

铀矿床地球化学探矿方法

一九七四年四月廿五日

原子能出版社

本书原名为：“在普查与勘探热液铀矿床时对铀及其伴生元素分散量的应用”，副题为：“方法指南”。为简便起见改为“铀矿床地球化学探矿方法”。

铀及其伴生元素的分散量及分散流，是评价面积和地段有无远景的重要地球化学标志。本书着重描述了热液铀矿体围岩中及其上覆疏松层中铀及其伴生元素的分布规律；指出了应用地球化学方法的可能性、它的作用和地位；阐述了查明铀及其伴生元素的原生量和次生量的工作方法。

本书适用于地质人员、地球化学工作者以及高等院校师生参考。

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ КОМИТЕТ СССР
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОРЕЛОВ РАССЕЯНИЯ УРАНА
И ЭЛЕМЕНТОВ-СПУТНИКОВ ПРИ ПОИСКАХ И РАЗВЕДКЕ
ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
(Методическое руководство)
ИЗДАТЕЛЬСТВО “НЕДРА”
МОСКВА 1964

* * *

铀矿床地球化学探矿方法
刘俊生 田 玉 王瑞宝 朱觉人 译
周 雷 庭 校

*

原子能出版社出版
中国建筑工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行
(只限国内发行)

*

开本 787×1092 1/16 · 印张 9 11/16 · 字数 190 千字
1973年12月北京第一版 · 1973年12月北京第一次印刷
印数 001—4,500 · 定价：1.20元
统一书号：15175·008

原 序

三十年前, H. И. 萨弗罗诺夫提出了矿床的分散晕的概念。这一概念对地质普查工作起了极其有效的影响, 并获得了日益广泛的意义。根据矿床的分散晕和分散流的概念, 创立了现代地球化学普查方法, 并且这些方法正顺利地向前发展。在上述概念的基础上, 一些老的地质普查方法, 如河川岩屑法、重砂法和冰川漂砾法, 都取得了新的、更为完善的解释。

对分散过程的概念进行综合分析, 可以更深入地讨论某些物探普查方法(与研究自然电场、热场及放射场有关)的地质基础。对航空和地面放射性测量的结果所进行的分析表明, 用这些方法发现的绝大多数矿床都是通过发现放射性矿床的次生机械晕、盐晕及气体分散晕找到的。

不久以前, 地球化学普查方法的主要应用形式还是大家所熟知的金属量测量, 它用于从地表发现主要贵重元素矿床的次生分散晕和分散流。在苏联和其他国家的不同地区, 已用这种方法发现了一系列有色金属、稀有金属的工业矿床和金矿。这证明该方法具有很高的地质效果。用伴生元素来找矿的地球化学普查方法以及普查隐伏和掩埋矿床的方法, 在最近时期内得到了发展。目前所积累的经验已经证明, 在该领域内尚存在着有效应用地球化学方法的广泛可能性。

在很多地区均已证实, 根据相应的分散晕普查矿床是适宜的: 如根据砷和铜的分散晕普查金矿, 根据汞的分散晕普查铅锌矿, 以及根据锂的分散晕普查稀散元素矿床等。在有利的地质条件下, 根据原生晕, 首先是根据活泼伴生元素(As、Hg、Tl、I、F、B、Li等)的原生晕发现地表以下300~400米处隐伏矿体的可能性, 已被许多实验和所发现的工业矿床所证实。

由于可以根据被掩埋的次生分散晕普查矿床, 因而在覆盖地区发现难找矿床的可能性大大地增加了。地球化学研究方法的所有这些新的应用领域, 无疑应该应用于普查铀矿, 而且目前已经找到了铀矿。

本书论述普查和勘探热液型铀矿床时地球化学方法的应用问题。本书对各位作者数年来的研究工作作了初步总结。

本书中所论述的地球化学普查方法, 应理解为对岩石中铀及其伴生元素进行分析的岩石化学研究(金属量测量)。把研究镭及其他放射性元素分布的所有放射性测量方法均列为地球化学方法可能更正确一些, 但习惯上它们都列为物探方法。毫无疑问, 随着能直接在测点上测定化学元素含量的新型物探仪器的出现(如类似于现有的能分别测定放射性元素的辐射仪、测铀仪、测硼仪等), 地球化学普查方法的作用将日益增大。

岩石化学方法在应用于普查铀矿方面的生产经验尚不多。但是现有的资料已经证明, 应用各种专门地球化学研究方法去解决某些普查勘探问题是适宜的。

应该认为, 在内生铀矿体的围岩中铀及其标型伴生元素(铅、钼等)的原生分散晕有广泛的发育。这些分散晕通常都具有带状构造。在隐伏矿体之上, 如果其原生晕达到剥蚀

目 录

原 序

绪论	1
第一章 热液铀矿床的矿体和原生晕	3
1) 铀矿体的地球化学和地质学特征	3
2) 原生晕的一般概念及其成因问题	7
3) 铀矿体周围原生晕的特征	10
4) 原生晕中元素的分布及其分带性	24
5) 原生晕与近矿围岩蚀变的关系	33
第二章 次生晕和分散流	36
1) 次生分散晕	36
2) 分散流	48
第三章 野外和实验室研究的方法与技术	58
1) 方法试验	58
2) 基岩取样	67
3) 风化壳取样	72
4) 残积-坡积层取样	73
5) 冲积层取样	79
6) 实验室研究	86
第四章 地球化学方法在普查隐伏矿体时的应用	91
1) 圈定远景地区	91
2) 个别地段的远景评价	92
3) 在已探明和开采的铀矿床上寻找新的隐伏矿体	96
第五章 在评价放射性异常和铀矿点时伴生元素的应用	101
1) 区分与铀的蒸发和淋滤富集有关的异常	101
2) 矿化评价	105
第六章 地球化学方法在综合找矿工作中的应用	110
1) 地形切割剧烈的高山区的普查工作	110
2) 潮湿带中山区的普查工作	112
3) 干旱带准平原区的普查工作	113
4) 在地质勘探工作的不同阶段中地球化学方法所能解决的问题	116
结论	117
附录	
附录 1 送样清单格式	119

IV

附录 2	金属量测量样品取样编录用野外手册格式.....	119
附录 3	冲积层取样编录用野外手册格式.....	119
附录 4	铀量测量实验室的主要设备和材料一览表.....	120
附录 5	光谱分析用的主要设备和材料一览表.....	121
附录 6	铀和多金属矿床的典型地球化学分散晕.....	122
参考文献		146

绪 论

铀矿普查通常是用各种放射性测量方法进行的。普查中所使用的放射性测量仪器能够在地表上测出甚至不太高的 γ 强度,并能圈定 γ 异常。但是,要对所发现的 γ 异常和铀矿点进行评价,在很多情况下是极困难的。用勘探工程对最有远景的 γ 异常和矿点进行检查的结果表明,远非全部异常都是由工业铀矿体造成的。因此,最好能创立一些有效的方法,使之既能对所发现的异常的远景进行评价,又能从铀矿点中区分出可能具有工业意义的矿点。这是极其重要的。

根据方法研究和以后的试验性生产的验证资料得知,在许多情况下某些化学元素的分散晕对 γ 异常和铀矿点的远景评价具有决定性的意义。因此,能发现这些元素晕圈的地球化学方法即属上述所指的方法。

铀及其伴生元素的分散晕及分散流,是评价面积和地段远景的重要地球化学标志,因为根据它们有可能在其界限内发现地表没有露头的热液型铀矿床和矿体。

本书仅论述岩石化学普查方法(金属量测量方法),因为有关文献已对其他方法(水文地球化学方法及生物地球化学方法)作了详述。

根据通用的术语,地表无露头的矿床和矿体可分:隐伏、掩埋和隐伏-掩埋三类(赫鲁绍夫,1961)。未被现代侵蚀面所揭露、全部赋存于围岩中的称为隐伏矿床或矿体。被古侵蚀面所揭露、而后又被较年轻地层所掩埋的称为掩埋矿床。产于被较年轻岩层所覆盖的古侵蚀面以下的称为隐伏-掩埋矿床。

对于用分散晕普查隐伏矿床和矿体来说,其原生晕被侵蚀揭露且被厚度不大的现代残积-坡积层所覆盖最为有利。查明被大厚度(数十米或更厚)外来盖层所掩埋的矿床上的元素分散晕是十分困难的,要求专门的技术工具来深入至覆盖岩层的内部。

在基岩和疏松层中,铀及其伴生元素的分散晕和分散流可以用来作为解决下列问题时的重要地球化学标志:

- 1) 在普查区内划定有利于发现隐伏的和弱侵蚀的热液铀矿床的远景地段。
- 2) 评价已查明的放射性异常和铀呈矿点的含矿远景。
- 3) 在铀矿床的翼部和正在勘探的矿点上普查新的隐伏矿体并评价矿床深部层位的含矿远景。

近年来,在一些地区,根据有利标志(其中包括铀及其伴生元素的分散晕)的存在划定了远景地段并完成了大量的勘探工作。在许多情况下,当评价这些地段的远景时,有关伴生元素分散晕的资料起着决定性的作用,尤其是在根据 γ 异常和其他地质标志得不出结果的情况下。

所进行的工作结果表明,在先前发现 γ 异常的一系列勘探地段中发现了隐伏铀矿体,其埋藏深度从40~80至150米,而在某地甚至距地表的埋深达270米。由此可见,普查勘探工作的实践证实了地球化学方法的有效性。

但是,在用山地工程检查地球化学异常时,并非经常都能发现工业矿体。在某些情况

下只是确定了没有实际价值的铀矿化作用。有时铀及其伴生元素的分散晕很明显，但发现的是含有非工业铀矿化的多金属矿体。根据分散晕错误评价个别地段含铀远景性的这些实例说明，必须配合其他方法（首先是地质方法）来使用地球化学方法。进行勘探工作的结果，远不是每个矿点都能成为工业矿床，每个地球化学异常也并不是相当于深部的一个铀矿体。

一些方向性的任务和问题尚有待解决，其中某些问题仅仅确定了解决的途径。但是，现在已经有必要来汇总在一系列地区内进行方法试验时所积累的资料，并总结在普查勘探工作实践中应用地球化学方法的经验。

本书的目的是为了：

1) 描述热液铀矿体围岩中及其上覆疏松层中铀及其伴生元素的分布规律。这个规律是普查和勘探铀矿床时采用地球化学方法的基础。

2) 在解决上述问题时，指出应用地球化学方法的可能性、作用和地位。

3) 描述查明铀及其伴生元素的原生晕和次生晕的工作方法。

本书对铀矿体周围的铀及其伴生元素分散晕的现有资料作了初步总结的尝试，以作为应用地球化学方法普查铀矿床的基础。同时，作者认为，本书难免有欠妥之处，请读者指正。

第一章 热液铀矿床的矿体和原生晕

1. 铀矿体的地球化学和地质学特征

应用地球化学普查方法，要以了解矿石的化学成分为前提。研究工作表明，矿体周围原生晕的元素成分与矿体的元素成分相符。因此，知道了矿石的化学成分，就可以判断原生晕的元素成分。能够说明矿体化学成分的最有代表性的样品是从每一个矿床选出的工艺样品。这种样品的分析资料在储量计算时对于说明矿石中有害组分和有用组分的存在是非常必须的。

工艺样品的重量从数吨至10~15吨以上。这种样品是从地下坑道中选取的，并能代表已知矿床的典型矿石。对样品要进行硅酸盐全分析，以及化学分析和光谱分析。为了比较各类型岩浆期后矿床的元素成分，我们收集了苏联100个矿床的工艺样品分析资料。这些矿床包括分布在各地区的几个热液矿床、22个多金属矿床，以及一系列铜-钼、钼-钨、铜-铋、硫化物-锡石、镍-钴、金和铋-汞矿床。

对比大量矿床的资料，可以确定各种类型矿床矿石化学成分的共同点和相异点，并查明仅代表铀矿床的一些特点。为便于比较和图解说明，把以重量百分比为单位的元素含量换算成A.E.费尔斯曼(1934)所提出的浓度系数 $\bullet$ 。主要金属元素的克拉克值列于表1。

表1 岩石圈中金属元素的克拉克值(两份酸性岩+一份基性岩)
(以重量百分比表示)(按A.П.维诺格拉多夫, 1962)

元 素	克 拉 克 值	元 素	克 拉 克 值	元 素	克 拉 克 值
硫	4.7×10^{-2}	铅	1.6×10^{-3}	铋	9×10^{-7}
铜	4.7×10^{-3}	砷	1.7×10^{-4}	银	7×10^{-6}
镍	5.8×10^{-3}	钼	1.1×10^{-4}	钨	2.5×10^{-5}
锌	1.3×10^{-3}	钨	1.3×10^{-4}	汞	2.3×10^{-6}
锡	2.5×10^{-4}	镉	7×10^{-6}	铊	1×10^{-7}
钴	1.8×10^{-3}	铊	5×10^{-5}	金	4.3×10^{-7}

按A.E.费尔斯曼(1934)的分类，表1中所列举的元素是岩浆期后的主要元素。此表未列入铁、铀、氟和硒。铁未作研究是由于铁在各矿床围岩中的品位相当高且变化剧烈。仅对铀矿床样品中的铀作了分析。对氟和硒的工艺样品只作了少量的分析。由于已经把以百分数表示的元素重量含量换算成浓度系数 $\bullet$ ，因此，对一切元素可用相同的六个区间来表示系数值。此六个区间为：小于1、1~3、3~10、10~30、30~100、大于100。

反映矿石中元素组合的矿床物质成分特征构成了元素的地球化学谱。

$\bullet$ 浓度系数——矿石中元素的平均品位与地壳中元素克拉克值的比值。

$\bullet$ 如果一个矿床具有几个工艺样品分析的资料，则计算每一元素的平均品位。取自氧化带的样品未参加计算。

矿床的地球化学谱是指以元素浓度单位表示的矿石物质成分特征，它们按元素克拉克值的递减次序排列。将同一建造的几个矿床（金、铀等矿床）的地球化学谱集中起来，就有可能获得该建造的组合谱。图1列出了8个不同含矿建造的地球化学组合谱。含量谱的纵坐标表示同一组中的矿床数与其总数的百分比。

按А.Е.费尔斯曼的术语，在一个建造的大部分矿床中浓度为100倍克拉克值或更高的元素称为主导（ведущий）元素。分布普遍、浓度为10~100倍克拉克值的元素称为特征（характерный）元素。浓度增高（10以上）或浓度高（100以上）的元素若仅见于一个建造中的少量已知矿床，则可看作非典型元素，这些元素可能与成矿作用的多阶段性有关。显然，钨属于这种元素。在铀矿床所有样品中，只有一个样品的钨含量很高。镭也只有一个含钨量极高的工艺样品中发现。

研究不同矿床的各种地球化学谱和含矿建造的组合谱（图1）之后，可以得出下列结论：

1) 在所研究的100个矿床中，没有一个属单元素矿床。除了造成矿床主要经济价值的主要金属元素（它们的浓度系数从数百到数千）外，经常还能见到其他的主导元素。它们的数量在不同建造中有所不同，变化范围从6~12。

2) 根据元素在含量谱中的分布情况，可将元素分成三组：

(1) 分布普遍的“穿透性”元素，它们在各种建造的矿床中含量都增高。属于这一组的元素有银、铜、砷、铅和锌——热液成矿作用最典型的元素。这些元素在矿石中含量的增高看来与矿床形成时的温度和压力无关。

(2) 较不普遍的元素，它们只在某几个建造的矿床中出现。这些元素有钼、金、钨、铋和锑。随着矿床形成温度的增高，矿体中铋含量显著增高，而锑含量则降低。

(3) 局限分布的元素，它们只见于个别含矿建造的矿体中。镍和钴的高含量的局限分布表现得最为明显。这两种元素在大多数建造的矿床中不是根本没有，就是含量高达10倍克拉克值。属于该组的元素还有锡和铀。

从地球化学谱（图1）看出，铀矿床和多金属矿床的矿体在元素成分方面极为相似，关于这些矿体的特征下面将详细研究。

在表2中，有18种元素的分布比较广泛，它们以不同的含量存在于所有八种建造的矿石中（图1）。除了这18种元素外，还有8种元素的增高含量见于铀矿床的矿石中。按元素在矿体中出现的频率（根据工艺样品分析资料），将所有元素分为四组。此外，还标明了每种元素浓度系数的变化范围。对表2进行研究之后，可以对前述有关含矿建造地球化学谱的结论作出许多补充。

1) 铅和钼在铀矿体中的含量通常较高。因此可以认为在铀矿体周围正是这两种元素的原生晕发育相当广泛。按分布情况钼亦列入此组，但它的浓度系数较低。钼的存在显然直接与沥青铀矿有关，因为在沥青铀矿中发现钼含量的增高（达0.02%）。

2) 按分布情况属于第二组的元素有砷、锌、铜和银。这些元素和铅一样，也是许多建造的大多数热液矿床中的典型“穿透性”元素（图1）。

3) 第二组中的其他元素（V、Y、Sc、Ga）在矿体中的含量不高，因而没有特殊理由可以认为这些元素会形成规模较大的原生晕。可用同样的道理估价钒、铍和锆的作用。

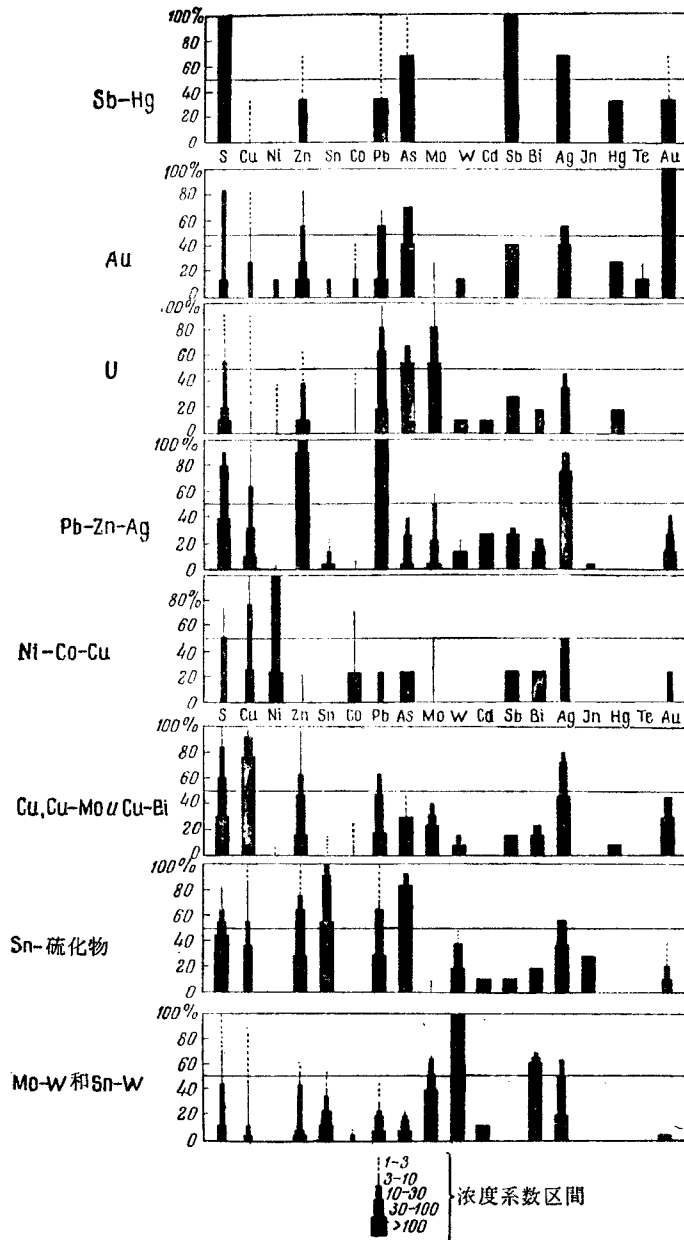


图 1 根据工艺样品分析资料获得的热液矿床矿体的地球化学谱
(按 O.Д.高尔布诺布和 H.Н.索契万诺夫)

表 2 铀矿床和多金属矿床矿石中, 元素含量增高的分布情况 (与矿床总数的百分比)
和浓度系数 (根据工艺样品的化学分析和光谱分析资料)

肯定存在的元素 (100%矿床)			经常出现的元素 (60~90%矿床)			非典型元素 (30~59%矿床)			较少出现的元素 (10~29%矿床)		
元素	分布的 百分数	浓度系数	元素	分布的 百分数	浓度系数	元素	分布的 百分数	浓度系数	元素	分布的 百分数	浓度系数
1. 铀矿体											
U	100	>100	Cu	90	2~15	Ag	50	20~100	Hg	20 ³⁾	30~1500
Pb	100	10~250	As	70	10~2000	Co	50 ²⁾	1~10	Tl	10 ⁶⁾	60
Mo	100	3~1500	Zn	70	2~200	Sb	30 ³⁾	250	Be	20	2~20
Yb	100	3~30	V	70 ¹⁾	3~10	Cr	30 ⁴⁾	2~6	Bi	20 ⁵⁾	3~100
			Y	70	3	Ni	30 ⁴⁾	2~10	Zr	20	3~10
			Sc	60	2~30	La	30 ⁶⁾	1~5	Cd	10	200
			Ga	60	1~5				W	10 ⁸⁾	1000
2. 多金属矿体 ⁹⁾											
Pb	100	500~5000	Ag	95	30~1000	Au	70 ⁷⁾	10~1000			
Zn	100	30~2400	Cu	90	2~150	As	40 ⁷⁾	3~1200	W	20	6~500
			Mo	60	3~2000	Sb	35 ⁵⁾	10~10000	Co	15	1~6
						Sn	30	2~200			
						Cd	30 ⁷⁾	3~2000			
						Bi	25 ⁷⁾	3~3000			

1)在其余30%的矿床中, 矿石中钒含量低于克拉克值。

2)在40%矿床中, 钴含量低于克拉克值。

3)铈和汞增高的含量只见于低温铀矿床矿体中。

4)铈和镍增高的含量见于基性岩岩墙发育的矿床中。在50%的矿床中, 镍含量低于克拉克值。

5)被分析的样品并非取自所有的矿床。

6)它是一个出现铈矿化的矿床的典型元素。

7)在20%的矿床中, 金、砷、铋和镉的含量低于克拉克值。

8)仅见于一个样品, 在其他样品中未见。

9)缺少关于在多金属矿床矿石样品中的铀含量资料。

4)汞、铋和铈仅见于低温铀矿床的矿石中●。

5)在矿床附近有基性岩岩墙时, 铬、镍和钴在矿体中的含量增高。因而, 在这里, 我们可以认为这些元素在矿石中含量的略微增高是由岩墙引起的, 因为这些岩墙往往富含铬、镍和钴。

6)锡和金未见于铀矿床的矿石中。在大多数情况下, 锡和金的含量低于岩石圈的克拉克值。但是, 这两种元素在许多多金属矿床中的含量却有增高的现象。

7)在多金属矿床的矿体中, 铅的浓度系数比在铀矿体中高20~50倍, 而铋和铜则高出一个数量级。但是, 钼在多金属矿床中的含量比在铀矿床中的为低(图1)。

我们所研究的热液铀矿床属于多矿化阶段的铀矿床, 它与其他建造的铀矿床的不同之处是, 沥青铀矿阶段的矿物数量多于沥青铀矿前、后各矿化阶段的矿物数量。这些矿床的矿石成分最常见的有沥青铀矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿和辉钼矿; 较少见的有黄铜矿、毒砂、黝铜矿; 极少见的有辉银矿、辉钴矿等。与沥青铀矿共生的主要硫化物为黄铁矿、

● 对于克拉克值极低的汞, 只有采用高灵敏度的分析方法才能查明其分布的广泛性。

方铅矿、辉钼矿，而非金属矿物中除方解石外，还有暗色萤石、绢云母、石英和钠长石。在其他矿化阶段的脉石矿物中，最普遍的为石英，较少的为绿泥石、重晶石、铁白云石和方解石。

被研究的铀矿床矿体按其产状条件和形状可分成两组。第一组包括产于构造裂隙和裂隙带中的脉状急倾斜矿体。这些矿体的规模沿走向和倾向约为10~30米至100~300米，厚度从10~30厘米到1~2米或更厚。第二组既包括急倾斜的，也包括缓倾斜网状脉矿体，其中造矿矿物呈网状脉分布。矿体受急倾斜构造断裂的控制，水平横断面从数十平方米到数千平方米。无论是脉状矿体或网状脉矿体都没有明显的轮廓，矿石逐渐过渡为围岩。

含矿构造裂隙和裂隙带有的延伸至表面，有的未延伸至表面即分裂而尖灭。在后一种情况下，形成了未出露于基岩表面的隐伏矿体。

被研究矿床的围岩是花岗斑岩、花岗正长斑岩、安山玢岩、片岩、酸性喷发岩和火山碎屑岩——石英斑岩、霏细斑岩及其凝灰岩和凝灰熔岩。近矿围岩蚀变主要为硅化、绢云母化、钠长石化和红化（赤铁矿化）。在产于石英斑岩和石英斑岩凝灰岩中的矿体周围，除了上述现象外，还广泛发育有黄铁矿化和岩石褪色。

在大多数被研究的热液矿床中，氧化带发育微弱，甚至象沥青铀矿那样的矿物也常见于地表。在这些条件下，基岩中化学元素的原生晕没有发生与表生作用有关的本质变化。

2. 原生晕的一般概念及其成因问题

原生（内生）晕是围绕着矿体的含矿围岩带。在成矿作用过程中，一些组成矿体成分的化学元素进入该带而使其中的含量增高。原生晕在成因上与近矿围岩蚀变密切相关，并成为整个成矿过程的一个部分。在近矿围岩蚀变和原生晕之间仅有形式上的差别。

在形成蚀变岩石带时，造岩矿物中化学元素的带出、携出和重新分配会使岩石的矿物成分和化学成分发生本质的变化，但原生晕的形成只与造矿元素的进入围岩有关。蚀变岩石带一般是肉眼可见的物体，而原生晕却只有通过化学分析和光谱分析才能查明。

在这同时，一些近矿围岩蚀变也可能就是某些元素的原生晕。例如，由热液带入的硫和从围岩中取代的铁所产生的岩石黄铁矿化就是硫的原生晕，电气石化与硼晕相应，如此等等。

相对于元素在岩石中的原始含量，原生晕是这些元素的含量异常带。取不受近矿变质影响同类岩石中最常见的原始含量作为元素的地球化学本底（ φ ）^①。由于在不同地区中和成分不同的岩石中元素的含量并不相同，有时与克拉克值甚至有很大的差别，因此，对于不同岩性的地区，要个别地确定每种元素的地球化学本底。

前面已经说过，原生晕的形成与在热水溶液作用下造矿元素的进入围岩有关，而矿体本身也是从热水溶液中形成的。因此，原生晕的某些参数，例如原生晕的成分、元素含量与矿体的矿物学特征以及地球化学特征有着密切的关系。

在研究元素分布时，可以看到，随着远离矿体或导矿构造断裂，造矿元素在围岩中的含量也逐渐减少。这说明，原生晕是由元素的迁移形成的。以地质现象为基础的物理化学作用的理论证明，在热液成矿作用的条件下，元素在岩石中的迁移可能通过扩散和渗透的

① 地球化学本底与元素含量频率分布曲线的众数相当。测定地球化学本底的方法和最小异常值见第三章。为方便起见，在以后各章节中地球化学本底一律用 φ 表示。

途径进行。

一般说来, 扩散作用可归纳为物质微粒(离子、原子、分子、胶体等)朝向其含量降低的方向迁移。迁移由微粒的热运动造成, 并且可能在固相、液相和气相中发生。如果微粒未经受外力作用, 则扩散作用可导致含量的均匀化和微粒对整个被研究空间的均匀充填。扩散作用的动力来源于化学势差。化学势差是指物质状态的一种特殊功能, 它概括了由浓度差(费克定律)、温度差(索雷原理)和压力差(利凯原理)影响所引起的扩散的各种特殊情况。化学势数字表达式的变量是系统中各组分的温度、压力和浓度。

渗透作用——这是液体和气体、也是真溶液和胶体溶液穿过孔隙介质的运动。溶液在岩石中可以沿相当大的裂隙自由循环, 也可以在压力的作用下沿彼此相连的孔隙和细小的裂隙运行。在后一种情况下, 当孔隙和细小裂隙小于 5×10^{-6} 厘米时, 便产生渗透效应。这种效应的实质是, 由于溶剂和被溶物质的运动速度不同, 一部分溶液组分停留下来, 使溶液变浓或沉淀在过滤层上。通过过滤层的被溶物质数量与达到过滤层的全部物质数量之比称为渗透系数。

渗透系数值通常小于1或等于1, 并与溶剂、被溶物质的成分以及过滤介质的性质有关。实验研究证明, 被过滤的水化离子的压力和半径的增大可导致渗透效应的增长, 而孔隙的直径、溶液的温度和浓度以及离子扩散系数的增大引起效应的降低, 渗透系数趋近于1(奥夫钦尼科夫, 1956)①。

由此可知, 两种作用的原则差别在于: 渗透时, 含矿组分随介质一同迁移并在介质中呈溶解或悬浮状态; 在扩散作用的情况下, 含矿物质的迁移在相对不运动的介质内部发生, 或从一个介质迁入另一介质。在自然环境的热液成矿作用条件下, 渗透作用和扩散作用往往共同进行和同时发生。因而把内生晕细分为扩散晕和渗透晕在相当大的程度上是不很确切的, 只能反映出其中哪一个占主导地位。

渗透和扩散作用在数学方面的描述并不太复杂。但是对于自然条件而言, 上面已经说过, 所有外部因素和内部因素对内生晕形成过程的影响不能定量估计, 因而原生晕中元素含量分布的理论计算只有在理想情况下才能完成。这一问题在P.И. 杜保夫的著作(1963)中作了叙述, 其中的主要结论可归纳如下。

对于在界面附近形成的扩散晕来说, 若某元素的浓度在该界面(例如裂隙壁)附近是一常数, 而在固相中远未达到饱和, 则该元素在晕中的分布由下式确定:

$$C_x = C_0 e^{-0.19 \sqrt{\frac{\kappa}{D}} x},$$

式中 C_0 ——界面上被研究相中的元素含量;

x ——至该界面的垂直距离;

C_x ——距界面为 x 远处的含量(已减去本底);

κ ——吸收系数, 它等于单位时间 t 内由单位体积液相中被固相所吸收的那部分物质的量($\kappa t > 10$);

D ——扩散系数。

在渗透作用形成的原生晕中, 无论是在液相中或固相内部含量的空间分布也服从于指

① 原文如此, 应该相反, 即增长应为降低, 降低应为增长。否则, 系数趋于1就无法解释——校者注。

数定律:

$$C_x = C_0 e^{-\lambda x},$$

式中 C_x ——距含量为 C_0 的点 (在同一相中) x 距离上的元素含量;

λ ——渗透作用中的吸收系数, 它表示单位长度上由吸附、沉淀以及其他因素所引起的浓度降低程度。吸收系数取决于裂隙度、孔隙度、溶液和岩石的化学活动性以及其它因素。

上述公式在理论上可用来解反演问题——测定了原生晕中足够数量上的元素含量之后, 即可以确定吸收系数和至矿体的距离。

按 A. E. 费尔斯曼的意见 (1934), 外界因素和内部因素对元素的内生迁移都有影响。外界因素包括压力、温度、溶液中元素的含量, 它们确定了整个系统的物理化学状态。内部因素是由元素本身的性质所确定的, 包括离子半径、比重、化合物的挥发性、络合物生成的能力和吸附性质等。

压力对于内生晕的形成有着特别重要的作用。对原生晕形状的研究, 以及对原生晕与矿体、蚀变岩石带和构造的空间关系的研究, 证实了关于含矿溶液上升活动的内生成矿现代理论原理的正确性。溶液从深部的高压 (由构造-岩浆作用所造成的) 区往近地表的低压区流动。矿体和矿体周围原生晕的形状受着有利于成矿堆积的结构构造所控制。例如, 陡倾斜矿体的原生晕沿垂直方向的延伸很大, 而垂直于矿带走向的规模则很有限。这一点可以用压力, 特别是压力梯度对溶液渗透的方向和速度的影响, 也就是对渗透作用的范围的影响来解释。

外压力还会影响水溶液中易挥发化合物的迁移。高压带中为这些化合物所饱和的溶液沿构造断裂迁移到低压的近地表带。在近地表带内, 二氧化碳、硫化氢和其他易挥发的化合物分离出去, 并通过气体渗透的途径使这些气体升华到矿体范围以外。

温度的变化无论对渗透作用或对扩散作用都有明显影响。大体说来, 温度升高, 元素的迁移能力也增大。在高温条件下, 溶液粘度降低, 从而溶液穿透多孔带和裂隙带的能力也有所增长。在低温条件下, 溶液的流动主要沿开口裂隙进行。随着温度的增高, 由于扩散系数的增大, 扩散速度也随之增长。例如, 当温度从 25°C 增高至 100°C 时, K^+ , Ag^+ , Ba^{2+} 等离子的扩散系数增大 1~2 倍 (盖勒尔斯, 1949)。此外, 随着温度的增高, 一系列呈气态的易挥发元素及其化合物迁移至控矿构造带上部的可能性增大。这一点可用存在于矿体之上的汞、砷、锑、硫以及其他元素的“帽”来解释。

总的说来, 离矿体分布距离较大的原生晕, 特别是沿构造断裂上升方向分布的原生晕, 主要是通过含矿溶液沿裂隙渗透的途径而形成的。裂隙物质是最富含金属元素的物质。在裂隙之间的块体岩石中, 元素含量较低, 有时近于本底。因此, 元素分布曲线的形状很复杂, 具有无数的高峰和拗陷。元素离开裂隙的分散显然是通过扩散作用完成的, 扩散的距离不远, 因此元素分布曲线很陡 (图 2)。

从上述有关形成原生晕的两种作用的一般性原理, 可以引出下列结论。这些结论已为许多研究人员在一系列矿床中所证实:

(1) 在矿液通道附近的细小裂隙带中, 元素的含量比在这些裂隙带周围的致密岩石和渗透性差的岩石中为高。

(2) 元素在原生晕中的分布应该是不均匀的, 距离矿体越近, 不均匀的程度愈高。

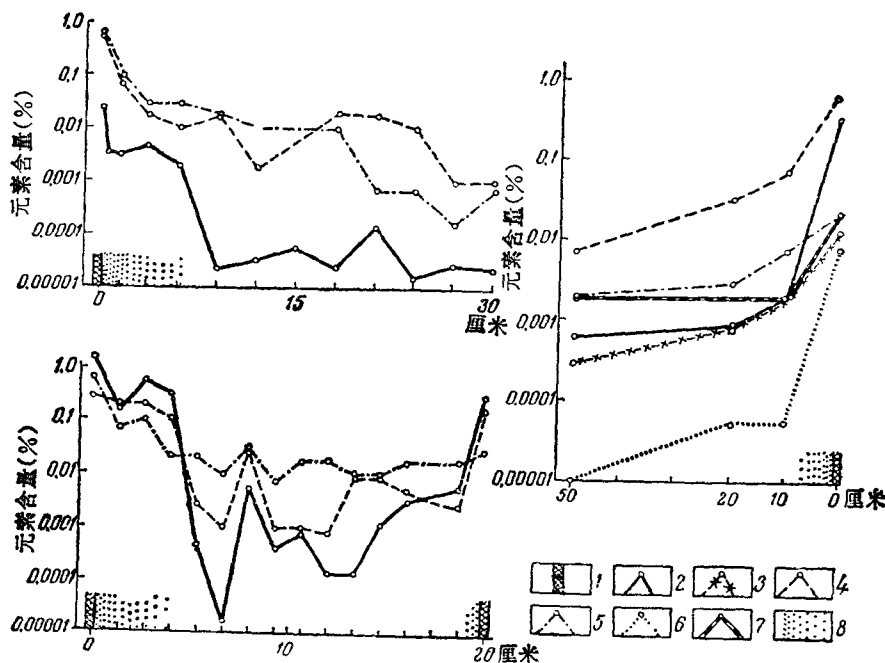


图 2 含矿裂隙周围铀、铅、钼和其他元素的分布曲线

(按Э.Н.巴兰诺夫和С.В.格里高里杨)

1—含矿裂隙；分布曲线：2—铀总量；3—活动铀；4—铅；5—钼；6—银；7—铜；8—岩石红化。

(3) 如果为缓倾斜矿体，原生晕主要分布在上盘的一方，而在下盘的分布则次之。

3. 铀矿体周围原生晕的特征

原生晕的成分

我们知道，原生晕的成分相当于被原生晕包围的矿体的元素成分。形成含矿围岩中原生晕的元素就是构成矿体的元素，或者是造矿矿物中的元素混入物。表 3 列出了三个矿床和原生晕中的主要元素（按含量减少的次序排列）。

表 3 矿体和原生晕中的主要元素

矿床和围岩	矿体中的主要元素	原生晕中的主要元素
产于石英斑岩及其凝灰岩中的矿床 I	铀、铅、钼、锌、铜、砷、银、钴	铀、铅、钼、锌、铜、砷、银、钴
产于霏细岩和霏细斑岩中的矿床 II 和 III	铀、铅、钼、锌、铜、砷、银	铀、铅、钼、锌、铜、砷、银
产于花岗岩中矿床 IV	铀、铅、钼、锌、铜、砷、银	铀、铅、钼、锌、铜、砷、银

由于矿体和原生晕在元素成分方面的相似性，因此有可能根据地表工作和山地工程中的原生晕，推测未被侵蚀或山地工程所揭露的矿体成分的一般特征。所以说，分布在矿体周围岩石中含量增高的元素是这些矿体的指示元素。

但是，作为矿体的指示元素，并非所有形成原生晕的元素都具有同等的意义。其中最重要的元素显然是这样的一些元素，它们是成因上与铀矿物有关的矿物的组成部分，或呈

混入物含于铀矿物中以及含于与铀矿物共生的矿物中。这些元素就是铀的伴生元素或矿体的直接指示元素。只有当沥青铀矿成矿前后阶段的矿物富集地段在空间上与含铀阶段矿物分布地段相重合时，铀成矿期前后各成矿期所析出的矿物元素才能成为铀矿体的间接指示元素。

根据矿体中各元素的含量，可将它们分成两组：

(1) 含量高的元素，通常在矿体周围形成广泛的和强烈的原生晕。

(2) 含量低的元素，形成规模不大和含量不高的原生晕。

各地区和不同年代（从前寒武纪到第三纪）酸性岩和中性岩中许多内生铀矿床和矿点的研究表明，大多数矿床中铀的主要伴生元素为钼和铅[●]。按分布情况铜和砷次之，在许多铀矿床上都发现有铜和砷的原生晕。

在铀矿床的原生晕中，含量较低的常见元素有 Zn、Ag、Tl、Ba、Sb；较少见的有 Zr、P、Th、V、Y、Mn、B。关于汞在基岩中的分布只在少数矿床上研究过，查明某些矿床有汞晕。上述元素在矿体周围形成的原生晕，按其规模或浓度，比铀和主要元素——铅、钼、铜、砷的都要小。

我们知道，原生晕中铀的含量是由两部分组成的。一部分原来就存在于围岩中，另一部分来自形成矿体的含矿热水溶液。那部分携入铀的存在形式问题是我们所最感兴趣的。

显然，要查明原生晕中铀的存在形式，首先要了解最初分布在围岩中的那部分铀的存在形式。

如所周知，铀在岩浆岩中呈几种不同形式存在。例如，Л.Б.塔乌松（1956）将铀在花岗岩类中的主要存在形式分为两种：类质同象和非类质同象形式。呈类质同象混入物存在于副矿物和造岩矿物晶格中的铀，只有在这些矿物晶格被破坏以后才能完全从岩石中提取。呈非类质同象存在的或所谓的活动铀，用弱溶剂即可提取。

利用浸出法，即用 2% 碱溶液，加入过氧化氢，煮沸半小时，即可测得样品中活动铀的含量。

多次测定证明，在原生晕范围以外的围岩中，活动铀含量虽然变动很大，但在大多数情况下，不超过铀重量含量的 20~25%。同时，用碱浸出法所作的实验查明，在被研究矿床的矿石中，铀的主要载体——沥青铀矿和铀黑能完全溶解。

在取自晕圈范围内铀含量较高的样品中，活动铀的成分增大，这是热液作用带入的铀转入溶液的结果。例如，铀的总量从 0.001% 增至 0.002% 时，活动铀的数量约增大一倍（23~42%）；而当铀的总量增至 0.01~0.02% 时，约增长 3 倍（达 87%）。由此可以认为，带入岩石中形成原生晕的铀主要呈铀矿物存在。这一点可用下述事实证明：在铀含量增高（0.002~0.02%）的样品重组分光片中，发现有沥青铀矿。

铀的伴生元素——铅、钼、锌和铜在原生晕中主要呈硫化物矿物存在。在用岩石样品制成的光片中，由于上述矿物的含量低微，通常不能发现，我们曾利用碾碎后的原生晕样品的重组分制成的光片，发现了这些矿物。

为了查明铀的伴生元素在样品不同组分中的分布情况，除了对样品组分的矿物成分进行测定外，对其中的伴生元素也进行了测定。样品（C-137）中各组分的分析结果列入表 4。

● 根据对铅同位素的分析可以确定，在分散晕范围内，分布的不是放射铅，而是普通铅。

该样品取自矿床Ⅳ的原生晕。矿床的矿体产于花岗岩内。为了便于对比，在表中还列出了这些元素在原生晕范围以外的样品（C-127）组分中分布的资料。该样品代表元素的本底含量。

表 4 元素在样品不同组分中的分布

样品号	样品的简要特征	组 分	粒度分级 (毫米)	含 量 (%)			
				Pb	Mo	Zn	Cu
C-137	花岗岩，在原生晕范围内所取的样品	总样品	—	0.02	0.001	0.01	0.003
		轻组分	-0.6+0.4	0.02	0.0006	0.01	0.002
			-0.4+0.25	0.01	痕 量	痕 量	0.0006
			-0.25+0.1	0.03	0.0006	0.01	0.003
		重组分 ¹⁾	-0.6+0.4	0.3	0.003	0.1	0.03
			-0.4+0.25	0.2	0.003	0.3	0.1
			-0.25+0.1	0.6	0.01	0.3	0.1
			-0.1	0.6	0.02	0.3	0.1
		总样品	—	0.006	0.0003	痕 量	0.001
			-0.6+0.4	0.003	0.0003	未发现	0.0006
			-0.4+0.25	0.006	未发现	未发现	0.0006
			-0.25+0.1	0.006	痕 量	未发现	0.001
			-0.1	0.006	0.0003	痕 量	0.001
		重组分	-0.6+0.4	0.01	0.0006	痕 量	0.003
			-0.4+0.25	0.02	0.001	0.01	0.006
			-0.25+0.1	0.06	0.002	0.02	0.02
			-0.1	0.06	0.003	0.02	0.02
		分 析 灵 敏 度		0.001	0.0003	0.01	0.003

1)重组分的重量不超过样品总重的5%。

从表4可得出结论，对于取自原生晕范围内的样品，铀的伴生元素集中于重组分中。在C-137样品的重组分物质中，显微镜下查明有方铅矿、辉钼矿、闪锌矿和黄铜矿。其他大量含有上述元素的矿物没有发现。因此可以认为，铀及其伴生元素的主要部分都呈矿物形式存在于原生晕中。

对单矿物组分中的混入元素作了专门研究的结果表明，取自原生晕和铀矿体的方铅矿含铀、钼、锆、钒、钛等混入元素（表5）。这些混入元素在沥青铀矿中也有发现，但从表5可以看出，在多金属矿床的方铅矿中，未发现这些混入元素。

晕 的 形 态

原生晕的形状、空间位置和规模首先取决于构造因素和岩性因素，也就是说，取决于决定矿体形态的因素。以溶液沿构造断裂和裂隙带渗透为主要方式的元素携入，决定了原生晕的轮廓具有不规则的形状，并沿着裂隙延伸。研究了各种构造环境中矿体周围发育的原生晕之后，这一点就明显易见了。

图3为急倾斜裂隙带周围活动铀及其伴生元素原生晕的横断面，这种裂隙带中的隐伏铀矿体产于酸性喷发岩中。在上述条件下，晕的形状大体上与矿体对称，并沿垂直方向延