

热液矿床地球化学

上册

H.L.BARNES 主编

地质出版社

热液矿床地球化学

上册

H. L. Barnes

陈浩疏 译

地质出版社

Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits

Second Edition

Edited by H. L. Barnes

A Wiley-Interscience Publication

John Wiley & Sons

1979

热液矿床地球化学

上 册

H. L. Barnes

陈浩疏 译

*

责任编辑：唐静轩

地质出版社出版

(北京西四)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本：850×1168¹/₃₂ 印张：14 字数：370,000

1985年2月北京第一版·1985年2月北京第一次印刷

印数：1—3,750册 定价：3.95元

统一书号：13038·新61

前 言

这一版的目的仍然是解释和评价各种成矿作用的证据。我们邀请了对热液矿床成因的概念目前作出较大贡献的每个分支学科的权威参加讨论。“热液”一词在本书中是单纯用来表示热水流体的意思。单纯的火成作用（例如在岩浆房中铬铁矿通过分馏结晶作用的积聚）和单纯的沉积作用（例如锰在海底沉积成结核）都不包括在这种评述之内。对于由交代作用引起的矿石沉淀作用，以及机械应力和热变质作用对矿石的影响也不作充分讨论，这主要是因为研究得不够的缘故。

本版各章的顺序大体上也是按照理想的成矿溶液在演化过程中产生的事件来安排的，从强调溶液的来源开始，然后是溶液与围岩的反应，接着是沉淀作用的产物，最后是残余流体的性质。

在其他方面，第二版显然是一本新书。全部章节有一半以上，包括新增加的质量转移现象和成岩作用的热液流体的来源的讨论都是由新的作者编写的。由于取得了第一版的出版者 Holt, Rinehart, and Winston 公司友好的同意，本版的出版者也不同了，因为该公司的经营目标现在已经改变。

认真的读者很快就会看出作者们之间认识上的不一致之处。因为这些反映着科学当前的状况，所以本书没有试图去解决或者掩饰这些重大的分歧。相反，它们的影响将会促进和引导进一步去探究更加重要的有争论的领域。

为便于读者，除了第十一章（关于矿物和热水溶液之间的质量转移）以外，各章都采用同一种标准代号。第十一章单独需要的更复杂的记号主要是通过增加别的符号来满足。这些符号仅限于在这一章中使用，而且是第一次使用。目录之后列出的通用代号是地球化学目前使用的代号与纯化学和实用化学国际联合会推

荐的代号之间的一种折衷。虽然 M. L. McGlashan (1973, *Ann. Rev. Phys. Chem.*, 24, 51-76) 对有关代号使用原则和单位所做的评论是有说服力的, 因而作某些改变是合乎要求的, 但是本书用卡和巴或大气压所表示的数值仍然可以直接与现代文献中的数据相对比。

HUBERT LLOYD BARNES

1979年2月

目 录

第一章 热液矿床的多种成因.....	1
历史的回顾.....	3
目前的状况.....	6
提要.....	20
参考文献.....	22
第二章 显生宙的铅结构.....	23
背景情况.....	24
铅同位素演化的动力模式.....	39
铅同位素与地质环境.....	48
参考文献.....	73
第三章 岩浆与热液流体.....	78
岩浆中的挥发份.....	79
岩浆中的热力学关系.....	85
钙-碱性岩浆的产生.....	99
含水岩浆的浅侵位和固结作用.....	113
岩浆的水相.....	125
亚固相线的水解平衡.....	135
参考文献.....	144
第四章 热液流体的沉积成因.....	148
沉积物的成岩作用.....	149
沉积盆地中水溶液的性质.....	149
某些成矿流体的性质.....	170
地下卤水的流动.....	174
结论.....	178
参考文献.....	179

第五章 热液蚀变	183
热液蚀变的交代作用理论.....	186
蚀变作用的化学性质.....	193
蚀变矿物的稳定性.....	203
蚀变的分类.....	213
温泉和浅成热液矿床的蚀变.....	217
花岗质岩石中矿脉周围的蚀变.....	219
斑岩铜矿床的蚀变.....	223
矽卡岩矿床的蚀变.....	231
云英岩矿床的蚀变.....	240
参考文献.....	242
第六章 热液矿床中氧和氢的同位素关系	250
同位素的记号与标准.....	251
平衡的同位素分馏.....	251
天然水中同位素的变化.....	255
地表来源的水与火成侵入体之间的相互作用.....	262
包含在热液系统中的大气水的数量.....	265
火山地区的“浅成热液”矿床.....	267
斑岩铜矿床和钼矿床.....	271
斑岩铜矿床的浅成蚀变.....	276
密西西比河谷型铅-锌-氟化物矿床.....	277
火山成因的块状硫化物矿床.....	278
变质矿床.....	279
其他的热液矿床.....	280
结论.....	287
参考文献.....	289
第七章 硫化物矿物的稳定性	295
化学和物理条件的局限性.....	295
重要的天然体系的选择.....	296
检验和研究金属矿物的方法.....	305

研究相关系的方法.....	309
数据资料的表示方法.....	315
特定的硫化物体系.....	390
参考文献.....	429

第一章 热液矿床的多种成因

BRIAN J. SKINNER

(耶鲁大学)

矿床是矿物在地壳中天然的，但又是局限的聚积体。这个定义既分不清聚积的矿物种类，也分不清这些聚积体是如何发生的；实际上，几乎每一种地质作用在适当的条件下都可以产生某种矿物的聚积。如果聚积的矿物含有对人类有用的物质，又如果聚积体多到足以保证开采的话，矿床就与它的专门名称“矿床”相一致。然而，那是一个经济上和社会上的定义，而且它虽然是一个完全正确的定义，但是在讨论矿床时，我们希望不要受这个定义所限制。产生富矿床的同样作用也会产生贫矿床，而我们必须找出富矿床和贫矿床的证据。

矿床由许多不同的方式形成，有些方式已经很清楚，有些则很不清楚。在已经清楚的矿物聚集的方式中，有盐类从湖水和海水中的沉淀作用，在冷却的岩浆中矿物通过重力分离的分离作用，在流水中不同比重矿物通过分离作用形成砂矿，在风化过程中通过淋滤形成红土，还有通过向上移动的毛细管水的蒸发作用沉积成的智利硝石。然而，这些已经清楚的成矿作用中，任何一种在本书都不加讨论。相反，本书集中讨论热液矿床，一类具有复杂而又只有部分了解其形成方式的特殊矿床。热液矿床的地质背景和在其中聚集的矿物，其变化是很大的；但是都有一些共同的联系。这类矿床中每一个矿床都是在热的水溶液（一般叫做热液）流经地壳中的一定通道，或流过地壳表面的局限部分并从其溶解的负荷中局部地沉淀出大量矿物时形成的。溶液怎样形成、流动和反应，以及它们沉淀出什么东西，正是以后各章所论述的

论题。大部分的讨论在说明上完全是化学方面的，而且有时似乎超出了中心主题。这种情况主要是因为不同的问题引起各种不同专家的兴趣的缘故。开头这一章提供一个梗概，读者（可能是不熟悉专业的读者）可以从中把许多讨论的论题联系起来，并实际上了解较大问题的某些方面他们是怎样论述的。这一章也企图证明有些问题仍然需要进行充分的研究。

与大多数地质规模相比，热液矿床是小规模的——即使是最大的热液矿床在体积上也不超过一立方英里。粗看起来，热液矿床似乎是地质上的偶然事件，是由较大规模的全球作用的局部变形以某种方式造成的同一种类的一个微小畸变。但是，这些偶然事件不可能完全是偶然的，或者是无规律的，因为矿床可以被分成明显的类，而某一类的矿床在地壳某些部分产出的频率比其他矿床高得多。另外，尽管在发现矿床的地质产地方面和在自然界中已知矿物的数目方面变化很大，但是在热液矿床之间却有一种化学上的一致性，即可以通过发现在矿床中聚积的有限的矿物种类（大部分是硫化物）来充分表示。产地的变化可能使我们对找出热液矿床的共同联系丧失信心，但是由矿物表示的化学上的一致性告诉我们必然有一种共性。共性也意味着比较少的化学作用在形成热液矿床说来是重要的。由于这方面的鼓励，我们必须阐明矿床的成因，而这本书就是受到这样鼓励的那些人当中某些人的成就记录。

在调查一个新的热液矿床时，我们似乎提出了足够的证据来回答所有的问题。但长时间的研究证明，我们至多只提出了部分的证据，而且通常提出的证据其倾向性达到这样的程度，以致对我们了解的甚至是充分研究过的矿床的形成作用也产生怀疑。

对热液矿床提出的无数定性和定量的问题大体上可以归纳为四类：（1）水是在什么地方产生的？（2）热液含水层的性质和驱动力是什么？（3）溶液在什么地方和怎样积聚它所溶解的组分？

（4）什么原因促使溶液沉淀出矿物？对所有这些问题，我们将永远不可能提出明确的、无可辩驳的答案，至少是提不出我们可

能希望得到的全部细节。但是有些问题通过地球化学的应用，缓慢地，但肯定地将会得到解答；总的说来，在最近二十五年来，我们对成矿作用细节的了解有了很大的进展。这种进展一直是缓慢地取得的，因为几个世纪以来人们已经知道热液矿床大致上是怎样形成的了。因此，对我们现代工作所依据的传统概念作简要的评述是有益的。

历史的回顾

古代有关热液矿床成因的推测在没有文字记载的朦胧历史中已湮没无闻了。根据野外记录下来的观察资料作出结论的第一个人，也是第一个用科学方法研究矿床的人是 Georg Bauer (1494—1555)，他以 Agricola 的笔名而闻名。Agricola 的许多推断现在看来是荒谬可笑的，但是他对地下水的流动，岩石被雨水分解和在矿山中看到的从水中沉淀下来的矿物质等观察资料使他得出一个富有洞察力的结论。他断定，他所看到的正在开采的矿石是地下通道被从地表下降而在地壳深部循环的天水的沉淀作用充填时形成的。循环的水从它们通过的岩石中被加热和有选择地淋滤出组分，最后它们到达了发生沉淀的地方。Agricola 关于金属矿石可能从天水成因的热水溶液中形成的结论是第一个合理的结论，而他的话是后来被称为“由侧分泌形成”的第一次清楚的说明。

矿床的来源，包括我们现在认为是热液矿床的那些矿床的来源的一种完全不同的结论是由 René Descartes (1596—1650) 提出来的，他认为地球是一个具有冷的岩石外壳和一个热的内核的细小的、部分冷却的星体。Descartes 推测地壳中的裂隙和通道是由于冷却时的调整形成的；充填裂隙的矿物质是在熔融体内部的冷却和结晶过程中从释出的蒸气中凝聚和沉淀出来的。Descartes 显然没有考虑到蒸气的成分，但是他的意见（尽管是一个不成熟的意见）却是后来被称为“由岩浆热水溶液”形成矿床的第一次说明。

因此，在三百多年以前就已经种下了争论的种子，即水来自

上部对水来自下部的争论。在以后的几个世纪中，许多矿床学家采取了扩大争论的姿态，但其中的两位，Hutton(1726—1797)和Werner(1750—1817)通过采用某些种类的矿床并不是由热水溶液形成的概念来阐明部分情况。Hutton 完全认为金属矿床都不是从溶液中沉淀的，它们完全是由干的、富含金属和硫的岩浆通过注入和结晶作用形成的。显然，他把事实夸大了，但是他的意见对于一类他所不知道的矿床——从镁铁质硅酸盐岩浆中不混溶硫化物岩浆的分离和分凝作用形成的铜、镍和铂矿床来说是正确的。典型的水成论者 Werner 把所有的金属矿床的形成都归结为直接从地表向下流动的成矿水对裂隙和其他通道的充填，并认为我们现在划分为后成矿床的那些矿床只不过是我們所认为的同生矿床的扩大部分。Werner 认为，沉淀下来的大部分矿物质在地下水中早就存在，而且不需要象侧分泌理论所要求的那样从岩石中提取。象Hutton的见解一样，Werner 的见解是极端的，但是他的思想对于我们认为某些层状矿床是化学的沉积岩来说仍然存在；某些地质学家甚至现在还持有这种思想，即有一类层状硫化物矿床可能是由海水的沉积作用形成的。

十九世纪初，矿床的成因、看来似乎是简单的轮廓已经完成了。热液矿床中的矿物质不是局部地来自矿床周围的围岩就是从溶液从远处搬运而来。如果是来自远处，搬运的溶液不是从地表下降就是从深部上升。如果它们是上升的话，溶液不是从冷却的岩浆中释出的原始溶液就是从周围的沉积岩或变质岩中释出的次生溶液。围绕着这些简单的可能性，固执己见的争论持续了一个半世纪，大多数的争论是讥讽的，而且有些争论比较多地建立在主观臆断和夸夸其谈的基础上而不是建立在可靠的观察资料和测量的基础上。

岩浆热液矿床的理论是最容易维护的理论。许多矿床与火成岩之间密切的空间关系是明显的。另外，在十九世纪上半叶，G. P. Scrope和Henry Sorby指出，水是岩浆的一种组分，而且人们很快就认识到岩浆水是在火山作用或侵入体在地下结晶作用

过程中释放出来的。只差没有提出释出的水含有形成矿床所需的、呈溶解状态的物质而已。讨论很快就集中在逸出流体的形成方面——它们是象在温泉所看到那样的一些液体，还是在地下水不存在的温度、压力区中的超临界流体。我们现在知道，当流体从液体过渡到超临界流体时化学性质是不会受到突然的激烈改变的，而且根据沉淀溶液的物理性质把所谓气成矿床划分为一类是不合理的，但是甚至在最近二十年以前，某些地质学家还热烈地争论这个问题。十九世纪中叶和末叶，许多典型的岩浆—热液关系被发展起来了；其中主要的支持者有法国的 T. Scheerer, Elie de Beaumont 和 L. de Launay, 德国的 Bernhard Von Cotta, 以及在欧洲和美国撰写文章的 F. Pošepný。侧分泌学说在当时遇到很大的争论——地表水能经受深部循环还是浅部循环，以及能在靠近还是远离沉淀的地方把它们溶解的负荷聚集起来。争论这些可能性的学者中有德国的 Gustav Bischof 和 F. Sandberger, 法国的 A. Daubrée, 加拿大的 T. S. Hunt 和美国的 S. F. Emmons。但是意见并没有取得一致。

十九世纪一位有预见的学者 J. A. Phillips 研究了在英国 Cornwall 的古老矿山中开采的锡矿床。Phillips 认为，在纯的岩浆溶液与纯的天水之间可能存在一个连续统一体。上升的水可能与下降的水混合，而且很难与下降的水相区别。Phillips 进一步认为，附近岩石的分析结果并不能解决金属的来源问题。在 Cornish 锡矿脉中发现的全部化学元素在邻近的火成岩和变质岩中都存在。由于矿脉明显地穿切这两类岩石，因此，Phillips 有预见地断定，在没有方法证明金属的来源时，每一类岩石都可能起作用，但是相对的作用却不能确定。Phillips 所提出的折衷意见预示了二十世纪初期大多数有影响的思想家的态度，其中最突出的是 C. R. Van Hise, J. F. Kemp 和 Waldemar Lindgren。他们每个人都认为天水和岩浆水都能起作用，金属可能来自多种来源，溶液可以长距离运移，并认为用他们所提出的方法不可能正确地解决这些问题。由于受到从他们各自研究的矿床中所取得的

证据的限制，因此每个人都会或多或少地强调水的不同来源和溶解组分的重要性。实际上，由于观察经验的不断增加，他们所受的限制和强调的重点在他们全部工作岁月中是有变化的。

今天我们仍然保留着 Lindgren 及其同时代人提出的灵活而合理的研究方法。虽然这些因素成为某一位教师或经验有限，受条件限制的地质学家强调一种水的来源胜过另一种来源的雄辩之词，但是指出二十世纪中叶所有热液矿床的学者都承认水和溶解物质都是多种来源这一点大概是正确的。这种一致是建立在长期工作和观察上的理智的胜利。但是仍然缺乏确切的证据。解决这个难题的方法终于通过稳定同位素和放射性同位素提出来了。最近十五年来，同位素地球化学的成就确实是惊人的，这些成就证明，真正正确的态度应该是客观的。

目前的状况

我们对历史有个总的看法之后，让我们现在回到有关热液矿床的四个主要问题上来，并把我们对这些问题的了解作简要的评论。

热液流体的来源

当我们发现一个矿床时，矿床从中沉淀的热水溶液早就已经离开了。但是溶液的残余有时还可以呈微小的包裹体圈闭在沉淀矿物之内而被发现。对石英、闪锌矿、方解石和萤石等透明矿物内部的这些显微包裹体中流体的研究已经揭示出比我们从任何其他来源所获得的更多的有关热水溶液的性质。根据流体包裹体的分析，我们知道热水溶液在成分和浓度方面有很大的变化，但都是属于某种盐水。这种情况反过来又告诉我们，成矿流体在化学上与现代地热系统所遇到的流体相类似。因此，为了增加我们对成矿流体的了解，我们可以着手研究现代的地热系统和在其中流动的热水溶液。采用这种方法看来似乎是个概念问题；为什么要研究一种目前不形成矿床的溶液呢？答案在于流动方式与化学、

物理变化适当结合而有效地产生局部沉淀的溶液很少见的缘故。如果环境合适,溶液显然是可以产生沉淀的。虽然遇到适当的环境来形成矿床的热热水溶液似乎并不多,但是流体本身在整个地壳中却广泛分布。

如果热水溶液是常见的话,就有可能把它们进行分类。正如White(1974)所指出的,这一点是真实的。根据对矿山、坑道、钻孔和温泉中水的无数观察资料,我们可以认为地下热液水的来源可以分为四种类型。这四种类型是:(1)地表水(包括雨水、湖水和河水,海水和地下水),(2)同生的和渗透很深的地下水,(3)变质水和(4)岩浆水。同生水可能一度是地表水,但长期埋藏在沉积物中,并与它周围的矿物起反应,最后形成它自己的标志与性质。如果有可能研究一个完整的热液系统的话,我们就能够通过直接的观察来证明其中水的来源了。可是我们从来就不能调查一个完整的系统,因为它们往往太大,太难了解,而且太容易被研究本身所破坏的缘故。因此,我们必须借助于第二手证据,而在这一点上同位素化学就变得非常有价值了。水中的两种化学元素,氢和氧都有一种以上的稳定同位素。每当水处于一种变化状态时(例如蒸发作用或热水溶液与围岩之间相互作用的化学反应),同位素便容易受到交换,而在水中 H/D 和 $^{16}O/^{18}O$ 的比值就发生变化。通过交换和分馏作用,四种类型的水中每一种都可以产生一种特有的同位素组成。

因此,测量流体包裹体和现代热液系统中热液的氢、氧同位素的相对丰度就可以提供有关水的来源的非常宝贵的资料。但是在解释同位素资料时会带来两个不能确定的问题。第一个问题是由岩石—水的反应引起的。反应可以是完全的或部分的。例如,在一大片压实沉积物中的深埋的同生水,或者由变质的脱水作用挤压出来的变质水都可能一度是地表水。然而,同生水 and 变质水都含有由地下反应所获得的新的同位素组成。如果只发生部分的同位素分馏的话,同位素的组成将介于地表水的和完全平衡的变质水的同位素组成之间。第二个问题是由几种来源的水容易混合

并产生一种同位素组成介于端元组分的同位素组成之间的溶液所引起的。正如 D. E. White(1974)简单地指出的那样, 同位素的连续统一体是可以产生的, 现在仍然不可能证明单独一种水就产生一种特定的矿床。实际上, 许多矿床都可以证明至少是由两种来源的水形成的。尽管围绕着水源的同位素鉴定上仍然有许多不能确定的问题, 但还是能够, 而且已经取得了一些非常重要的观察资料。一种非常重要的观察资料就是类似的矿床可以由类型十分不同的水所形成。热水溶液中水的多种来源的论证无疑地使我们作出一种有趣的结论: 水的真正来源 (虽然这个问题可能是令人感兴趣的) 显然不是形成热液矿床的控制因素。

热液的通道

在一个矿床范围内, 溶液的通道一般是明显的, 因为沉淀出的矿物和蚀变的围岩作为无声的证据仍然保留着。溶液在矿床中流动的方向, 特别是在平卧矿床中的流动方向常常是不明显的, 但是在许多情况下, 可以根据矿物的分带和类似的证据来推断。然而, 在热水溶液到达沉淀地点之前, 它可能已经移动了几十公里, 并与几百立方公里的岩石发生反应。我们利用一个开采净尽的热液系统来试图确定矿区以外的曲折通道, 这几乎是一件不可能的事情。因此, 我们不得不研究现代的热液系统 (不论它们形成矿床与否), 并用类推的方法来推断在含水层相似的地方过去可能形成矿床。

许多现代的热液系统已经完全了解清楚了。例如, 在压实的沉积盆地中流体通过多孔地层的通道是根据石油的勘探和生产来了解的; 又如, 流体在适当条件下显然可以产生密西西比河谷型矿床这一点最近已被 Carpenter 等人(1974)所证实。同样, 流体通过一大片火山岩中多孔地层的流动由于对温泉的研究和为发电厂开发地热田的结果而逐渐了解清楚了。这些研究对我们的思想产生重大的影响, 而且在将来可能起更大的作用。

尽管进展是令人鼓舞的, 但是我们还是要恢复一个单独成矿

系统的古水文学，而这一点对我们全面了解热液矿床却是一种严重的限制。在 White(1971)和其他人的著作中可以看到古水文学是多么重要的一个令人干着急的例子，他们已经能够恢复把产生的溶液带入 Michigan 的 White Pine 铜矿床中的 Copper Harbor Conglomerate 含水层的一些古水文学。古水文系统的恢复无疑是继续研究的最富有成效的领域之一。遗憾的是，它也是最困难的领域之一，但是这种报酬显然是值得努力的，因为研究的成果将能够指出被埋藏的矿床位置。

当我们着手解决驱动热液流体通过其通道的力这个问题时，我们又遇到不清楚的问题。现代热液系统的流动有六种原因：

1. 当一个含水层的水源与出口之间的静水压力存在差异时便发生流动。在 Tennessee 锌矿床中可以找到流体在静水压力下流动而可能形成矿床的例子。

2. 当一大片压实岩石的岩石静压力把孔隙度降低，并把其中的流体向上挤压时便发生流动。Michigan 铜矿床就可能是由一大片压实的 Keeweenaw 熔岩所排出的水形成的。而有些密西西比河谷型矿床的成因至少有一部分似乎也是由压实的沉积盆地中排出的水形成的。

3. 另一种驱动力（对密西西比河谷型矿床的成因来说可能也是重要的）就是渗透抽吸。通过天然薄膜，例如页岩，所产生的渗透压可以产生必要的力把水从沉积盆地中排除出去。

4. 当局部的热源，例如侵入的火成岩，促使热的和密度小的水上升而引起密度差异时便发生流动。局部的热源甚至可能产生对流的热液系统；许多类型的矿床，其中的浅成热液 Ag-Au 矿脉，斑岩铜矿床和塞浦路斯型块状硫化物矿体似乎都与对流系统有关。

5. 当非常咸的，因而密度也非常大的流体下降并取代密度小的上升流体时便发生流动。到目前为止，我们还不能确切地证明由这种方式驱动的流体所形成的矿床。

6. 当溶解的流体从正在冷却的岩浆中释出时便发生上升的