - 116 - 05258 - 1

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

前 言

热液矿床是由各种含矿的热水溶液形成的矿床。它是矿床家族中最大的一族，矿床的数量、矿种和类型都是最多的，经济价值又特别巨大，所以，一直是地质人员研究和寻找的主要对象。近年国际上热门的研究领域：水岩反应、地质流体、超大型矿床等，都与热液成矿作用有关。热液成矿是十分复杂的问题，热液来源是热液矿床成因的关键。查明热液的来源在很大程度上就确定了矿床的成因。如热液来源于岩浆，则矿床属岩浆热液成因。若热液由变质作用产生，则矿床为变质热液成因。在 20 世纪 50 年代之前，人们无法确定热液的成因类型或来源，只能根据地质现象推断，这就是有关热液矿床的成因长期争论不休的原因。而自 20 世纪 50 年代起，科学技术的突飞猛进，为确定热液中矿质的来源、水的来源和热的来源提供了有效的方法。而这三种源中任何一种或多种源的确定，都直接决定热液的来源，如某个矿床的成矿物质来自矿体周围的岩石或热液水来自大气降水或热来自岩浆岩，则热液属大气降水成因。即使矿质由岩浆岩提供，热也由岩浆岩提供，但热液不是从岩浆中分离出来的，也不是岩浆热液。这样，热液矿床成因之争，从笼统的概念性争论转为以实际资料为根据的争论。

本书作者有幸自 1979 年起开展了对热液的矿源、水源和热源的专项研究。选择了一批有代表性的热液矿床（德兴斑岩铜矿、城门山-武山铜矿、柿竹园钨矿、赣南钨矿、多宝山铜矿等），获得了大量新资料，对热液来源得出了明确的结论。主要成果于 1989 年以《热液矿床的矿源、水源和热源及矿床分布规律》专著出版，该书被称为“三源（热液）成矿论”。本专著是前专著的深化和发展，以重点学科生长点项目“三源热液成矿理论”（1992~1995）、定向项目“辽北-冀北地区金矿的三源预测研究”（1996~1998）、“八五”国家攀登项目的“三源交代热液成矿预测研究”课题（1994~1999）等为依靠，二部专著都是通过三种源的研究，解决矿床的成因问题。不同之处是：前一专著以我们自己的研究成果为主，本专著引用了大量国内外有关热液中矿质与水来源的资料和实例，通过综合分析和研究，得出了有关热液矿床成因的一系列新认识，发展了热液成矿理论，初步解决了热液矿床的成因问题。本专著对热液成矿作用提出或发展了下列重要的新认识。

1. 矿质来源属近源，而非远源

热液矿床都有原生晕，而且都是正晕。这是众所周知的，也是传统成矿理论最易解释的现象。作者挑选的 10 多个热液矿床确实都有原生正晕，但同时都还发现了原生负晕，其规模远大于正晕。原生负晕是矿源的可靠定性标志，负晕区内的岩石都是为热液矿床形成提供了矿质的岩石，因此，赣东北-赣西北地区的斑岩型、矽卡岩型和含铜黄铁矿型铜矿床、赣南-湘南地区石英脉型、矽卡岩型等钨锡矿床的矿质都是由矿体周围的岩石提供的。

矿源的近矿性在热液铁矿床中表现得特别明显，在矿体处富集了大量铁，而在矿体周围存在范围远大于矿体的褪色蚀变岩。它们在交代过程中释放出铁，形成明显的供需关系。所以，张荣华、陈毓川等对宁芜和庐枞地区玢岩铁矿的研究中、赵一鸣等对闽西南和

鄂东南矽卡岩铁矿的研究中以及沈保丰等对邯邢式铁矿的研究中，都取得了与我们相似的资料和得出了相似的结论。褪色蚀变岩为铁矿的形成提供了铁。褪色蚀变岩既是铁矿的矿源岩，又是近矿围岩。因此，热液铁矿床的矿源属近源，是可以直接测定的。虽然有关矿源岩系统分析资料的铁矿床数量有限，但几乎所有的热液铁矿床都伴有围岩的褪色蚀变。这表明，铁矿床矿源的近矿性具有普遍意义。

如果把负晕的范围圈定，并测定负晕区内岩石中矿质的含量，就可估算出负晕区内岩石释放出矿质的总量，通过与正晕（包括矿体）对比，就可了解，负晕提供的矿质是矿床矿质的一部分，还是全部。对热液铁矿而言，负晕的圈定和岩石铁含量变化的测定都是很容易做到的，但遗憾的是，在很多铁矿床地质勘探报告中缺失这方面的资料。

热液铁矿床矿源的确定是矿质来源研究的重大突破，是矿床成因研究的重大事件。矿质来源是矿床成因的核心，因此，确定矿质来源就是确定了矿床成因。矿质来源是判别成矿理论的标尺，也是建立或发展成矿理论的基石。

2. 热液成矿作用受异常地温梯度控制，矿化和蚀变温度是当时异常地温梯度的记录

热液矿床通常分为两类：脉状充填型，如石英脉型钨矿，产于浅部，蚀变围岩具有明显的水平分带；似层状充填交代型，如玢岩铁矿、斑岩铜矿等，具垂向分带的面型蚀变，有的矿床中上述两种类型并存。仔细研究发现，脉状矿体本身和围岩蚀变均有明显的垂向分带。南京大学地质系提出了花岗岩综合成矿模式，深部为垂向分带的面型蚀变岩带，类似层状矿体，浅部主要为具水平蚀变分带的脉状矿体。作者认为，热液矿床的成矿模式可能是，总体为以面型蚀变为主的垂向分带，局部叠加伴随水平蚀变分带的近于直立的脉状矿体。这种大范围岩石的蚀变温度很高，特别是深部碱交代岩温度远高于脉状矿体的温度，前者高于 500°C ，后者大多低于 300°C 。因此，大范围整体蚀变的热不可能由形成脉状矿体的热液带来，而是由异常地温梯度决定的。不论是垂向分带的面型蚀变温度或脉状矿体的温度与它们形成深度密切相关，形成深度越大，形成的温度越高。通常，在不足 1 km 的深度范围，蚀变和矿化温度变化范围达 400°C ，这表明，当时的异常地温梯度约为 $400^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ，比正常地温梯度高达 10 倍。由上可得出下列结论：与岩浆岩密切相关的热液矿床都产于“热”岩区内，产于高异常地温梯度区，一般比正常地温梯度高 $5\sim 10$ 倍。

3. 蚀变是矿化的先导和基础，是矿之源，没有蚀变就没有矿化，矿化必定伴随蚀变

热液矿床的突出特征是与蚀变岩密切相关，蚀变岩的范围远大于矿体，蚀变岩的形成温度范围大于矿体，特别是高温碱交代和早期矽卡岩化时都没有矿化。因此，热液成矿体系实际上是交代蚀变体系。蚀变过程中岩石成分的变化是通过高温水（或溶液）来实现的。每种蚀变岩都有其对应的热液，也就是说，体系内的热液成分等特征随地点、温度、时间等条件变化而变化。这种热液是典型的交代热液，是高温条件下水-岩反应的产物。由于矿化的多阶段性和蚀变的多带性，使矿化和蚀变的关系显得很复杂，若以蚀变过程中矿质含量变化进行分带，则矿化和蚀变的关系不仅显得非常密切，而且也变得很简单。

不管蚀变分带多么复杂，根据矿质含量的变化，主要分成二类蚀变，即矿质含量增高的蚀变和矿质含量减少的蚀变。个别蚀变岩的矿质含量没有明显的变化。

所有矿质含量增高的蚀变都是矿质交代蚀变，也是矿质富集的蚀变，常形成矿质的原生晕及矿体，这种蚀变本身就是成矿过程。所有矿质减少的蚀变都是矿质活化蚀变，也是矿质活化的成矿过程。矿质活化后的蚀变岩是矿源岩。矿质活化后的热液才是真正的成矿

热液（由于蚀变岩中的矿质转入热液，使热液的矿质含量显著升高，这样使蚀变前不含或少含矿质的热水在蚀变后成为含矿的热液）。

综上所述，大多数的围岩蚀变过程都是成矿过程，其中一部分蚀变对矿质起活化作用，另一部分蚀变对矿质起富集作用。所以，热液矿床是围岩蚀变的产物，它总是产于大范围的蚀变岩中。蚀变岩不是热液矿体的附属物。

4. 交代热液和交代水等新概念的提出是热液矿床成因研究的需要，也是矿床成因研究的重要成果

交代（成因）热液是指由交代作用生成的热液，这是不同于岩浆热液和变质热液的又一种成因类型的热液。大气降水热液、海水热液、建造水热液、卤水热液、层控热液等均属交代热液，它们都是通过水-岩反应或交代作用生成的。它们的生成体系、生成过程、生成的温度、生成的时间，矿、水和热的来源、参加反应的水和岩石的 H、O 同位素演化特征，热液成分等根本（或显著）不同于岩浆热液，这使区分两种类型的热液变得简单而容易。

遗憾的是，在热液有关水的 $\delta D - \delta^{18}O$ 图上，各种水（大气降水、海水、岩浆水、变质水）均有明确的范围，而大气降水热液水和海水热液水都没有范围，都用大气降水或海水为起点，向右的带箭头的水平线表示，即水的 ^{18}O 漂移趋势线，箭头虽指向岩浆水和变质水范围，但箭头都在岩浆水和变质水范围外的左边，这很容易使人产生下列印象：岩浆水与变质水在 $\delta D - \delta^{18}O$ 图上各自占有独特的范围。为了消除这种错误印象，季克俭等（1997）根据世界各地地热水的 δD 、 $\delta^{18}O$ 值，圈定了交代水的范围，它几乎包含了全部岩浆水。后来又根据新的资料，把交代水的范围向左扩展，与热液高岭石线相当。这样仅根据热液水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值只能确定交代水，而不能确定岩浆水（文献中，很多人仅根据 $\delta^{18}O$ 值就确定热液水为岩浆水）或变质水。因为后两种水的范围也在交代水范围内，要确定他们的成因还必须结合使用其他方法。

交代热液是唯一的一种被证实的成矿热液，索尔顿海地热田的地热水是典型的交代热液，深部地热水的 Cu、Pb、Zn 含量很高，分别为 7×10^{-6} 、 102×10^{-6} 、 507×10^{-6} ，当降温降压时析出成矿。从地表向下至深部，水的 δD 值保持稳定，而 $\delta^{18}O$ 值逐渐升高，从 $-10‰$ 增加至 $3‰$ ，净增 $13‰$ 。岩石中方解石的 $\delta^{18}O$ 值却逐渐减少，从 $23‰$ 降至 $7‰$ ，下降了 $16‰$ 。由此可见，水和岩石的 $\delta^{18}O$ 值具反消长关系，这是水岩间 O 同位素交换的必然结果。地热水的盐度和成矿金属的含量随深度增大、温度升高而增高，与此同时，岩石中的成矿金属含量不断减少。计算结果表明，页岩中释放的 Pb、Zn 量与地热水中所含的 Pb、Zn 量一致，Pb 为 100 万 t，Zn 为 400 万 ~ 500 万 t。

交代热液是通过与热液中矿质和水的来源的定性和定量研究确定的，通过这方面的研究，大量矿床被改定为：大气降水热液型、海水热液型、矿质来自围岩型等，实际上都是交代热液型。

5. 热变化断裂常为热液矿床的主要控矿断裂

物质普遍具有热胀冷缩的特征。当岩浆上侵至浅部固结后开始冷却，岩石温度从 $800^{\circ}C$ 左右一直降至常温。由于降温幅度大，岩石的体积发生明显的收缩，特别是在上隆的小岩体接触带附近，常出现放射状和环状等为主的断裂，它们不同于地壳运动过程中产生的各种断裂（张性、压性、剪性相伴产出）。而所有冷缩裂隙都是张性的。

冷缩裂隙是与岩浆岩有关的热液矿床的主要控矿断裂，如华南石英脉型钨矿床的脉体几乎都呈放射状产于岩体的接触带附近，即钨矿主要赋存于放射状的冷缩裂隙中；又如在德兴斑岩铜矿床中，矿体集中产于以放射状和环状细脉构成的网状裂隙发育区。宁芜玢岩铁矿的控矿构造被分为 10 类，其中 8 类为放射状和环状冷缩裂隙；还有 2 类为角砾岩带，它们产于其它 8 类裂隙带的中央，明显是放射状和环状等张裂隙进一步发展的结果。

上述矿床实例表明，对与岩浆岩有关的热液矿床来说，主要控矿构造不是动力断裂，而是热力断裂。虽然，这种断裂的形态、规模、产出部位等多变，但所有断裂都具张性，而且是矿化和蚀变的中心，它们对成矿起重要的控制作用。

6. 脉状、网脉状充填型矿体常常是热液矿床主要矿体，是矿化中心，同时又是低温中心和岩（矿）石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值降低的中心

岩浆热液形成于超高温条件，活动于相对“冷”的岩石中，所以，在流动迁移和成矿过程中，断裂中的热液都是高温中心。而实际资料恰恰相反，脉中充填型矿体的形成温度最低，近矿的蚀变温度高于矿体的形成温度，但却低于远脉的蚀变温度。这就是说，脉型矿体不是高温中心，而是低温中心，还是岩（矿）石的低 $\delta^{18}\text{O}$ 值中心。如美国坎姆斯托克金矿床产于 75 km^2 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值降低晕中，中心部分岩石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -2‰ ，比边缘部分降低了 10‰ 。这只能有一种解释：大气降水在高温条件下，与岩石发生 O 同位素交换的结果。所以，矿体为低温中心时，成矿热液属交代成因，而不是岩浆热液。由此可知成矿与蚀变温度的对比具有重要成因意义。热液体系中形成温度最高的是深部的碱交代蚀变，其值大于 500°C ，而矿体大多出现在 350°C 左右，蚀变温度远高于矿化温度。或者说，蚀变开始早于成矿，或先蚀变后成矿，这是大多数热液矿床的基本特征。

7. 热驱动对流循环是一种特殊的矿质活化和富集的成矿方式，易成大矿

与岩浆岩伴生的热液矿床都可归属于岩浆热驱动对流成矿模式。对流是热传导的主要方式之一，也是成矿热液形成和热液成矿的重要方式。如塞浦路斯含铜黄铁矿矿床是古代海底热水对流循环成矿的代表。研究结果表明，成矿热液的 $\delta^{34}\text{S}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值几乎与晚白垩世海水完全一致。因而可以确认，热液蚀变和成矿作用是海底海水在基性火山岩中循环而发生水-岩反应的产物。

环流复杂多变，水的流向、温度、压力和成分等随流动而不断变化。环流是由下降半环和上升半环结合组成的对流环。下降流都出现在低温区，由于向下流动，水的温度增高，水-岩间反应强度增高，岩石物质的活化度增大，水的矿化度也升高；因此，下降流可导致矿质的活化和成矿热液的形成。塞浦路斯矿床下降流活动区岩石普遍蚀变，蚀变岩的成矿金属含量比原岩显著降低，Cu 降低了 90%，Zn 降低了 50%，这有力地证明了，矿质活化的存在。上升流出现在高温区，在向上流动的过程中，水的温度不断降低，当降到一定温度时，溶液中的矿质处于过饱和状态，可导致矿质沉淀富集。环流中的下降流有利于矿质活化，上升流有利于矿质沉淀，所以，环流过程常可包含矿质的活化、迁移和沉淀多阶段的整个成矿过程。

在对流热液体系中，下降流的范围很大，直径可达 10 km 或更大，它占据了体系中除中央区以外的全部空间。上升流区在体系的中央，范围较小，通常，面积不大于 $1\sim 2\text{ km}^2$ 。因此，对流热液体系非常有利于大范围岩石中矿质的普遍活化，并使矿质富集于很小范围内，这就是小岩体与大型矿床相伴的主要原因。

8. 交代热液成矿学说的提出是热液矿床研究程度和水平提高的必然结果

热液矿床形成的环境、条件和过程等多种多样,再加上人们的侧重点不同,造成了热液矿床命名的繁杂,如以成因(岩浆热液、变质热液)、温度(高温、中温、低温)、岩浆岩(斑岩型、玢岩型等)、蚀变岩(矽卡岩型、云英岩型等)、构造岩(韧性剪切带型、构造角砾岩型)、成矿方式(充填型、交代型)、热液的初始水(大气降水热液、海水热液)、矿体产出特征(脉型、微细粒浸染型)、矿质来源(层控热液)、地名(卡林型)等命名,这种现象既反映了人们对热液的来源和成矿过程的认识还比较模糊,又反映了不少人回避矿床的成因这一重要问题。

热液矿床的成因分类是科学的,它强调了热液的形成过程或来源。但现有的成因类型是不全的,只有岩浆热液和变质热液两类,而很多热液矿床不属于这两类,一定还有其它成因类型。事实确实如此,这就是我们提出的交代热液,它包括大气降水热液、海水热液等。

热液成矿作用可分为成液(成矿热液的形成)和成矿(矿体的形成)两个阶段。它们的形成条件差别很大,如岩浆热液的成液为岩浆过程,成矿为热水溶液过程,这两个过程不可能在同一地点发生。矿床是矿质从热液中析出的成矿地,而成液地是远离成矿地的某一地区,通过导矿构造使热液从成液地迁移至成矿地。成液地和成液过程都是假定的,直至今日,还没有一个实例,不得不使人们对这种假设的客观性产生怀疑。

近40年来,世界上发现了很多现代的成液和成矿现象,它们的典型代表是索尔顿海地热田成液和东太平洋北纬21°的海底成矿。

索尔顿海现代热液不是来源于岩浆,而是由大气降水通过水-岩反应而成,是标准的大气降水热液,属交代成因。

1978年,在东太平洋洋脊北纬21°处发现了正在活动的高温热泉和块状硫化物矿床;此后,不断有类似的发现,到目前为止,已发现100多个金属矿床和热水区。它们具有类似的成矿三部曲(侯增谦,2003):①由扩张中心及其附近岩浆热源驱动海水在海底下循环;②加热的海水与渗透性壳岩发生反应,海水变成含矿热水;③含矿热水在海底排泄成矿。这类矿床被定为海水热液型,也属交代热液成因。

20世纪下半叶,在热液矿床成因研究方面取得了重大突破,创建了有效区分不同类型热液水的H、O同位素等测定方法和直接测定矿质来源的方法。这些手段的应用获得了大量新资料,得出了下列新结论:①几乎所有的热液矿床成矿都有大气降水参与;②相当多的一批矿床属大气降水(包括海水)热液成因;③相当多的一批矿床的成矿物质来自矿体周围的岩石。有关热液来源和成矿过程的新资料不仅证明了交代热液的存在,而且,还证明其存在的普遍性。这给交代热液成因以极大的支持。20世纪60年代是岩浆热液成因时代转变为交代热液成因时代的转折期。因此,交代热液成矿学说是热液成矿学发展的必然产物。

9. 独创简便、易行、有效的热液矿床三源预测方法

根据三源交代热液成矿学说,要形成热液矿床必须有矿、水和热三种源。当这三种源有机地结合在一起,才能形成热液和矿床。只要将地质矿产图转变为矿源、水源和热源的三源图,并圈出直径约为10 km的所有三源区,就很容易地完成三源预测图的编制。只有圈出的三源区是有成矿远景的预测区,其它地区都是非三源区(一源区和二源区),无成

矿远景。三源预测方法是否有效,预测图本身已给出了答案,如已知矿床主要都集中于三源区内,这表明三源预测方法是可行的,会有好的预测效果。若已知矿床没有集中在三源区内,则预测效果不会理想。

三源预测方法不仅能预测矿床的位置,还能预测矿床的矿种、类型、规模,并可划分不同成矿远景区带等。在1979年底至1980年初,作者对郴县地区(1:20万图幅)和宁芜地区作了三源成矿预测,并向当地地质队作了介绍。后来,在提出的三源预测区中找到了一批矿床。

三源预测方法是我国的独创,其有效性已被找矿实践证实,方法简单、易行,有实用价值,但尚需完善和发展。

除作者外,曾参与与本专著有关研究课题的科技人员还有吴学汉、张国柄、王立本、邱小平、张建华、王五一、张权范、郭新生、王高尚等。部分野外工作与湘南地质队、赣东北地质队、赣西北地质队、黑龙江地质四队、辽宁地勘局地质矿产研究所、河北省地质矿产勘查院唐山工作部和原地矿部第二综合物探大队等合作完成。

本专著由季克俭和吕凤翔编写,其中,第一章至第五章、第九章至第十四章由季克俭和吕凤翔编写,第二章第8—10节、第三章第1节、第四章第4节、第六章、第七章和第八章由吕凤翔和季克俭编写。

原湖南、江西、广西、广东、安徽、江苏、辽宁、河北、山西、黑龙江、吉林、内蒙古等省(自治区)地矿局、地质队和矿山等对我们的科研工作积极配合和热情帮助。原矿床地质研究所稳定同位素、流体包裹体、电子探针、X光衍射、热重分析和红外光谱等实验室、岩矿测试技术研究所和北京铀矿地质研究所等完成了我们的测试分析任务,各级管理部门对我们的科研工作给以大力支持。宋叔和院士、涂光炽院士、张炳熹院士、翟裕生院士、裴荣富院士、李崇佑高级工程师、王昌烈高级工程师、董盛铭高级工程师、杜琦高级工程师、叶天竺高级工程师、刘士毅高级工程师、芮宗瑶研究员、张安棣研究员、于志鸿研究员、侯增谦研究员、毛景文研究员等在本专著有关项目的列项时给予支持,在研究过程中给以指导,在成果评审时给以公正评价。对上述给以支持和帮助的单位和个人以及对三源成矿关注的人们一并表示衷心的感谢。

目 次

前 言

第一章 热液源的研究及其意义	(1)
第一节 热液来源是成矿的核心问题	(1)
第二节 矿床的主要成因观点	(2)
一、“火”成派	(2)
二、“水”成派	(3)
三、“水”“火”结合的成矿观点	(4)
第三节 热液源研究的重大进展和事件	(4)
一、岩浆中水的溶解度及其变化	(4)
二、铁矿床中矿源岩的确定	(5)
三、不同成因热液的 δD 、 $\delta^{18}O$ 值范围的确定	(6)
四、索尔顿海地热田成矿热卤水成因的变化	(7)
五、黑烟囱等现代海底热水成矿的发现	(8)
六、斑岩型矿床中成矿金属负晕的发现	(9)
七、热液矿床流体和蚀变矿物的 δD ($\delta^{18}O$) 值具有明显的纬度效应	(10)
八、热液矿床有规模很大的低 $\delta^{18}O$ 值晕	(12)
九、热液矿床流体包裹体的富 Ca 特征	(12)
十、矿床的分布与岩石含水性有关	(12)
第四节 对热液矿床成因和热液源研究的认识	(13)
一、成因复杂、缺少研究方法	(13)
二、矿源可以确定,但现在条件下难于查明	(13)
三、热液的成因和来源都是可以确定的	(14)
第二章 热液铁矿床的铁源	(16)
第一节 宁芜、庐枞盆地铁矿床	(16)
一、围岩蚀变	(16)
二、蚀变过程中铁含量的变化	(19)
三、蚀变过程中提供的铁量	(22)
第二节 邯邢地区铁矿床	(23)
一、钠质交代作用	(23)

二、钠化过程中岩石释放的 Fe	(23)
第三节 闽西南地区铁矿床	(28)
一、围岩蚀变	(30)
二、铁质来源	(32)
第四节 大冶地区铁矿床	(33)
一、围岩蚀变	(34)
二、蚀变过程中 Fe 含量的变化	(35)
第五节 黄岗铁矿床	(37)
一、围岩蚀变	(37)
二、蚀变与矿化	(37)
第六节 磁海铁矿床	(39)
一、围岩蚀变	(40)
二、蚀变与矿化	(40)
第七节 雅满苏铁矿床	(42)
第八节 乌拉尔铁矿床 (俄)	(44)
一、矿化特征	(44)
二、蚀变岩的研究	(45)
三、褪色蚀变与铁矿化的关系	(46)
第九节 西伯利亚南部铁矿床 (俄)	(50)
一、蚀变岩类型	(50)
二、铁矿化与褪色蚀变的关系	(57)
第十节 铁泉铁矿床 (美)	(58)
一、含矿侵入体的分布和结构	(58)
二、三峰山岩体内不同类型岩石的带状分布	(59)
三、侵入体内的热液蚀变	(61)
四、成矿流体的成因	(61)
第十一节 劳瑞尔铁矿床 (美)	(63)
第十二节 铁帽铁矿床 (美)	(65)
一、热液蚀变	(65)
二、铁的来源	(67)
第十三节 罗梅拉尔铁矿床 (智利)	(68)
第三章 黄铁矿型矿床的铁等来源	(73)
第一节 乌拉尔地区 (俄)	(73)
第二节 塞浦路斯矿床 (塞)	(75)

第三节 契绥尔湖矿床 (加)	(79)
第四章 斑岩型等铜矿床的铜源	(84)
第一节 德兴矿田	(84)
一、成矿地质背景	(84)
二、主要成矿元素来源	(84)
三、花岗闪长斑岩的铜的地球化学场	(94)
四、矿脉围岩的成矿元素含量变化	(94)
五、钾钠的地球化学场	(94)
第二节 武山-城门山矿田	(98)
一、成矿地质背景	(98)
二、成矿物质来源	(99)
第三节 多宝山矿床	(108)
第四节 乌奴格吐山矿床	(110)
第五节 亚利桑那州矿床 (美)	(112)
第六节 安-麦松矿床 (美)	(116)
第五章 热液钨矿床的钨源	(123)
第一节 湘东南地区	(123)
一、矽卡岩物质的来源	(123)
二、成矿物质来源	(125)
第二节 赣南地区	(130)
第六章 热液锡矿床的锡源	(134)
第一节 锡霍泰-阿林地区 (俄)	(134)
第二节 南天山地区 (吉)	(136)
第三节 银岩矿床	(139)
第七章 热液金矿床的金源	(140)
第一节 治岭头矿床	(140)
第二节 东坪矿床	(142)
第三节 漠滨矿床	(146)
第四节 银山矿床	(151)
第五节 萨彦-阿尔泰地区 (俄)	(153)
第六节 圣安东尼奥矿床 (美)	(156)
第八章 热液铅锌矿床的矿源	(158)
第一节 天山地区 (哈)	(158)
一、青磐岩化作用及铅和锌的迁出	(158)

二、钠长石化作用及铅和锌的迁出	(161)
三、石英绢云母岩形成过程中铅和锌的迁出	(161)
第二节 矿山阿尔泰地区(俄)	(162)
一、蚀变与矿化	(162)
二、尤比列伊矿床	(165)
三、扎哈罗夫矿床	(166)
第三节 豫南地区	(167)
一、含矿岩系的地球化学特征及矿源层的确定	(167)
二、矿源层与成矿的关系	(169)
第九章 热液萤石矿床的矿源	(171)
第一节 氟的来源	(171)
第二节 锶同位素组成特征及钙的来源	(172)
第十章 热液铀矿床的矿源	(174)
第一节 460 矿床	(174)
第二节 中国铀矿床	(175)
第十一章 热液矿床的水源	(176)
第一节 柿竹园矿田	(178)
一、热液水的氧、氢同位素特征	(178)
二、水-岩的氧同位素交换和演化	(180)
三、水-岩氧同位素发生交换的时间和条件	(186)
四、矿物流体包裹体的成分特征	(188)
五、岩浆结晶和矿床分布与地质体含水透水性的关系	(188)
六、矿石中的钙质矿物和围岩的碳酸盐化	(190)
七、小结	(190)
第二节 德兴矿田	(191)
第三节 武山-城门山矿田	(193)
第四节 赣南地区矿床	(196)
第五节 白乃庙矿床	(200)
第六节 额仁陶勒盖矿床	(203)
第七节 中国锡矿床	(207)
一、热液水的来源	(207)
二、银岩锡矿床的成因	(209)
第八节 坎姆斯托克矿床(美)	(211)
第九节 铁帽铁矿床(美)	(216)

第十节 中国萤石矿床	(217)
第十一节 中国铀矿床	(218)
一、460 矿床	(218)
二、中国铀矿床	(218)
第十二章 热液矿床的热源	(221)
第一节 德兴矿田	(221)
一、热变质和岩体的关系	(221)
二、热液蚀变和岩体的关系	(221)
三、赋矿裂隙和岩体的关系	(223)
四、岩体大小和矿体规模的关系	(224)
五、氧同位素和铷锶年龄	(224)
第二节 柿竹园等矿田	(225)
一、矿化温度与岩体的关系	(225)
二、矿化分布与岩体的关系	(226)
三、矿床类型和规模与岩体的关系	(226)
四、矿石矿物特征与岩体的关系	(227)
五、控矿构造及其与岩体的关系	(227)
第三节 武山-城门山矿田	(228)
一、岩体大小与矿床规模的关系	(228)
二、岩体的形态和矿床规模的关系	(228)
三、围岩的失重温度	(229)
四、矽卡岩发育程度与岩体关系	(229)
五、矿化的带状分布	(229)
六、以岩体为中心的环形热反应场的存在	(232)
第四节 赣南地区	(232)
第五节 宁芜-庐枞地区	(233)
一、控矿构造以岩体的冷缩裂隙为主	(233)
二、矿化和蚀变具有垂向(温度)分带	(234)
三、矿化蚀变垂向分带受异常的地热梯度控制	(234)
第十三章 交代热液成矿作用	(235)
第一节 交代水(热液)	(235)
第二节 现代交代热液	(239)
一、雨水热液	(239)
二、海水热液	(244)

第三节 交代热液特征	(246)
一、交代水及其作用的特征	(246)
二、交代热液体系的矿化和蚀变特征	(264)
三、交代热液体系的矿化和蚀变的温度特征	(273)
第四节 交代热液成矿机理及模式	(281)
一、热液中元素的迁移	(281)
二、温度与成矿	(283)
三、压力与成矿	(285)
四、岩石体积的变化与成矿	(287)
五、冷缩裂隙与成矿	(288)
六、异常地温梯度与成矿	(289)
七、蚀变与成矿	(290)
八、热液体系的范围	(292)
九、热液(矿床)的成因	(294)
十、三源交代热液(无矿—)成矿模式图	(296)
第十四章 热液矿床的“三源”成矿预测	(300)
第一节 成矿理论与成矿预测	(300)
第二节 中国东部热液矿床的成矿条件	(300)
一、岩浆作用与热液矿床的关系	(301)
二、地层和岩石性质与热液矿床的关系	(302)
三、构造与热液矿床的关系	(304)
第三节 热液矿床的分布规律	(304)
一、围绕潜水盆地的边缘分布	(304)
二、围绕岩体的接触带分布	(304)
三、产于矿源层(体)内或其附近	(305)
第四节 热液矿床的“三源”预测方法	(307)
一、预测准则和三种源的确定	(307)
二、预测内容	(308)
三、预测方法	(308)
四、预测实例	(310)
五、预测效果	(320)
参考文献	(326)

第一章 热液源的研究及其意义

第一节 热液来源是成矿的核心问题

热液来源是热液矿床成因的关键。若查明了热液来源在很大程度上就是确定了矿床的成因。如热液来源于岩浆,则矿床属岩浆热液成因;热液由变质作用产生,则矿床为变质热液成因;热液由交代作用形成,则矿床就可确定为交代热液成因。因此,热液的来源问题实质上就是热液矿床的成因问题。

矿质、水和热是构成热液的三要素。热液的来源涉及热液的矿质来源、水的来源和热的来源。热液是热的水溶液,其主体是水;因此,热液的来源主要决定于水的来源。水不仅是热液的主体,而且又是矿质的载体和热的容体。但在 20 世纪 50 年代以前,人们通常无法确定热液水的类型或来源,只能根据地质现象进行推断。

热液矿床成因研究的水平在很大程度上决定于热液来源研究的状况,在热液来源方面,缺乏可靠的实际资料,则成因争论就大,反之,争议越少。

关于热来源的认识和研究可分为二个阶段:第一阶段以推断假设为主,时间为 20 世纪 50 年代之前。这一阶段, H、O 同位素方法还没有在矿床地质研究中使用,无法确定热液水的类型或来源,元素的分析测试水平较低,特别是对微量和超微量元素的分析检出值大多高于它们相应的地壳丰度平均值。因此,无法确定大多数热液成矿元素的来源。第二阶段为热液来源的具体研究阶段,时间自 20 世纪 50 年代至今。在这一阶段,同位素分析方法在地质研究中得到广泛应用,元素的分析测试水平大大提高。根据热液水的 H、O 等同位素资料,可确定许多矿床热液水的类型和来源,根据 Pb、S、Sr 等同位素研究及稀土元素及微量元素等研究,特别是成矿元素来源的直接测定方法的应用,确定了许多矿床的矿质来源。大量有关热液来源的实际资料 and 信息的获得,推动了矿床成因研究。由于地质过程的复杂性和许多地质数据的多解性,因此,成因观点也向多方面发展,出现了丰富多彩的成矿理论和成矿模式。但矿床热液来源的不断被确认,导致对同一矿床不同成因认识的渐趋一致或大致接近。

热液矿床可分为两大类:大陆型和海洋型(季克俭等,1989),海洋型热液矿床的热液源基本上已被查明。正如侯增谦等(2003)指出,以火山岩和以沉积岩为容矿岩石的硫化物矿床的现代类比物已在现代海底大量发现,它们通常形成于张裂或裂谷作用阶段,并随着张裂盆地的发育,形成各具特色的硫化物矿床。在 100 多个热水活动区中,至少有 15 个金属硫化物矿床与陆上矿床规模相当。已知热水活动区和硫化物矿床主要分布在 4 种构造环境:大洋中脊、弧后盆地、岛弧和弧前盆地。尽管不同构造环境的热水流体化学、热传输及矿化类型可能存在重要差异,但基本的热水作用过程是类似的,即具有类似的成矿三部曲:①由扩张中心及其附近岩浆热源驱动海水在海底下循环;②加热的水与

渗透性壳岩发生反应（并萃取岩石中的矿质）；③热水在海底排泄成矿。

大陆型热液矿床可分两类：与岩浆岩伴生型和与岩浆岩无明显联系型。与岩浆岩无明显联系的热液矿床的热液源研究资料表明，热液不是岩浆来源，热液水主要为大气降水或含盐的建造水。这类矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 值很高，相当一部分矿床为 15‰~20‰，这种硫是由海相沉积地层的硫转化而成。

目前争议较大的是与岩浆岩伴生的热液矿床。这类矿床热液水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值大多不在 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 图上的岩浆水范围内，并普遍具有明显的纬度效应，矿体的围岩中有 $\delta^{18}\text{O}$ 异常，常常以负晕为主，并伴有范围很大的成矿元素负晕等。所有这些地质事实为矿床成因研究提供了新的资料和信息。

第二节 矿床的主要成因观点

热液矿床成因的争论已有 200 多年历史，主要有三种观点：岩浆热液，变质热液和侧分泌。这些观点可归纳为两大派，以岩浆热液观点为代表的“火”成派，和以侧分泌观点为代表的“水”成派。

一、“火”成派

该派包括岩浆期后热液观点，岩浆热液观点，地幔射气观点，岩浆水萃取岩浆岩中矿质而成热液观点等。岩浆热液观点在 20 世纪上半叶占绝对统治地位，得到广大地质工作者较普遍的公认。造成这一状况的主要原因是：①很多热液矿床与侵入体在空间上紧邻，时间上紧随，温度上紧联；②尼格里（1929）提出了岩浆与水的二元相图，为岩浆结晶演化而成热液提供了“理论”依据；③火山喷气和与岩浆作用有成因联系的热泉均可形成热液矿化。这些现象和事实表明，热液成矿与岩浆作用有密切的关系，但是否已无疑地证实热液来源于岩浆呢？正如俄罗斯地球化学家巴尔巴诺夫（1985）指出：传统观点认为矿质来自岩浆房，通常不是以实验和研究为基础，而是基于尼格里等相图的假设的岩浆结晶演化的途径上。尼格里的二元相图不是根据自己的实验资料所作，而是根据他人的资料及自己的设想编制的。该图的核心是岩浆与水是无限混熔（溶）的。这已被格朗松（1931）的岩浆与水的溶解度实验所否定。

由于岩浆热液观点长期占统治地位，因此，有关热液矿床的研究都集中到热液成矿与岩浆作用的关系。这种研究投入的工作量是非常巨大的，但取得的进展是极其有限的，许多成矿的基本问题没有得到证实或解决。如在成矿实验方面，虽做了很多岩浆的结晶实验和岩浆及流体中成矿金属的分配系数实验，但没有人完成从岩浆结晶开始直至最终生成热液矿化的完整实验。岩浆结晶实验表明，岩浆结晶都以液相线温度开始，以固相线温度告终，即当岩浆温度达到固相线时，不再有岩浆存在，不再存在尼格里所称的残余溶液（由岩浆与水混熔组成）。

近期有关花岗岩的成因研究不断深化，花岗岩类分为 S 型、I 型、A 型、M 型、磁铁矿型、钛铁矿型等。但它们与热液矿化关系的研究并无实质性进展，不管上述何种类型花岗岩既可能伴生热液矿床，也可能不伴生热液矿床，甚至同一地区、同一时代、相同成分，相近规模的同一类型相邻的二个侵入体伴生热液矿床的情况截然不同，这些都难于得出合理的解释。