

铅同位素方法寻找铀矿

夏毓亮 编著

原子能出版社

内 容 简 介

本书比较系统地阐述了铅同位素方法寻找铀矿的理论基础、地质前提、工作方法等。重点反映了对各种主要的铀成矿类型试验应用的效果；并利用 U-Pb 同位素演化理论探讨了在研究铀源、铀的成矿机理、评价铀矿资源等方面的应用。

本书适用于铀矿地质、物探人员参考，也适用于大专院校有关专业师生参阅。

铅同位素方法寻找铀矿

夏毓亮 编著

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售



开本 787×1092¹/₃₂·印张 4·字数 88 千字

1982 年 10 月第一版·1982 年 10 月第一次印刷

印数 001—1600·统一书号：15175·431

定价：0.52 元

序

夏毓亮编著的这本书是作者与有关单位十年来从事的铅同位素找矿和地质研究工作的一份系统总结。书中介绍了铅同位素方法寻找铀矿的理论基础和在我国各主要铀成矿类型已知典型矿床、矿点的实际试验应用的方法和所取得的效果，很有参考价值。实践证明，铅同位素方法对寻找深部盲矿是很有趣的一种方法。书中还对铀-铅同位素演化谱系进行了严密的理论分析（和周维勋合作），提出了势位概念，并对它在研究铀成矿机理、评价铀矿资源等方面的应用进行了探讨。

本书文字通顺，观点明确，条理清楚，深入浅出，既有丰富宝贵的实际资料，又有清晰有力的理论剖析。相信这本书的出版对铅同位素找矿和铀成矿理论的研究必将起一定的推动作用。

戎嘉树

前 言

铅同位素地质学在理论和应用研究方面已经取得大量的成果，可以认为，它是同位素地质学中获得较成熟认识的一个重要分支之一。虽然就某一方面的论述还只见于分散的个别报道中，然而铅同位素的理论在铀矿地质中的应用已越来越引起人们的重视。这本小册子乃是笔者和有关同志几年来把铅同位素运用于铀矿地质研究实践的工作总结，较为系统地论述了方法的理论基础和试验应用的效果。其中第六章本来是周维勋与夏毓亮合写的一篇论文的主要内容，安排在这里，以期进一步引起读者注意：不要把铅同位素方法只理解为一种找矿手段，还应该认识到它在铀矿地质研究领域里有着广阔的使用前景，希望人们能广义地理解铅同位素找矿方法本身的潜在价值。

参加铅同位素方法寻找铀矿试验应用研究的，先后还有黄强华、邱军恒、蒋乃真、王文照等同志，李耀崧、胡振铎、翟玉贵、张扬绍等同志也曾参加过部分野外取样工作。应特别指出的是，张扬绍、谭世源、刘福林、乔万忠、邓丁生等同志试验成功了发射光谱测定铅同位素组成的方法，并为我们分析了大量岩石样品的铅同位素组成；各野外队的有关同志也给了我们大力支持。

在编写过程中，戎嘉树、周维勋、黄强华等同志对本书内容的安排曾提出了很好的建议；书稿完成后，经黄世杰、王扬德、戎嘉树、李耀崧等同志审阅，他们提出了许多宝贵意见。

作者在此一并向他们表示衷心感谢。

尽管做了很大努力，但由于水平所限，书中缺点错误一定不少，恳请读者批评指正。我们期望这本小册子能作为一块引玉之砖，使 U-Pb 同位素体系研究为寻找更多的铀矿资源、发展铀成矿理论作出积极的贡献。

作者

目 录

第一章 绪 论	1
第二章 铀和铅的地球化学性质简介	5
第一节 铀的地球化学性质	5
第二节 铅的地球化学性质	8
第三章 铅同位素方法寻找铀矿的理论基础	10
第一节 铀和钍的放射性衰变系列	10
第二节 铅的同位素组成及其演化	15
第三节 铅的分类	22
第四节 铅同位素组成的表示法及异常铅的判断	25
第五节 寻找深部铀矿的基本地质前提	30
第六节 可分辨的异常铅的存在	34
第四章 工作方法	38
第一节 野外取样	38
第二节 分析方法简介	41
第三节 数据处理	42
第五章 试验和应用效果	46
第一节 花岗岩型铀矿床	46
第二节 火山岩型铀矿床	73
第三节 碳硅泥岩型铀矿床	78
第四节 变质岩型铀矿床	84
第五节 砂岩型铀矿床	94
第六章 U-Pb同位素演化谱系研究及其在铀矿地质中的应用	100
第一节 U-Pb同位素演化谱系	100
第二节 演化谱系的幕阶划分	102
第三节 演化谱系的势位概念	106

第四节 演化谱系在铀矿地质中的应用.....	111
后 记.....	119
参考文献.....	119

第一章 绪 论

自从第二次世界大战以来，世界上原子能工业获得迅速发展，对核燃料的需求量与日俱增，因此，寻找和发现更多的铀矿资源具有重要的深远的意义。人们普遍认为，只靠地表直接放射性测量方法去发现新的铀矿已越来越困难了。因此，在铀矿普查勘探领域里向人们提出了一个亟待解决的任务，就是必须探索有效地寻找隐伏铀矿体的新方法。

U-Pb 同位素体系的研究早为人们所重视，这是因为铀同位素和铅同位素之间的核生成联系，使得 U-Pb 同位素体系的研究在年代测定和了解地质运动过程方面成为重要的手段。上溯到本世纪三十年代末期，开始用质谱计测定铅的同位素组成以来，有关铅同位素地质的论文在千余篇以上。纵观这些著作可以这样认为，过去几十年来 U-Pb 同位素体系研究的最重要的成就是在地质计时学方面的贡献。特别是五十年代末期以来，利用 U-Pb 同位素体系研究来解释地质问题已涉及地学领域中的许多问题，诸如地质体年龄，金属矿床的成因，成矿物质来源，成矿带的划分，区域岩浆活动的分期乃至天体演化理论中的一些复杂问题等，U-Pb 同位素体系研究的成果都起了十分重要的作用。

然而，把 U-Pb 同位素体系研究作为一种找矿方法提出来还仅仅是近十几年的事情。所谓铅同位素找矿方法就是利用自然客体中铅同位素组成的变异特点来评价和寻找矿产资源的方法。铅同位素组成除了对评价多金属矿床有指示意义外，更重要的是用来评价和寻找放射性矿产资源。1958年，美国学者坎农等^[1, 2]曾首次提出利用非放射性矿物（例如

方铅矿、黄铁矿等)中的放射成因铅可以作为放射性矿产存在的标志。坎农设计的铅同位素组成的三角坐标系表示法,认为具有最大潜在价值的是标在铀区里距普通铅区有若干距离的那些分析结果。并认为一个铀型铅的分析结果就足够证明存在一个新的铀矿区;在一个已知的铀矿区里存在一个新的铀矿体,或者在一个矿山的开采区附近有一条铀矿脉。后来坎农^[7]又指出:“一个普查工作者即使找到一块含铀型铅的方铅矿、黄铁矿或者类似的非放射性矿物的标本,那么他已有一半的可能是站在一个铀矿床的附近了。这一个样品的组成与正常铅偏离越远,这个可能性就越大。如果他找到一系列的铀型铅,那他找到铀矿的机会就增加到百分之一百。”直到1970年在加拿大多伦多召开的第三届国际地球化学勘探会议上,坎农^[8]提出利用“血型铅”(具有固定组成的特殊的铅同位素组成变体)可以作为铀矿、某些铅矿、某些金属或大型金属矿床的标志。1960年左右,苏联学者也在加紧探讨铅同位素方法找铀矿的效果。苏拉日斯基和图加林诺夫^[18]讨论了铅中放射成因同位素(^{206}Pb 、 ^{207}Pb)显著增高现象的可能的地质作用过程,从而肯定了利用铅同位素异常普查铀矿床的可能性。他们在1968年发表了研究古老结晶地块内的中生代铀矿化地区的钾长石和全岩样品的铅同位素组成的结果^[19],得出靠近矿体(1—60米)和远离矿体(60—500米)的矿物和岩石中,铅的同位素比值($^{206}\text{Pb}/^{208}\text{Pb}$)显然不同。从而进一步阐明铅同位素找矿方法的有效性。到七十年代初,苏联又有一些学者发表过铅同位素方法找铀矿的试验成果,也肯定了铅同位素找矿方法的理论和实际意义^[20, 21]。

然而,英国的鲍威^[17]于1972年把铅同位素找铀矿的方

法仍作为“较不成熟的方法”来讨论，但他也肯定至少在某些环境中该法有相当大的潜在应用可能，并呼吁“现在需要在世界范围内对该法作进一步的研究，以便确定它的有效性和局限性。”直到1976年国际铀矿普查方法经验交流会上，仍有人把铅同位素方法找铀矿作为一种新方法来谈论。

从上述这些零星报道的资料可以看出，国外对铅同位素找铀矿方法的研究还是处在探索性阶段。进展缓慢的原因可能是：（1）铅同位素方法需要很多科学部门在技术和理论方面的成就以及它们之间的结合。在铅同位素地质研究中，地质工作是薄弱的环节，因为还没有更多的地质工作者掌握铅同位素地质学的基本原理和铅同位素资料解释的复杂性。

（2）主要是采用质谱计测定铅的同位素组成。虽然质谱分析是现代同位素分析中最准确、最灵敏的方法，但成本高、效率低，只有较大研究机构才有这种设备。因此，质谱计目前还不能成为找矿中的通用工具。（3）国外学者还主要局限在研究非放射性矿物的铅同位素组成上，而非放射性矿物比较难于获得，这就给方法的运用带来极大的不便。上述这些情况给铅同位素找矿方法在生产中的推广应用造成了极大的困难。

我国在六十年代就曾做过铅同位素方法寻找铀矿的研究工作，寿宝奎同志在铀矿体上部地表风化样品中发现有 ^{206}Pb 异常组分。但当时因为样品测定工作的困难，对该方法一直未能进行深入研究。直到1970年以后，利用铅同位素方法寻找隐伏铀矿的工作才引起重视。首先考虑到测试手段的问题，张扬绍、谭世源等同志以学习与独创相结合的方式，在较短的时间内组建成功了发射光谱法测定铅同位素组成的实验装置。试验表明，光谱法测定铅同位素组成的灵敏度、准

确度虽不如质谱法高，但速度快，成本低，容易在生产中推广应用。更重要的是，大量实际工作表明，光谱法测定样品的铅同位素组成基本上能够达到地质找矿的目的，而且还可以对探讨铀的成矿机理提供某些很有参考价值的信息。目前，国内已有几个单位建立了发射光谱测定铅同位素组成的实验室，提供了铅同位素方法寻找铀矿的实际资料，丰富了该法实际运用有效性的依据。

应该注意的是，当前国内外对铅同位素找铀矿的方法还没有被相当多的地质工作者所认识，甚至有的地质工作者仍持怀疑态度。当然我们应该承认，没有一种单一的找矿方法是万能的。我们认为，任何一种单一的找矿方法只要能在某些特定的地质条件下发挥其独特的作用，那么就应该肯定这种找矿方法的独立性和有效性。如果说采集单矿物样品给取样工作带来巨大困难，那么我们所研究的对象主要是岩石样品，这就大大减轻了分选样品的困难，扩大了在找矿过程中的采样范围。如果说质谱分析铅同位素组成不能作为生产中的通用工具，那么我们采用发射光谱分析的途径，就大大方便了在生产中的推广应用。因此，阐明铅同位素找矿方法的基本原理，介绍利用铅同位素找矿方法所取得的主要成果，以期能在更广泛的范围内发挥铅同位素方法寻找隐伏铀矿的作用，这是编著本书的目的。

我们坚信，铅同位素找铀矿方法必将越来越显示出其生命力，U-Pb 同位素体系的研究将为寻找更多的铀矿资源，发展铀成矿理论作出积极的贡献。

第二章 铀和铅的地

球化学性质简介

在 U-Pb 同位素体系研究中,尤其在讨论比较适合于利用铅同位素方法找铀矿的地质环境时,都离不开对铀和铅的地球化学性质的基本了解。

第一节 铀的地球化学性质

铀在周期表中属锕系元素,元素符号为 U,原子序数为 92,原子量为 $238.028^{[5]}$ 。在自然界中,铀是一种很活泼的亲氧元素,具有变价特点,已知有 U^{4+} 和 U^{6+} 离子。 U^{4+} 的离子半径为 $1.04 \text{ \AA}$,单独的 U^{6+} 离子半径为 $0.8 \text{ \AA}$,而 $(UO_2)^{2+}$ 是一个相当大的离子团,其离子半径为 $3.44 \text{ \AA}$ 。四价铀和六价铀的化学性质有很大的差异。 U^{4+} 常以类质同象形式与离子半径相近的其他元素(如 Th^{4+} 、 Zr^{4+} 、 TR^{3+} 、 Ca^{2+} 等)一起形成许多含铀矿物。 U^{6+} 往往形成独立的铀矿物。 U^{4+} 在还原条件下稳定,在氧化条件下则能再失去核外的两个电子而被氧化成 U^{6+} , U^{6+} 在氧化条件下稳定,在还原条件下则能从还原物质中获得两个电子而被还原成 U^{4+} 。 U^{4+} 完全不溶于水,而 U^{6+} 可溶于水,故在地壳各种水中的铀只有 U^{6+} 而没有 U^{4+} 。当水溶液中的 U^{6+} 遇到还原环境时就会被还原成 U^{4+} 而沉淀。所以只要有足够的铀源,适宜的地球化学环境,就有可能将分散的铀集中起来形成铀矿床。反之,当 U^{4+} 的矿物经地壳变动,由深部而暴露于地表时,在富氧的环境下, U^{4+} 就被氧化成可溶于水的 U^{6+} 。铀矿暴

露于地表，一般很少见到 4^+ 的矿物，而常常见到的是 6^+ 的矿物。如果矿床处在强氧化的条件下，并且是温湿气候及水流条件发育的环境，则地表部分的铀可能完全被淋失。

在自然界中，铀主要以下列四种形式存在于地壳的各类岩石中：

1. 形成独立的铀矿物，如晶质铀矿、沥青铀矿、钙铀云母、硅钙铀矿等。

2. 以类质同象进入到非铀矿物的晶格中，如方钍石、锆英石、独居石、磷灰石等。

3. 呈分散状态存在于其他矿物中。铀可以被吸附在其他矿物的表面上，如含铀蛋白石、含铀褐铁矿等。

4. 呈溶液状态存在于矿物的液态包裹体和矿物颗粒之间。

铀在地壳中的平均含量约为 3—4 ppm。但在各类岩石中的分布却差别甚大(表1)。罗杰斯等^[9]搜集了不同作者测定各类火成岩中铀含量的大量数据，表明铀的丰度的总趋势是向着火成岩 SiO_2 较多的岩类逐渐增加。同时他发表了彼得曼对各大组火成岩中铀的一般分布所作的图示(图1)。从图1看出，铀明显地向地壳部位聚集，以及铀的丰度朝着火成岩序列后面的成员增加。这进一步说明，在总的岩石演化过程中，铀具有逐渐从其他造岩组分中分离出来的趋势。

表1 不同类型岩石中的铀含量 [22]

岩石 类型	侵入岩				沉积岩				深海沉积物	
	超基 性岩	玄武 岩类	花岗岩类 富钙的	花岗岩类 贫钙的	正长岩	页岩	砂岩	碳酸岩	灰质的	泥质的
U(ppm)	0.001	1	3	3	3	3.7	0.45	2.2	0.0	1.3

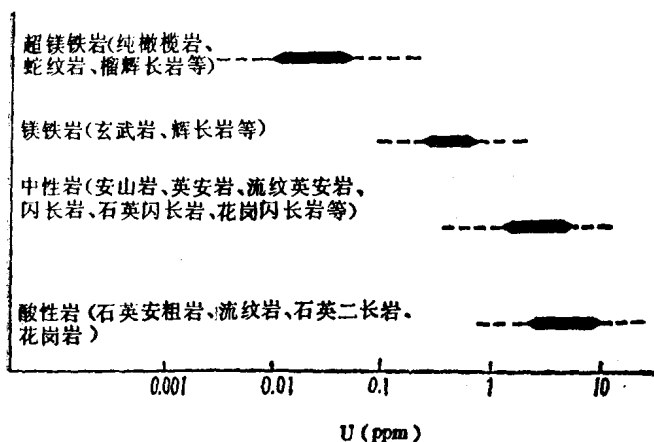


图 1 各组火成岩中铀的一般分布

王琰庭、戎嘉树等对我国诸广山花岗杂岩体中几种代表性岩石铀含量变化统计(表 2)*, 得出花岗岩类岩石中铀含量的变化主要与岩石的酸度、碱度有关, 即随着岩石酸度、碱度的增加, 含铀量也随之增加。

表 2 诸广山花岗岩类岩石中铀含量

侵入顺序	岩 性	样品数 (个)	铀含量变化范围 (ppm)	平均铀含量 (ppm)
1	花岗闪长岩	3	5—12	7.1
2	二长花岗岩	30	5—34	16.8
3	黑云母花岗岩	55	8—38	19.6
4	二云母钾钠花岗岩	29	4—35	19.8

* 内部资料。

第二节 铅的地球化学性质

铅在周期表中作为硫化场元素，元素符号为 Pb ，原子序数为82，平均原子量约为207.2。

在自然界中铅通常以 Pb^{2+} 形成难溶解的化合物。在岩石圈上部的矿物和岩石中，铅的地球化学兼有亲铜和亲石元素的性质。作为亲铜元素来说，主要以方铅矿 (PbS) 形式产出。但是铅也出现在许多造岩矿物中而表现了亲石性，这是因为铅的离子半径为 $1.32 \text{ \AA}$ ，而使 Pb 有可能置换矿物中的 Sr ($1.27 \text{ \AA}$)、 Ba ($1.43 \text{ \AA}$)、 K ($1.33 \text{ \AA}$) 及 Ca ($1.06 \text{ \AA}$) 等离子。所以二价铅主要产在硅酸盐岩石中的含钾矿物和磷灰石中。钾长石中可能含有 5—100ppm 的 Pb ，在早期结晶的钾长石里，含铅量通常最高。还须注意，铅和硫之间具有强烈的亲合力。在分析岩浆岩时发现的铅，大多数呈铅的硫化物而存在，这种硫化物或者是原生的，或者是由于硅酸铅和硫化物之间经过后期的作用形成的。

戈尔德施密特^[8]统计了陨石中的铅含量，采取下列的平均数值：

硅酸盐相陨石	2ppm
铁镍相陨石	56ppm
陨硫铁	20ppm

铅在地壳中的平均含量为 16ppm，而在各种不同类型的岩石中含量有明显差别 (表 3)。从表 3 可以看出， Pb 与 K 、 Si 关系密切，对于 SiO_2 高的岩浆岩来说，铅含量也高。在岩浆演化过程中， Si 与 K 密切伴随，所以 Si 、 K 和 Pb 都集中于残余岩浆中。 Pb 和 K 的离子半径相同，密切伴随是受结晶化学的因素制约；而 Pb 和 Si 密切伴随不是结晶化学的关

系，是因其演化特征相近引起的。

表 3 不同类型岩石中的铅含量^[22]

岩石类型	侵入岩					沉积岩			深海沉积物	
	超基性岩	玄武岩类	花岗岩类		正长岩	页岩	砂岩	碳酸盐	灰质的	泥质的
			富钙的	贫钙的						
Pb(ppm)	1	6	15	19	12	20	7	9	9	80