

成矿作用水文地球化学

[苏] A. K. 利西秦 著

原子能出版社

成矿作用水文地球化学

(以外生后成铀矿床为例)

〔苏〕 A. K. 利西秦 著

李育敏 孟瑞曼 译
金立敏 周维勋

· 阎立本 校

原子能出版社

成矿作用水文地球化学
(以外生后成铀矿床为例)
〔苏〕A. K. 利西秦 著

李育敏 孟瑞曼 译
金立敏 周维勋

阎立本 校

责任编辑 许文麟

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京印刷一厂印刷

(北京市西便门)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ ·印张 $8 \frac{5}{8}$ ·字数 190 千字

1983年1月第一版·1983年1月第一次印刷

印数001—2500 ·统一书号: 15175·443

定价: 1.10 元

内 容 简 介

本书论证了用水文地球化学方法研究外生后成矿床的适用性，并以铀矿石为例描述了地下水从岩石中汲取铀的有利环境，铀迁移的形式和决定该元素从天然水中沉淀出来的物理-化学条件；确定了层间水地沥青、煤、铁、铀、钼、硒和硫等氧化-还原平衡的含量界线，在此基础上提出了找矿评价的判据。书中还分析了生物化学作用、含水岩石的成份和气体还原剂对外生后成成矿作用的影响。

本书的读者对象是广大地质、水文地质、地球化学、矿物学和沉积岩石学方面的专业人员。它还可以作为高等矿业-地质院校学生《水文地球化学》课程的教材。

绪 论

地下水参与后生矿床的形成是公认的。但到目前为止，对于如何直接取得成矿过程中水文地质和水文地球化学资料却不够重视。不但如此，在描述矿床的生成条件时，这些资料常常被忽略，或不经任何慎重的分析就被舍弃。其中部分原因是地质研究的自然发展和演化使某些专业内容发展为独立的分支。从历史上看，水文地质学主要是从供水、同矿山水作斗争、灌溉、土壤改良等问题而发展起来的。结果，水文地质研究方法和业已确定的水文地质学规律，被排除在矿床成因研究的最主要课题之外并为地质-采矿人员所忽视。

水文地质人员把注意力转向成矿作用问题，这与研究制定普查有用矿床、首先是铀矿床的水文地球化学方法有关；也与在此过程中获得了地下水不仅参与破坏有用矿产，而且也参与形成有用矿产方面的具体资料有关。

В. И. 维尔纳茨基 (1929, 1934, 1960) 关于岩石和矿物与浸透它们的盐和气体的溶液为一整体且有相互联系的思想为成矿作用的水文地球化学研究提供了理论前提。具体论述成矿作用，包括铀成矿作用水文地球化学条件的早期尝试，是40年代末到50年代初提出的，见于Н. К. 伊格纳托维奇 (1948)、А. М. 奥符钦尼科夫 (1957)、А. А. 斯米尔诺夫和А. В. 谢尔巴科夫 (1957)、А. И. 格尔曼诺夫等人的著作 (1959) 和其它有关著作中。

在本专著中以外生后成铀矿床为例，对成矿作用的水文地球化学进行了研讨，因为在这方面铀矿床比其它矿床研究得更好。

本专著指出了从水文地球化学角度查明外生后成矿床生成条件的基本工作方法，并展示了在应用中所得到的理论和实践成果。

作者期望，本专著将使更多的地质-采矿工作者注意直接取得地下水成矿活动的资料，从而促进这方面研究的继续发展。

А. И. 克鲁格洛夫、Т. Н. 拉克叶娃、Е. М. 纳克季纳斯、В. Д. 锡杰利尼科娃、Т. А. 索科娃作了大量的化学分析工作，И. А. 康德拉季叶娃和В. С. 谢列勃连尼科夫为编辑本书提出了意见，Н. И. 加尼娜为编写本书给予了帮助，作者谨向他们表示谢忱。

成矿作用水文地球化学

(以外生后成铀矿床为例)

目 录

绪论

第一章 研究对象与研究方法····· (1)

1. “外生后成矿床”概念的含义····· (2)

2. 自流水盆地构造中外生后成铀富集的地质-水文 地质条件····· (6)

3. 查明外生后成矿床生成条件的水文地球化学方法 ····· (13)

4. 水文地球化学介质的定性和定量特性····· (20)

5. 成矿作用过程研究中地下水的分析方法与水文地球 化学取样的补充要求····· (39)

第二章 地下水的含铀性····· (50)

第三章 铀在地下水中迁移的形式及其确定 方法····· (64)

1. 铀的水溶液化学概况····· (64)

2. 天然水中铀存在形式的实验研究结果 ····· (76)

3. 地下水中铀迁移的胶体形式 ····· (78)

4. 地下水中铀迁移的有机-矿物形式 ····· (81)

5. 地下水中铀迁移的离子形式与铀的

各种基本存在形式之间的数量关系 (84)

第四章 铀从层间水中沉淀所必需的和基本的

氧化-还原条件 (92)

1. 从层间水中沉淀的铀氧化物的含氧系数值 (92)

确定铀黑与铀黑矿石含氧系数的原则 (94)

测定含氧系数的分析步骤 (95)

矿石与空气接触的时间对铀黑含氧系数值的影响 (99)

外生矿石中铀黑的含氧系数与铀从层间水中
开始沉淀的Eh值区间 (106)

2. 水溶液化学成分的一些组分对铀自地下水中
开始沉淀的Eh值的影响 (117)

3. 铀从层间水中沉淀时氧化-还原条件的一般
区间 (121)

第五章 沉积岩中的有机物与矿物组分在形成

还原地球化学环境中的作用 (127)

1. 水与岩石和矿物化学平衡的

Eh和pH的测定方法 (128)

2. 铀矿石的Eh-pH值 (138)

3. 地沥青与含地沥青岩石的还原能力 (140)

4. 煤与含煤岩石的还原能力 (145)

5. 未富集有机物的含铁矿物与岩石的还原能力 (149)

6. 以铀石矿化为主的地段的岩石特性 (159)

第六章 地下水中铀的价态改变与不改变时

其沉淀作用之间的关系 (163)

1. 泥炭的吸附能力与还原能力 (166)

2. 含矿泥炭田分布的规律性与保存条件 (175)

3. 煤沉淀铀的过程中还原与吸附的关系····· (177)
4. 地沥青对铀的吸附与还原····· (182)

第七章 生物化学作用对水文地球化学分带和

后生成矿作用的影响····· (192)

1. 微生物在层间褐铁矿化带尖灭处还原地球化学
环境形成过程中的作用····· (193)
2. 微生物在含铀矿化的碳酸盐含油水层水文地球
化学特点形成过程中的作用····· (203)
3. 在油气层上方还原环境形成中生物气体的
作用····· (210)

第八章 气态还原剂对后生矿化作用与控矿

围岩分带形成的影响····· (220)

1. 硫化氢沉淀铀····· (220)
2. 氢沉淀铀····· (225)
3. 气态还原剂对还原地球化学障衬度的影响····· (232)

第九章 层间含水层中铁、地沥青、煤、铀、钼、

硒和硫氧化-还原平衡的数量关系····· (241)

1. 层间含水层中铁、有机物和铀的氧化-还原
平衡关系····· (242)
2. 还原地球化学障中钼的硫化物与自然硒沉淀
的条件····· (251)
3. 自然硫的生成····· (258)

结束语····· (261)

第一章 研究对象与研究方法

众所周知，在地质科学研究中分析复杂的天然系统时，原则上可以采用两种方法：基础的（理论的）研究方法和经验的研究方法。前者使用的是基础科学的法则和规律性以及与之有关的数学处理；后者是以地质研究固有的方法为基础，即用不同比例尺的填图和编录来确定地质建造的生成顺序及其相互的空间关系。这两种方法各有优缺点。

在理论体系中，所规定的基本前提和概念越简单，就越能更深入地从原则上解释引出的逻辑（定性的）和数学（定量的）结论的物理意义。然而，这样的方法要求考虑由地质体的复杂结构所决定的全部细节及其相互联系，并要求配有相应的复杂的分析设备。这就不得不在研究中对实际系统大大加以简化，并用十分粗略的模式予以取代。鉴于所指出的这些客观上的困难，所以在地质研究中采用了其“真实”物理意义尚很不确切的复杂的原始概念。除此之外，由于一部份地质人员认为地质编录和填图是研究地质体的唯一客观方法，所以还应特别强调指出，在地质编录中存在着不可避免的主观性，因为任何观察都与我们的知识水平有关（“我只能看到我所知道的”）。

然而，从实际观点出发，利用复杂的原始概念具有重大的优越性。这是因为分析定性和定量关系的处置方法简单。如果考虑到自然界的基本定律也同样可以用经验方法予以确定，那么就可以期望这里所说的复杂的原始概念也能用定量

关系来表述, 虽然是利用简单的数学方法描述复杂的系统, 但所得到的定量关系在实际上具有与基础科学中那些方程式相似的重要性质 (帕利姆, 1967)。

在经验分析中, 唯一可能的是建立成因理论的方法。众所周知, 建立这种理论就意味着要同时定出实验检查的准则。实验被认为是真实性的判据, 通过实验能够对这种或那种经验性的相互联系的总和进行检验。

由于能够作直接的地质实验的只是一些范围相当狭小的局部地质现象, 所以用非地质方法来检验地质研究的结论是十分必要的。以地质方法本身为基础所得到的结论, 在任何条件下都不应与更为基本的学科在基础研究中确立的自然界的基本法则和规律性, 首先是经典热力学的结论相矛盾。按照 A. 爱因斯坦(1965)的观点。我们应当确信经典热力学的结论, 在其基本观点适用的范围内, 是永远不会被推翻的。

在进行水文地球化学研究时, 作者力求把上述地质的和物理化学的研究方法结合起来, 经常地修正基本的地质概念, 并用物理化学方法检查从地质建造的时间空间关系中引伸出来的结论。

1. “外生后成矿床” 概念的含义

有用矿床一般相对地分为同生的和后生的及内生的和外生的。

同生的金属富集是在岩石形成的过程中生成的, 在尔后的改造过程中没有实质性的物质搬运。后生的金属富集是在沉积物或岩石中由地下水把物质携入和大量携出后生成的。这时, 物质可能是从其它岩石组合、相带、地质建造被携

入的。沉积岩的后生蚀变与相应矿物可能叠加在未蚀变的沉积物和沉积岩石上，也可能叠加在受到某种程度变质影响的岩石上。在后一种情况下，沉积岩的后生变化在区域性初期变质蚀变作用的背景上局部显露出来。

在沉积岩中自生矿化的后生性质可以根据一系列标志确定。由于研究对象的具体特点和欲进行工作的详细程度不同，可利用不同的标志组合（佩列利曼，1959；斯特拉霍夫，1960；戈洛文，1965，1968；利西秦等，1969）。矿物后生成因的标志是：它们与沉积后断裂和褶皱构造有联系；自生矿物的生成受岩石渗透性控制；自生矿物组合（和金属富集）变化的梯度与沉积相变化的不一致（“非相性”）；在相的沉积条件与自生矿化之间存在着地球化学矛盾；矿物共生组合中存在着后生分带性（由于所在地段的水文地质条件不同，这种分带性可能具有层状、层状-裂隙及裂隙等形态特征）。

根据金属矿化叠加于沉积生成物上的上述标志，本著作中讨论的铀矿床是属于后生的。

如果根据每个具体矿床的研究结果，能够十分肯定地把同生和后生的金属富集区分开，那么在进一步的研究中将会看到，划分外生和内生矿石的标准在很大程度上仍然是相对的和附有条件的。

习惯上认为在地表因素影响下形成的地球化学产物是外生的。由于使地表因素的影响扩展到岩石圈内部的动力是地下水，因此可把全部矿物和有机生成物，以及在外生水参加下形成的矿床都列入外生类型。外生水或是在沉积时，或是在岩石形成之后，从水圈和大气圈进入岩石。前者是沉积水，后者是渗透水。

与外生矿床相区别，凡在深部因素影响下形成的矿床是

内生的。按类推法，与外生水相反，原生水则是通过各种化学反应形成于地球深部的岩石中、岩浆源以及地壳之下的地幔中(?) (杰根斯, 1967; 卡尔切夫等, 1969)。

在研究成矿作用的水文地球化学时，按水的成因类型来区分内生和外生矿床是合理的。然而采用这个原则同采用其它原则一样，这样的划分仍然是相对的和有条件的。

在岩石圈发生的地球化学过程中，同时表现有内生和外生因素的直接或间接的影响。所以，能够确切划分出来的只是那样一些矿床，即：一种是按照矿床的特点可以判断它们主要是在某一组因素(外生或内生)影响下生成的；另一种是它们生成时两组因素(外生和内生)的影响大体相当。现以外生水的温度为例加以说明。

超过当地年平均气温的水温、通常是由内生原因引起的。A. M. 奥符钦尼科夫(1963)建议把温度超过当地年平均气温的水称为相对热水，而把温度超过地球最高年平均气温的水($>34-35^{\circ}\text{C}$)称为绝对热水。因此，外生水在不超过三五百米的深度就可能获得内生的温度。微生物的地质活动是岩石圈外生作用特有的表现。生物作用的影响是如此的重要，以致于普遍认为必须划分出地壳生物圈，在这里生物活动的影响是主导的地球化学因素。然而，对大部分具有生理特点的微生物的发展来说，相当于上述地下水外生和内生温度界限的温度是最佳温度。至于喜热菌只是在温度高于 55°C 时发育较好，并在温度达到 $75-80^{\circ}\text{C}$ 时发育较弱(库兹涅佐夫等, 1962)。

在把整个现代生物圈中的作用都认为是外生的时候，我们应把外生水的温度上限提高到 $75-80^{\circ}\text{C}$ 。

B. Л. 波克罗夫斯基(1961)按等温线 $+100^{\circ}\text{C}$ 划定生

物圈的下界时，认为在地质上(波罗的海和乌克兰)把它延伸到10—15公里是可能的，在俄罗斯地台可到3.2—5.5公里，而在年轻的阿尔卑斯拗陷则到1.5—2公里。平均起来，按B. П. 波克罗夫斯基的资料，生物圈的界限可能下降到4公里的深度。

在自身成份中保留着生物成因和非生物成因外生作用产物的时候，外生渗透水，特别是沉积水的温度可能超过100℃。例如，已知在伴有沉积成因的，因而也是第一周期水交替的外生水的含铀岩石中，在3—4公里深度的地方查明温度达150℃或更高。这样温度的水在第聂泊—顿涅茨盆地、前高加索、阿塞拜疆和苏联其它地区以及国外都有发现。如在前高加索东部捷列克河左岸的加柳加叶夫斯卡娅镇，1号钻孔在5300—5400米深的下白垩系含石膏的灰岩中，揭露到温度为179—181℃的硫化氢卤水(谢尔巴科夫，1968)。

在杨甘套山中(巴什基里亚)有机物质被空气中的氧氧化时产生的外生热液源在热异常中心产生的温度达375℃，沿剖面向上和向下减少到25℃和更低(什提里马尔克，1960)。

所有这些表明，仅生成温度高不能作为肯定金属富集内生成因的可靠证明，尽管在一系列情况下，成矿溶液和矿物的内生成因是可以准确无误地予以确定。但是对于大部分中温、特别是低温热液矿床来说，很难设想它们只可能是内生成因。在远离地表和主要热源的地方，从统计学上看这些矿床很可能属混合类型，即“杂种”。迄今在暂时还缺乏关于成矿物质的内生或外生来源的确切资料 and 不能做到定量估计成矿过程中两组因素的作用的情况下，把内生和外生矿床截然对立是没有多大意义的。因此，研究这两组因素在每个具体矿床和以相近特点结合起来的每组矿床形成的影响显得更为

重要。

上述的观点并不新鲜。它是根据现代水文地质学和地球化学的基本理论提出来的,并与A. A. 萨乌科夫(1961)的见解相一致。他建议消除表生作用与热液作用研究之间存在的脱节现象。另外,他提出的关于“热液的”和“岩浆的”概念是同义词这个颇有争论的观点,也被教科书和科技文献所广泛引用。A. И. 格尔曼诺夫(1953), Ф. В. 丘赫罗夫(1964), В. И. 斯米尔诺夫(1968, 1970)注意到在热液成矿作用中有外生地下水的参与。A. И. 佩列利曼(1968)实质上发展了这种看法,他把热液作用带的上部看成是生物圈产物向深部的延伸;而外生作用和岩浆作用的界限则包含在热液带内部。

在承认外生和内生矿床之间的界线是有条件的前提下,作者按照有外生渗透水参与成矿的特点以及其位置是在由实际上并未变质的沉积岩组成的地壳表层,把下面将研究的一组铀的后生富集现象划为外生的。

2. 自流水盆地构造中外生后成 铀富集的地质-水文地质条件

所有类型的地下水——包气带水、潜水和承压水都参与外生后成矿作用。但是,在具有实际价值的矿物堆积的形成中每类地下水参加的份额对不同的化学元素和成矿类型是不同的。与风化壳有联系的矿床主要是由包气带水和潜水形成的。在此情况下,把当地含水岩石作为成矿物质的来源有很大意义,因为在受到化学风化时能够产生难溶于渗透水的表生矿物的残余富集。某些铝、镍及其它元素的矿床可作为这一类

型的实例。

属于潜水形成的后生富集可能有泥炭和煤中锆和铍的堆积，以及泥炭田中的铀（科切诺夫等，1965；利西秦等，1967等）。

最后，层间水形成的外生后成富集已经具有越来越大的意义。除人们很熟悉的硫矿床以外（索科洛夫，1959；尤什金，1968等），属于这类矿床的还有在本书中讨论的后生铀矿床（巴图林等，1965；布拉托夫、谢托奇金，1970等），有时伴有硒、钒、钼、还可能有一些铜及其它金属的矿床（格尔曼诺夫，1961；佩列利曼、鲍里先科，1962等）也属于这一类型。

一般来说，外生后成工业铀矿床是由层间水形成的。潜水大多形成铀的呈矿现象，而包气带水仅形成具矿物学意义的铀矿化（利西秦，1966）。

书中援引的自流水盆地的综合剖面（图1）提供了关于在沉积盖层中存在后生铀矿床的地质-水文地质背景的直观图象。

不能把这张示意图看成是沉积盆地或自流水盆地的某一具体剖面，剖面上只是概括地表示了作者所研究的处于一般自流水盆地构造之中的某些具体矿床的结构。综合剖面展示了所研究的铀富集地质-水文地质条件的变异情况，它几乎包括了欲研究类型的各种矿床，下面将提供有关这些矿床成矿过程的水文地球化学资料。

在上述综合剖面中可以清楚地看到，所研究的铀矿床都产于靠近地下水主要渗透区自流水盆地两翼范围内的含水层中。铀的聚积与具有层状特点的氧化带的尖灭有空间联系。层间氧化带则是从含水层的渗透区和承压区发展起来的。这

