

绪 言

铀水文地球化学是研究水-岩作用过程中铀的水迁移和沉淀规律及其控制因素，研究天然水中铀的形成和分布规律及其实际应用的一门学科。它建立在水文地球化学和铀地球化学两门学科基础之上。

天然水与岩石之间的相互作用（简称水-岩作用）是地球化学工作者关注的课题。地球化学是研究地球及其各部分化学组分与化学演化的一门科学*。化学演化不仅包括化学组分的演化，同时也包括化学组分的各种相态之间的演化。地壳中化学组分相态间的演化以固 \rightleftharpoons 液相最为普遍，即化学组分由岩石转入地下水，或反之。地壳内不同相态的物质是互相包容着的，岩石中含有水和气，水中溶解有各种元素和气体。在含水层中，溶解有各种物质的天然水时刻与其周围的岩石互相作用着。地壳中的地球化学作用，在许多情况下是在水介质中进行的。即使在地幔中，许多地球化学演化也离不开水的作用。水文地球化学正是从水-岩作用这个角度来研究地球各部分化学组分的化学演化的。从这个意义上可以说，铀水文地球化学是研究铀及其化合物在水-岩体系中化学演化的学科。

天然水和岩石都含有气体，在许多情况下还含有有机质。气体和有机质不仅是水-岩体系的组成部分，而且是水-岩作用的重要营力，它们在元素的水迁移和沉淀过程中起着重要作用，对铀来说其作用更为突出。因此，所谓水-岩作用，实际上是指天然水与岩石及包含于其中的气体和有机质之间的相互作用。A. I. 彼列尔曼在1982年对水文地球化学下的定义中明确地表达了

* 据中国科学院1977年9月地球化学会议。

这一观点：“水文地球化学是研究水与岩石、气体、有机质间相互作用的一门科学……”^[1]在研究铀水文地球化学时，也必须对水-岩体系作这种广义上的理解。

铀水文地球化学包括四个部分：①基础理论，包括与铀水文地球化学有关的铀的物理化学性质、地球化学参数、质量作用定律、电化学原理、热力学等基础理论，这部分内容是掌握铀水文地球化学基本规律、扩大其应用服务面的理论基础；②基本规律，包括铀在天然水中的存在形式和迁移规律、铀自天然水中沉淀析出的机理、铀的水文地球化学环境、放射性水的分布和成因、天然水中的放射性同位素等，这部分内容是开展各项应用工作的基础；③应用部分，包括铀矿水文地球化学找矿、铀成矿水文地球化学条件的研究、环境评价保护、医疗保健及核技术找水等；研究方法，包括野外调查采样、分析测试、水文地球化学计算和铀水文地球化学模拟试验等。本书仅涉及前两部分，前三章为基础理论部分，后五章为基本规律部分。

铀水文地球化学是与许多其它学科有关的边缘性学科。与其相关的学科中，基础理论学科有放射化学、水化学、物理化学、络合化学、电化学、胶体化学、有机化学、同位素化学等，专业学科有地质学、水文地质学、地下水动力学、古水文地质学、岩石矿物学、矿床学、景观地球化学等。它们与铀水文地球化学之间的关系示于图0-1。

铀水文地球化学原理是铀矿地质工作者必备的专业知识。在铀矿找矿工作中，模式找矿日趋重要。而建立铀矿床成因模式，首先必须了解铀的水文地球化学性质，掌握铀的水迁移和沉淀机理。Jl、C叶甫谢耶娃在《表生带铀的地球化学》一书中指出：“要懂得形成外生铀矿床的条件，必须知道铀在地壳上部——即表生带内的性状。”近年来在铀矿成因研究方面，水文地球化学原理的应用有许多新的发展，国内外许多学者不仅重视地下水在表生淋积型铀矿床形成过程中的作用，而且十分重视水文地球化学条件在热水（液）铀矿床成矿过程中的作用。

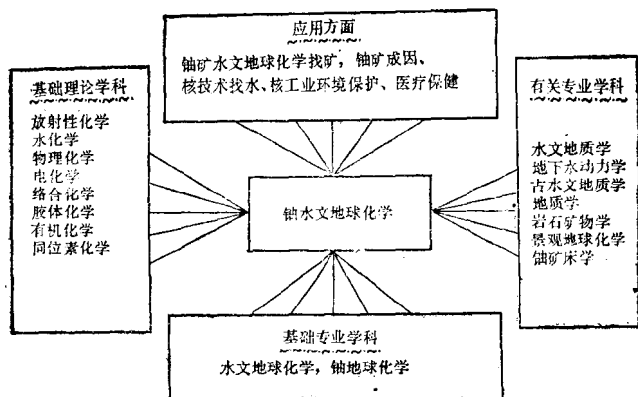


图0-1 铀水文地球化学与有关学科的关系

铀水文地球化学原理也是铀矿水文地球化学找矿的理论基础。水文地球化学找矿是以寻找矿化分散晕为基础的，要懂得铀水分散晕的形成和分布，就必须懂得铀的水迁移的基本原理。Jl·C叶甫谢耶娃还曾说过：“铀矿普查工作的进展在很大程度上也取决于我们对表生带铀的性状的认识水平。”^[2]实践也证明，铀水文地球化学原理在铀矿地质工作中具有十分重要的意义。

铀水文地球化学原理的研究方法可分三种，即理论方法、实验方法和经验方法。

理论方法主要是用铀及有关元素的物理化学性质和地球化学参数来说明铀的水文地球化学性质；用各种水化学原理及有关参数来说明水文地球化学作用的条件。在理论研究中应充分应用质量作用定律、电化学原理、热力学等来分析水文地球化学作用。这种分析的基本思路是用反应过程中被研究物质浓度的平衡点或临界点作为衡量水文地球化学作用的参比界线。

实验方法是研究铀水文地球化学机理的重要手段。大自然虽然无法在实验室内再造，但可以模拟。理论研究和计算的结果最好用模拟试验加以验证，也可以通过模拟试验在比较接近自然的环境中探索铀在水一岩体系中的运动规律。常用的模拟试验有浸泡试验、淋滤试验、弥散试验、高温高压模拟试验等。每个试验都

是在一定条件下进行的，其成果只能说明一定条件下的规律。所以，在总结试验成果时必须说明试验条件。

经验方法主要是通过观察自然来获得某些认识和规律。观察自然的主要手段是水文地球化学调查，调查内容应包括水化学、景观、地物、水文地质和地质特征等。一般水文地球化学认识和规律是在综合研究这三方面内在联系的基础上获得的，在水文地球化学研究中除了进行水化学调查外还必须进行宏观和微观的地质和水文地质调查，这是因为：水文地球化学调查的目的就是解决地质学、水文地质学和环境学中的问题；地质构造、岩性特征、矿物组分、含水层性质、地下水动力条件景观、地物等与水文地球化学条件有内在联系；③地质和水文地质现象是良好的水文地球化学形迹，是恢复水文地球化学条件的必要资料。

在研究水文地球化学原理时，应尽可能用以上三种方法相互验证，以便更认识建立在更科学、更客观、更可靠的基础上。

铀水文地球化学是一门新兴科学，它首先是在铀矿开发和医疗保健事业中诞生和发展起来的。

1789年德国化学家M. H. Kraproth首次从捷克的一个银矿废石堆中的沥青铀矿中分离出铀，当时铀主要用于染料工业。1896年居里夫人发现了铀的放射性及比铀放射性更强的镭和钋。氡是于1900年才被F. E. 多尔恩（德）发现的，1902~1904年在某些矿泉中鉴别出氡。30年代在高矿化油田水中发现了镭和它的同位素（ ^{226}Ra 和 ^{228}Ra ）。那时尚无测定水中铀的实用分析方法，所以对水中铀研究得很少。由于水中氡达到一定浓度时可以治疗有关神经和心血管系统的疾病，所以这种氡水就成为矿泉医疗事业开发应用的对象。在30~40年代，苏联、日本等国就已对放射性氡水、镭水进行过不少地质调查工作。第二次世界大战时核武器的研制促进了第一次大规模的铀矿普查。在萤光珠球法成为测定水中微量铀的实用分析方法后，铀矿的水化学普查和铀水文地球化学研究工作才得以迅速发展。在此基础上，1956年A. H. 托卡列夫和A. B. 谢尔巴科夫所著《放射性水文地质学》一书出版，

这本书对铀水文地球化学的形成和发展起了很大的促进作用。尽管当时水文地球化学尚未从水文地质学中独立划分出来，但这本书实际上可以看作是铀水文地球化学的雏形。

第二次世界大战以后，核工业由单纯军用转为军民两用，于是对核原料的需求猛增，从而促进了第二次世界性普查铀矿的高潮，同时铀水文地球化学学科也得到了进一步发展和提高。这个阶段具有三个特点。第一，铀水文地球化学的应用从找矿发展到成矿理论的研究。50年代以后，由于后生铀矿床的大量发现，美国地质学家提出了科罗拉多高原砂岩卷状铀矿床的淋积成因理论，引起了人们对地下水在成矿过程中作用的广泛重视。这时，不仅各国水文地质工作者，而且许多地质学家都加强了关于地下水对岩石改造成矿作用的研究。不少学者对热液的内生岩浆成因表示怀疑，提出了热液主要是外生渗透成因的观点，从而使铀矿床水成说在铀成矿理论中占据了重要地位。60年代以来，出现了大量有关铀矿床成因的著作，这些著作在很大程度上反映了铀水文地球化学的发展和提高。其中，具代表性的著作有：《表生带铀的地球化学》（Л.С.叶甫谢耶娃，1962，1974年再版），《外生后成铀矿床》、《水成铀矿床》（А.И.彼列尔曼，1965，1980），《外生铀矿床》（В.И.丹契夫等，1978），《火山洼地铀矿床》（А.И.屠格林诺夫等，1963），《成矿过程中的水文地球化学》（А.К.利西秦，1976），《外生铀矿床成矿模式》等。第二，质量作用定律、热力学、同位素地球化学、有机、生物地球化学、古水文地质学等基础理论的渗入，使铀水文地球化学的理论和研究方法得到进一步的发展。这方面的有关著作有，《后生地球化学》（А.И.彼列尔曼，1976），《水文地球化学》（А.М.奥符钦尼科夫，1970；С.Л.Шварцев，1982），《成矿规律中的古水文地质分析》（Е.А.巴斯科夫，1976），《铀溶液-矿物平衡》（D.Langmuir，1978）， ^{234}U 及其在地质学中的应用（В.В.契尔登采夫，1960），《铀系列不平衡在环境问题中的应用》（М.依凡诺维奇，1982），《铀的有机地球化学》（В.М.Шивец，1978）等。第三，铀水文

地球化学与水文地球化学互相促进和交替发展。自从1970年第一本《水文地球化学》问世后，放射性水文地质学便逐渐转化为铀水文地球化学。70年代开始出现“放射性水文地球化学”的术语，这个术语的概念不够确切，它是指铀、镭、氡三个放射性元素的水文地球化学，镭和氡都是铀系元素，故应称“铀水文地球化学”较为合适；80年代出版的著作、刊物、规范中都已广泛使用这一术语。铀的水文地球化学性质复杂，所涉及的水文地球化学作用众多，铀对各种地质作用都很敏感，其水迁移和沉淀无不与水-岩作用和水文地球化学条件的变更有着密切的关系。铀的这一重要特征使铀水文地球化学具有极为丰富多采的内容。因而铀水文地球化学的发展又进一步丰富了水文地球化学的内容。

我国于1954年开始铀矿地质工作，60年代以来铀矿水文地球化学工作发展迅猛，从70年代开始在理论研究方面也取得了较好的成果。原核工业部地质局分别于1980和1983年在总结自己经验的基础上组织编写出版了《放射性水文地球化学找矿》（高万林等）和《放射性水异常评价实例汇编》，标志着我国铀水文地球化学找矿理论和实践已趋成熟。广大铀矿水文地质工作者在铀水文地球化学的各个领域中做出了贡献。在理论研究方面，李宽良、金立敏、程汝南、史维浚等人把质量作用定律、电化学和热力学引入铀水文地球化学，提出联合使用 $Eh-pH$ 和氧化还原电位差值来划分氧化还原环境，对水中铀存在形式和铀的沉淀进行了研究；在铀矿成因方面，王慎全、叶政祥等人引用古水文地质分析方法对铀矿床成因进行了研究；李学礼、孙亚民等人分别提出了隆起带古热水排泄源地铀成矿模式和火成岩铀淋滤成矿说；在铀矿水文地球化学找矿原理方面，俞璧等人归纳总结了水文地球化学找矿判据；许宗融等人在推广抽水测氡找铀矿工作中起了重要作用；李育敏、王超、高万林、周炳官等在推广应用放射性同位素找铀矿工作中起了重要作用；在引进国外有关资料方面，沈照理、陈晓秦、李育敏、孟瑞曼、金立敏等人做了许多有益的工作。

本书是作者综合了国内外学者和本人在铀水文地球化学领域的主要研究成果而编著的，是第一部涉及元素水文地球化学的教材。铀水文地球化学的体系虽已初步建立，但有些问题仍有待进一步完善和提高，例如，用水质数学模型定量评价并预测铀的水迁移，铀成矿的水文地球化学过程和模式，铀的有机水文地球化学作用，水中放射性同位素在铀矿地质和水文地质中的应用等。

应用铀水文地球化学的原理可进一步建立元素水文地球化学。随着矿业开发、环境保护、矿泉水资源利用、水资源质量评价等事业的需要，有必要从水文地球化学中派生出元素水文地球化学分支。研究铀水文地球化学可为其它元素的水文地球化学研究提供范例，并为元素水文地球化学的诞生开辟道路。

第一章 铀的放射性和水文地球化学性质

元素的性质是由原子结构所决定的。原子核的结构决定元素的稳定性，核外电子的分布和运动状态决定元素的化学性质。

原子核的结构有一定的规律，核质量数小的原子核中质子数与中子数相等，或中子数略多些（只有 ${}^1_1\text{H}$ 和 ${}^3_2\text{He}$ 例外），这种原子核通常处于最低能级——基态，因而它们是稳定的。周期表中的轻元素的原子核就是这种稳定的原子核。任何含过多质子或中子的原子核都不稳定。例如周期表中原子序数大于82的元素，其核中的中子数比质子数多50%以上，这些元素的原子核都不稳定。铀是自然界中最重的核素，在 ${}^{238}\text{U}$ 的核中，质子数=92，中子数比质子数多59%，所以铀不稳定，易发生衰变。某些轻元素，由于其原子核中有过剩的中子或质子（如 ${}^{14}\text{C}$ 有过剩的中子， ${}^{11}\text{C}$ 有过剩的质子），它们也是不稳定的。不稳定的核素都属于放射性核素。

第一节 放射性概述

一、放射性

某些核素自发地放出粒子或 γ 射线，或在轨道电子俘获后放出X射线，或发生自发裂变的性质称为放射性。具有放射性的核素称为放射性核素。某元素的所有同位素都具有放射性，则称此元素为放射性元素。铀、镭、氡、钍都为放射性元素。 ${}^{238}\text{U}$ 、 ${}^{235}\text{U}$ 、 ${}^{234}\text{U}$ 、 ${}^{226}\text{Ra}$ 、 ${}^{222}\text{Rn}$ 、 ${}^{232}\text{Th}$ 等为放射性核素。

1. α 粒子

α 粒子是核转变时放出的 ${}^4_2\text{He}$ 核。其能量介于4~8MeV之间。

这种粒子系由两个质子和两个中子组成，带两个单位的正电荷，质量数为 4。 ^{238}U 、 ^{234}U 、 ^{230}Th 、 ^{226}Ra 、 ^{222}Rn 等核素衰变时都能放出 α 粒子。

2. β 粒子

β 粒子是 β 衰变中放出的正电子或负电子，其速度很快，接近光速，质量很小，带一个单位的电荷。 UX_1 、 UX_2 、 RaC 、 RaC' 、 RaD 、 RaE 等核素衰变时放出 β 粒子。

3. γ 射线

γ 射线是伴随 α 、 β 衰变放出的一种波长极短的电磁辐射。当原子核发生 α 、 β 衰变时，新生成的原子核往往处于激发状态，当它由激发状态回到正常状态时，就以 γ 光子的形式放出多余的能量。不同的放射性核素衰变时所放出的 γ 射线的能量是不同的，一般介于几万到几兆电子伏之间， γ 射线本身不带电。 ^{238}U 、 UX_1 、 UX_2 、 ^{230}Th 、 ^{226}Ra 、 RaB 、 RaC' 、 RaD 、 RaF 等核素衰变时放出 γ 射线。

4. 轨道电子俘获

当原子核中质子过剩时，原子核中的质子从核外捕获一个轨道电子而变成一个中子，并放出一个中微子，此现象称为电子俘获。由于 K 层离核最近，所以 K 层电子俘获的几率最大。从 K 层俘获电子叫做 K 电子俘获。

5. 自发裂变

在无任何外界作用的情况下，原子核自发地分裂成大小不等，质量相近的 2 个或 3~4 个碎片，同时放出 2~3 个中子。各种放射性核素中 ^{238}U 的自发裂变几率最高。但与 α 衰变相比， ^{238}U 自发衰变的几率很低，大约每进行两百万次 α 衰变才发生一次自发裂变。

铀的放射性作用于周围物质时，会产生一些现象，这些现象在地质找矿工作中常有广泛的应用，以下作一简单的介绍。

穿透物质 射线具有穿透物质的能力，它在物质中穿行的距离叫射程。射程越长，表示其穿透能力越强。不同种类的射线，

其射程长短不同。同一种射线的射程，则取决于射线的能量及被穿行物质的性质。在标准状态下， α 粒子随着其本身的能量不同在空气中的射程为2.5~8.6cm； β 粒子的射程为4~130cm，最长可达几米； γ 射线的射程为100~200m。它们的穿透能力之比约为 $\alpha:\beta:\gamma=1:100:10000$ 。 γ 射线穿透物质的能力被用于进行地面和航空 γ 测量，寻找铀矿。在固体中三种射线的穿透能力均大大减小。一张纸或0.004~0.005cm厚的铝箔就可把 α 射线全部屏蔽；0.5cm厚的铝板可以挡住 β 射线，而50~60cm厚的铝板才能挡住 γ 射线。人们利用 β 和 γ 射线不同的穿透能力进行铀矿化的物探编录。

电离作用和激发作用 射线通过物质时，可以把部分能量传递给该物质中的束缚电子（外层电子），使其从电子壳层中逸出成为自由电子，而原子则变成带正电的离子，这种作用叫做电离作用。如果束缚电子所获得的能量不足以使它变成自由电子，而只跃迁到更高的能级轨道，则称为激发作用。各种射线的电离作用能力（在单位距离上产生的离子对数）各不相同， α 射线最强， β 射线次之， γ 射线最弱，其比例大约为 $\alpha:\beta:\gamma=10000:100:1$ 。静电计和一般的辐射仪就是根据射线的电离作用来测定物质的放射性活度的。

处于更高能级的激发电子在加热到一定温度时，它又能返回原来的基态轨道，同时放出光，这现象称为热释光。热释光的强度与放射性物质的含量、非放射性物质被照射的时间呈正相关。在地质、考古工作中常利用热释光原理来测定物质的年龄，也有人利用热释光现象进行探测铀矿的试验。

荧光作用 射线射到某些物质上（如硫化锌、碘化钠等），能激起荧光或磷光。某些铀化合物在紫外线照射下也能发出荧光。荧光的强弱决定于射线的强度。闪烁探测器就是利用 γ 射线能使碘化钠晶体产生荧光的原理来测定放射性活度的，荧光作用也是珠球荧光法测定水中微量铀的原理。

感光作用 射线与日光一样，可使碘化银分解，使照像底片感光。感光程度与放射性活度及射线照射时间的长短有关。这种

现象被用于研究岩石标本中铀的分布规律。

产生热量 射线被物质吸收，动能转变为热能，致使被照射物质的温度升高。1g铀每小时产生 $38.5 \times 10^{-5} \text{J}$ 的热量，1g镭每小时放出578J的热量。三种射线中以 α 射线的热效应最大。放射性衰变所产生的热量对于地球的动力、构造运动有重要影响，也有人尝试用此原理来进行寻找铀矿的试验。

化学反应及其它变化 射线作用可以引起物质发生化学反应及其它变化，如使 H_2O 、 HCl 、 NH_4^+ 分解，使有机组织的分子破坏而造成死亡，等等。射线还能使岩石变色或褪色（石英变黑、萤石变紫、长石变红、炭质褪色）。三种射线中以 α 射线产生化学效应的能力最大。

裂变 核裂变的碎片具有很大的能量，当它们撞击其周围物质时，能使这些物质遭受损伤，这种损伤称为碎片的径迹。径迹的密度与物质中铀含量呈正相关，这一原理被利用来测定水中微量铀和进行径迹找铀矿。

二、衰 变 链

一种核素自发地放出射线转变为另一种核素的现象称为衰变。天然放射性核素的衰变方式主要有 α 衰变、 β 衰变、电子俘获和同质异能跃迁等。不稳定原子核自发地放出 α 粒子变成另一种原子核，这种衰变称为 α 衰变。如 ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$

不稳定原子核自发地放出 β 粒子和中微子而转变成另一种原子核，这种衰变称为 β 衰变，如 ${}^{137}_{55}\text{Cs} \rightarrow {}^{137}_{56}\text{Ba} + \beta + \gamma$

由电子俘获引起的一种原子核转变成另一种原子核的衰变称为电子俘获衰变。如 ${}^{40}_{19}\text{K}$ 的核经 K 俘获可转变为 ${}^{40}_{18}\text{Ar}$ 。

放出 γ 光子的核变化称为 γ 衰变。由于衰变后的核素与衰变前的素相比，它们的原子序数及质量数都相同；而只是能量不同，所以这种衰变又称为同质异能跃迁，衰变前、后的两个核素称为同质异能素。如 UX_2 与 UZ_2 是一对同质异能素。

由放射性衰变生成的稳定的或放射性的核素称为衰变产物。

在一个衰变链中，衰变时直接或间接地产生某种特定核素（子体）的任何放射性核素称为母体核素（前驱），衰变链中某一特定放射性核素后面的任何核素称为子体核素。一个包括若干核素的系列，该系列中每一种核素通过放射性衰变（不包括自发裂变）^②转变为下一种核素，直至形成稳定核素，该系列称为衰变链或衰变系。

自然界存在三个衰变链，分别以相应的起始核素来命名，即铀 (^{238}U)系、镭铀 (^{235}U)系、钍 (^{232}Th)系。这些衰变链的衰变顺序示于图 1-1。

除以上三个衰变链外，在自然界还存在一些不成系列的放射性核素，它们经一次衰变后即成为稳定核素。如 ^{87}Rb 经一次 β 衰变，变成非放射性的稳定核素 ^{87}Sr 后，就不再衰变了。

由图 1-1 可见，铀系中主要有 19 个核素，镭铀系主要有 15 个核素，钍系主要有 13 个核素。图中方框内标出核素名称和半衰期，箭头方向表示衰变方式，向下为 α 衰变，向右上方为 β 衰变，水平方向为同质异能跃迁。在单一的放射性衰变过程中，放射性活度降至其原有值一半时所需要的时间称为半衰期，当放射性核素发生 α 衰变时，由核内放出质量数为 4 的 α 粒子，它带两个单位正电荷，所以新产生的核素较衰变前质量数减少 4，原子序数减少 2，即在元素周期表中的位置向左移两位。而当放射性核素发生 β 衰变时，则放出一个电子，核内的一个中子变成一个质子，增加一个单位正电荷。所以子体核素的原子序数增加 1 而质量数不变，该核素在元素周期表中的位置，较衰变前向右移一位。当放射性核素发生同质异能跃迁时，只放出能量，而质量数和原子序数都没有发生变化，该核素在元素周期表中的位置不变。

比较三个衰变链，可以发现以下共同特点：

起始核素都是长寿命的， ^{238}U 的半衰期为 $4.5 \times 10^9 \text{a}$ ， ^{235}U 为 $7.1 \times 10^8 \text{a}$ ， ^{232}Th 为 $1.4 \times 10^{10} \text{a}$ 。因此这三个系列都能在自然界存在。

② 它们的质量数 A 服从一定的规律，铀系为 $A=4n+2$ ($n=51 \sim 59$)；钍系为 $A=4n$ ($n=52 \sim 58$)；镭铀系为 $A=4n+3$ ($n=51$

~58)

③ 每个衰变链中都有一个气态放射性核素，它们的原子系数为86，是氡的放射性同位素，通常称为射气，属惰性气体。铀系的射气是 ^{222}Rn ，半衰期为3.825d；钍系的射气为 $^{220}\text{Rn}(\text{Tn})$ ，半衰期为54.5s；镭铀系的射气为 $^{219}\text{Rn}(\text{An})$ ，半衰期为3.92s。

④ 三个衰变链中，射气的衰变产物均为固态物质，它们往往附着在物体表面，称为放射性沉淀物。这些衰变产物中除铀系的 $^{210}\text{Pb}(\text{RaD})$ 、 $^{210}\text{Bi}(\text{RaE})$ 和 $^{210}\text{Po}(\text{RaF})$ 寿命较长外，其余均为短寿命沉淀物。

⑤ 三个衰变链的射气衰变产物A核素(^{218}Po 、 ^{216}Po 、 ^{215}Po)，为钋的同位素，几乎全部放出 α 射线而变为B核素(^{214}Pb 、 ^{212}Pb 、 ^{211}Pb)——铅的同位素。B核素经过 β 衰变而变成C核素。C核素有双重衰变：经 β 衰变成为C'核素；经 α 衰变成为C''核素。伴随着C核素的衰变放出强 γ 射线，所以C核素都是主要 γ 辐射体。

⑥ 三个衰变链的最终产物均为不具放射性的铅的稳定同位素，铀系为 ^{208}Pb ，镭铀系为 ^{207}Pb ，钍系为 ^{208}Pb 。

此外有一个质量通式为 $4n+1$ 的衰变链，其起始母核素为镆(^{237}Np)，称为镆系。镆的半衰期为 $2.2 \times 10^6 \text{a}$ ，为地球年龄的千分之一，经过漫长的地质年代，镆在自然界已不存在了。但镆可用人工方法制得，故镆系也称人工衰变链。

三、放射性平衡

某一衰变链中，各放射性核素的活度均按该链前驱核素的平均寿命随时间作指数衰减的状态。当前驱核素与子体核素的放射性活度比值为—常数时称为放射性平衡。这种放射性平衡只有在前驱核素的平均寿命比该衰变链中其它任何一代子体核素的平均寿命长时才是可能的。如果前驱核素的寿命很长，以至在考察期间前驱核素总体上的变化可以忽略，那么所有核素的放射性活度将几乎相等，这时形成的放射性平衡称为长期放射性平衡。如果前驱核素的寿命略大于子体核素，当它们的放射性活度比值为常数

时，这时形成的放射性平衡就称为暂时平衡。

放射性核素在衰变过程中，其原子核数的减少是服从指数规律的：

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1-1)$$

式中， N_0 ——起始时 ($t=0$) 放射性核素的原子核数；

t ——衰变时间；

N_t ——经时间 t 后该放射性核素所剩下的原子核数；

λ ——衰变常数，即放射性核素的一个核在单位时间内进行自发衰变的几率。其单位是时间的倒数 (s^{-1} 、 min^{-1} 、 h^{-1} 、 d^{-1} 、 a^{-1}) 衰变常数 λ 由下式给出：

$$\lambda = -\frac{1}{N} \frac{dN}{dt}$$

式中， N ——在时间 t 时存在的该核素核的数目。

放射性核素的 λ 值越大，衰变越快，在数值上 λ 等于单位时间内发生衰变的原子核数与存在的原子核数之比。

放射性核素衰变速度还可半衰期表示。半衰期 ($T_{1/2}$) 与衰变常数的关系如下：

$$T_{1/2} = 0.693/\lambda \quad (1-2)$$

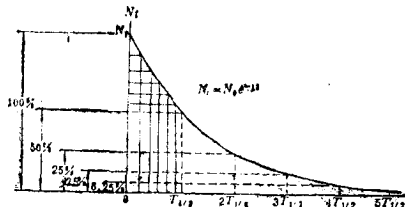


图 1-2 放射性核素衰变规律图

从图 1-2 可见，当经过一个半衰期时，原子核数剩下一半；经过两个半衰期时剩下 $1/4$ ($\frac{1}{2^2} N_0$)；若经过十个半衰期，则剩下

$1/1000$ ($\frac{1}{2^{10}} N_0$)，这时一般可认为放射性核素已全部衰变完了。

当母体核素衰变所生成的子体核素也具有放射性时，该子体核素也将按自身固有的衰变速率衰变，并继续得到母体核素衰变的补充，所以子体核素能在母体核素及自生衰变速率的影响下，按一定的规律逐步积累，这称为递次衰变规律。假定母体核素 A

没有新的来源， B 为其子体核素，仍具有放射性，则 B 核素的原子核数与 A 核素和 B 核素的衰变速度有关。设经过 t 时间后， B 核素的原子核数净增量等于 t 时间内新生 B 核素原子核数减去同一时间内 B 核素的原子核数衰变量，则放射性核素 B 的原子核数(N_B)随时间变化的规律可用下式表达：

$$N_B = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_{A0} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) + N_{B0} e^{-\lambda_B t} \quad (1-3)$$

式中， N_{A0} 、 N_{B0} ——当 $t=0$ 时 A 和 B 核素的原子核数；

λ_A 、 λ_B —— A 和 B 核素的衰变常数；

N_B ——时间为 t 时 B 核素的原子核数。

(1-3)式中等式右边前一项表示经时间 t 后由母体核素 A 衰变而来的 B 核素净增加的原子核数，后一项是子体核素 B 原有($t=0$ 时)的原子核数 N_{B0} 经时间 t 衰变剩余的原子核数。由(1-3)式可见， B 核素的原子核数随时间的变化取决于 λ_B 与 λ_A 之间的差别。为了讨论方便，假定 $t=0$ 时， $N_{B0}=0$ ，即开始时不存在 B 核素，则可按以下不同情况进行讨论。

放射性平衡有两种情况：

(1) 当 $\lambda_A \ll \lambda_B$ 时，即母体核素 A 为长寿命核素，其衰变速率很慢，而子体核素 B 的衰变速率比 A 快得多，则可认为在测量过程中母体核素的数量保持不变。此时 λ_A 与 λ_B 相比可忽略不计，(1-3)式中的 $\lambda_B - \lambda_A \approx \lambda_B$ ， $e^{-\lambda_A t} \approx e^{-0} \approx 1$ 。当 $N_{B0}=0$ 时，经时间 t 后， B 核素的原子核数积累量为：

$$N_B = \frac{\lambda_A}{\lambda_B} N_{A0} (1 - e^{-\lambda_B t}) \quad (1-4)$$

由(1-4)式可见， B 原子核素随时间延长而增加，当经过很长时间后($t \rightarrow \infty$)， $(1 - e^{-\lambda_B t}) \rightarrow 1$ ，即 N_B 达到极限值 N_∞ 时，为一常量，或 N_B/N_{A0} 为一常数，

$$N_B = \frac{\lambda_A \cdot N_{A0}}{\lambda_B} = N_\infty$$

$$\text{或, } N_B \lambda_B / N_A \lambda_A = 1 \quad (1-5)$$

$$N_B / N_A = \lambda_A / \lambda_B \quad (1-6)$$

(1-5)式表示, 单位时间内B核素衰变的原子核数等于A核素衰变的原子核数。这种状态称为B核素与A核素达到长期放射性平衡。由图1-3可见, 当 $t=4T_B$ 时, $N_B=0.937N_\infty$; 当 $t=10T_B$ 时, $N_B=0.999N_\infty$, N_B 接近于 N_∞ , 可视为常数, 所以一般认为 $t=10T_B$ 时, 核素A与B之间达到平衡状态。

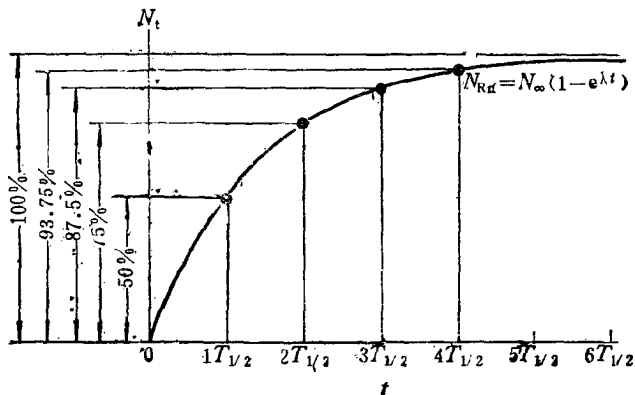


图1-3 氡的积累曲线

(1-6)式表示, 达到放射性平衡时, 核素之间存在着固定的比例关系。在自然界如铀-镭处于平衡时, 其原子核数的比为U:Ra $=4.91 \times 10^{-18} / 1.36 \times 10^{-11}$ 。这就是说与1g铀处于平衡时的镭的量为 3.4×10^{-7} g。

(2) 当 $\lambda_A < \lambda_B$, 且两者相差较小时, 在 $N_{B0}=0$ 的情况下, (1-3)式可写成:

$$N_B = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_{A0} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) \quad (1-7)$$

经过足够长的时间后, $e^{-\lambda_B t} \ll e^{-\lambda_A t}$, 此时(1-7)式可简化为:

$$N_B = \frac{\lambda_A N_{A0}}{\lambda_B - \lambda_A} e^{-\lambda_A t} \quad (1-8)$$

把 $N_{A0} e^{-\lambda_A t} = N_A$ 代入(1-8)式可得: